

TRABAJO FIN DE GRADO

La influencia de los ríos atmosféricos y los tipos de tiempo en las inundaciones de Galicia (NO España).

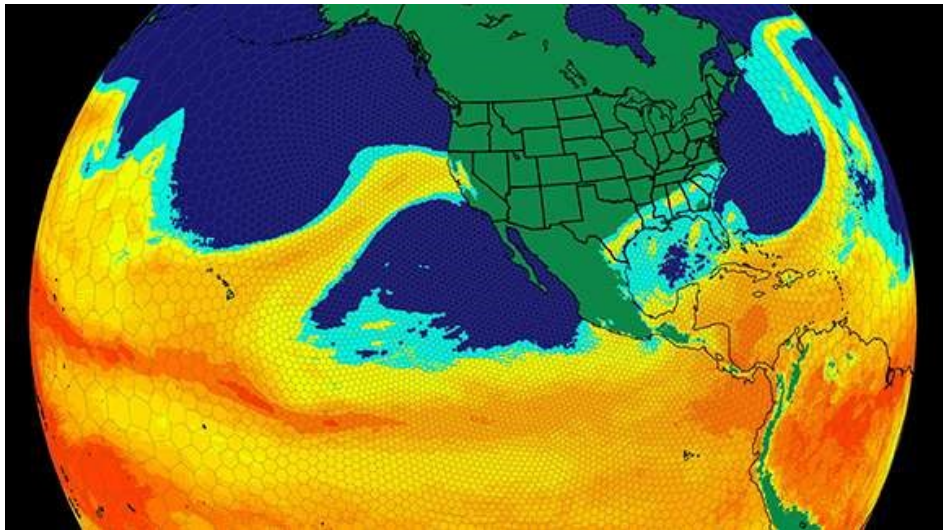


Figura tomada de www.phys.org

Alba Robles Barja
Grado en Ciencias Ambientales
Julio 2017

Tutores: M^a de las Nieves Lorenzo González y Jorge Eiras Barca
Departamento de Física Aplicada y Departamento de Física de Partículas

Universida_{de}Vigo

Faculta_{de}Ciencias

**La influencia de los ríos atmosféricos y los tipos
de tiempo en las inundaciones de Galicia (NO
España).**

Trabajo Fin de Grado

Grado de Ciencias Ambientales

Alba Robles Barja

Dra. M^a de las Nieves Lorenzo González, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo y **Jorge Eiras Barca**, del área de Física de la Tierra del Departamento de Física de Partículas, de la Universidad de Santiago de Compostela

INFORMAN:

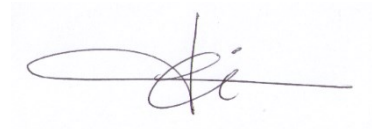
Que el trabajo titulado "**La influencia de los ríos atmosféricos y los tipos de tiempo en las inundaciones de Galicia (NO España)**" presentado por **D^a. Alba Robles Barja**, con **D.N.I.: 48111806S**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como **Trabajo Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 13 de Junio de 2017

D^a. M^a de las Nieves Lorenzo González



D. Jorge Eiras Barca



RESUMEN

Las precipitaciones extremas, los vientos anómalos y los eventos de inundación son los riesgos climáticos más frecuentes en Galicia que pueden llegar a causar daños importantes en las infraestructuras y en casos muy graves, la muerte de personas. Hay muchos factores relacionados con estos eventos de precipitación extrema e inundaciones. En los últimos años se ha observado que uno de esos factores podría ser los llamados ríos atmosféricos (ARs), estructuras alargadas y estrechas que transportan un flujo de vapor de agua anormalmente alto y que se localizan en las regiones prefrontales de los frentes fríos acompañando a algunos sistemas ciclónicos o a algunas situaciones de ciclogénesis que han tenido lugar habitualmente en latitudes tropicales. En este trabajo se analiza la relación entre ARs e inundaciones en la región de Galicia, situada al noroeste de la península Ibérica, bajo diferentes condiciones sinópticas. Los eventos de inundación se identifican a partir del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH) elaborado por la Agencia de Emergencias española para el periodo 1979–2010. Los resultados sugieren que, aunque la existencia de inundación no siempre está relacionada con la presencia de ARs. Estos si aparecen en un porcentaje del 79% en aquellos episodios más extremos o intensos durante el periodo invernal y en las zonas de costa. Los eventos de inundación asociados con ARs están conectados a tipos de clima ciclónico con flujo de oeste y suroeste. Sin embargo, la influencia de los ARs no es tan evidente durante los meses de verano debido a que en estos casos el origen de las precipitaciones intensas suele ser más convectivo que frontal. Los resultados concluyen que la presencia de un AR en asociación con una situación sinóptica propicia a generar precipitaciones pueden duplicar e incluso cuadruplicar la cantidad de agua precipitable en Galicia.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición de una inundación	3
1.2. ¿Qué es un río atmosférico?	6
1.3. ¿Qué es una situación sinóptica?	9
2. DEMARCACIÓN Y OBJETIVO DEL ESTUDIO	11
2.1. Demarcación	11
2.2. Objetivos	13
3. DATOS Y METODOLOGÍA	15
3.1. Datos.....	15
3.1.1 .Datos de Inundaciones	15
3.1.2 Datos de precipitación	17
3.1.3 Ríos atmosféricos	18
3.1.4 Datos de presión	19
3.1.5 Mapas de geopotencial a 500hPa, SLP y precipitación	19
3.2. Métodos.....	19
3.2.1. Cálculo de los máximos de precipitación	19
3.2.2. Cálculo de patrones sinópticos	20
4. RESULTADOS	23
4.1 Caracterización de las inundaciones	23
4.1.1. Relación con patrones sinópticos y ríos atmosféricos	24
4.1.1.1. Invierno extendido	24
4.1.1.2. Verano extendido	27
4.2.1. Relación con SLP, IVT e IWV	30
4.2. Las 5 mayores inundaciones del periodo 1979-2010	33

4.2.1. Invierno de 1987	34
4.2.2. Invierno de 1989	37
4.2.3. Invierno de 1999	40
4.2.4. Invierno del 2000	42
4.2.5. Invierno de 2006	45
5. CONCLUSIONES	49
6. REFERENCIAS	51

1. Introducción

Galicia es una región situada en el noroeste de la Península Ibérica (entre 40°N y 44°N, y entre 9.5°W y 6°W) bordeada básicamente por el océano Atlántico al oeste y el mar Cantábrico al norte.

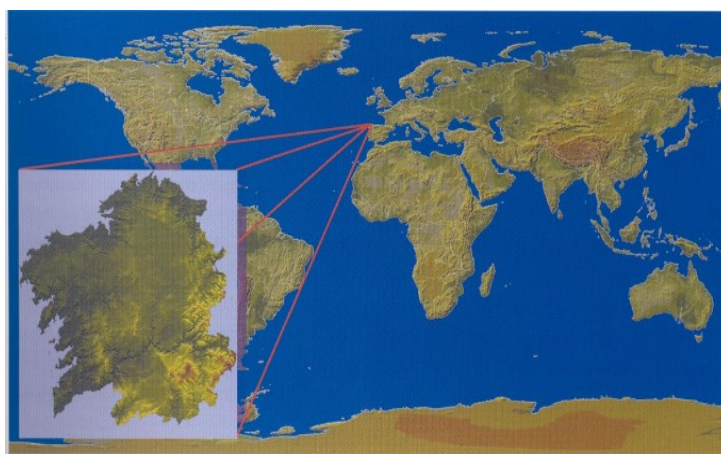


Figura 1.1, *Galicia en el contexto de las latitudes medias*. Fuente: Atlas Climático de Galicia, MeteoGalicia.

Galicia (Figura 1.1) se encuentra en las latitudes medias, por lo que se ve afectada por el centro de bajas presiones del Frente Polar generado en el Atlántico Norte y por el sistema de circulación de vientos del oeste. Esos centros de bajas presiones junto con la circulación de vientos del oeste domina las latitudes medias durante el periodo invernal (octubre a marzo). Además, es durante ese periodo, en el cual esos centros alcanzan su máxima fuerza debido a la diferencia de temperatura entre la región polar y el trópico. Durante los meses invernales Galicia se ve afectada por grandes perturbaciones oceánicas que puede llegar a traer consigo fuertes rachas de viento y lluvias muy intensas [Cabalar-Fuentes, 2005] lo que la convierte en una región dominada por temperaturas generalmente suaves y precipitaciones que pueden superar los 1000 mm anuales. El clima está determinado regionalmente por una combinación de tres factores

principales: la latitud, la compleja topografía y el grado de continentalidad (es decir, la distancia al mar).

Según esto, globalmente Galicia se caracteriza por tener clima atlántico templado y húmedo con precipitaciones abundantes, espacial y temporalmente muy variables [Gómez-Gesteira et al., 2011; Rodríguez Guitián y Ramil-Rego, 2007; Naranjo y Pérez Muñuzuri, 2006] y temperaturas suaves durante todo el año. No obstante, en zonas del interior como Ourense, el clima es más continental y el invierno y el verano presentan condiciones más diferenciadas.

Los eventos de precipitaciones fuertes afectan a Galicia sobre todo en otoño e invierno por encontrarse altamente influenciada por el paso continuo de estructuras baroclínicas que aumenta la posibilidad de eventos de precipitación fuertes en este periodo [Drumond et al., 2011]. En primavera y verano la precipitaciones fuertes se encuentran generalmente asociadas a episodios de origen convectivo [Nieto et al., 2011; Eiras-Barca et al., 2016].

Por otro lado, Galicia posee una parte importante de su territorio con riesgo significativo de inundaciones (Figura 1.2) debido a la precipitación procedente del corredor tropical y subtropical [Gimeno et al., 2010; Drumond et al., 2011]. También hay que destacar que se encuentra situada en el margen sur del río troposférico atlántico [Zhu & Newell 1998] que es el que proporciona la mayor cantidad de humedad en latitudes medias atlánticas.

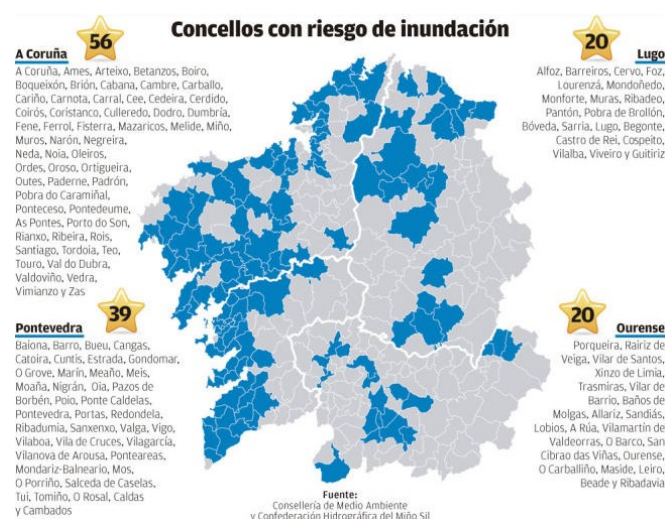


Figura 1.2, Zonas de riesgo de inundación para las 4 provincias de Galicia. Fuente: Consellería de Medio Ambiente

1.1 ¿Qué es una inundación?

La Directriz básica de Planificación de Protección Civil define inundación como la sumersión de terrenos normalmente secos de manera temporal.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) la define como el desbordamiento del agua por encima de los límites normales de una corriente o de otra masa de agua por drenaje sobre zonas que no están normalmente sumergidas.

El CRID (Centro Regional de Información sobre Desastres) la define como una ocupación por el agua de zonas o áreas que en condiciones normales se encuentran secas [CRID, 1998].

Las inundaciones normalmente se producen debido al efecto del ascenso temporal del nivel de ríos, lagos u otros. Las inundaciones de la costa, se definen como inmersión temporal o permanente de terrenos que no están normalmente cubiertos de aguas a causa de mareas, oleaje, resacas o procesos erosivos de la línea de costa, y las causadas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición [Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011].

Todas estas definiciones coinciden en que una inundación produce un aumento muy significativo del nivel de agua de un cauce o de cualquier región costera que provoca la invasión de la misma en lugares generalmente secos o donde no es habitual la presencia del agua.

Olcina Cantos en su artículo “*Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en España*” define el riesgo natural como “la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario”.

Además, señala que el riesgo natural se encuentra integrado por tres factores:

1. Peligrosidad: Probabilidad de que ocurra un fenómeno dañino en un lugar determinado y dentro de un intervalo de tiempo.
2. Vulnerabilidad: Pérdida que se puede esperar de los bienes expuestos, pudiendo ser humana, económica, medioambiental...
3. Exposición: Número de personas o bienes expuestos a un determinado riesgo.

Estos factores, además, se relacionan con la naturaleza, con el hombre y con el territorio.

Diversos autores, han proporcionado diversas clasificaciones de estos riesgos o desastres naturales. Un ejemplo de ellos es aquel, proporcionado por el Centro Regional de Información sobre Desastres (CRID), que plantea 3 tipos de riesgos/desastres según el origen:

1. Geológicos: erupciones volcánicas, avalanchas...
2. Hidrometeorológicos: inundaciones, huracanes, lluvias intensas...
3. Tecnológicos: incendios de desechos tóxicos industriales...

Cuando se habla de inundaciones, hablamos de uno de los mayores riesgos naturales a los que se enfrenta la población por sus impactos tanto en las estructuras económicas y sociales como en el medio ambiente. El incremento de la intensidad de este riesgo o desastre natural relacionado con factores climáticos o con fenómenos hidrometeorológicos extremos suelen causar más del 90% de las víctimas y cerca del 85% del total de las pérdidas económicas.

Por otro lado, las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a diversos criterios como por ejemplo por el origen, donde se producen, frecuencia con la que ocurren o teniendo en cuenta el impacto de la crecida de los ríos.

Si se tiene en cuenta los lugares donde se producen pueden ser: costeras, fluviales, lacustre y pluviales [MES, 2003].

Si clasificamos las inundaciones según el origen, diferenciamos 3 tipos:

1. Por precipitaciones "in situ"
2. Por avenidas o desbordamiento de los ríos, lagos o marismas
3. Por rotura o por operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica.

Si se considera el impacto de la crecida de los ríos, las inundaciones pueden ser:

1. Ordinarias: el caudal del río aumenta pudiendo afectar a infraestructuras o invadir pasos para el cruce del río. No ocasionan daños muy graves.
2. Extraordinarias: pueden ser locales o muy extensas. El río se desborda pudiendo producir algunos daños sin destruir completamente las infraestructuras.
3. Catastróficas: aquellas que produce pérdidas materiales graves, como por ejemplo la destrucción total o parcial de puentes u otras infraestructuras.

Si se tiene en cuenta la frecuencia con que ocurren las mismas, se clasifican en:

1. Frecuentes: cuando ocurren cada 50 años.
2. Ocasionales: cuando ocurren en un período de 50 a 100 años.
3. Excepcionales: cuando ocurren en un período de 100 a 500 años.

Si se analizan teniendo en cuenta los factores que las provocan existen dos tipos [Seco, 1996]:

1. Factores Naturales: climatológicas (lluvias intensas, fusión de nieves), o la combinación de la anterior y otros factores (inundaciones en estuarios, costas)...
2. Factores Antropogénicos: rotura de diques fluviales, extracción de minerales del subsuelo...

Si se tiene en cuenta los daños causados por estas, se consideran 3 tipos:

1. Directos: daños directos en la agricultura, la industria...
2. Indirectos: cuando se produce una pérdida de los servicios y productos de una región, debido a una interrupción temporal de la producción agropecuaria...
3. Intangibles: daños a la economía que no se pueden recuperar e incluso los heridos, las muertes y los efectos psicológicos o emocionales de la población.

Además si se tiene en cuenta la velocidad con la que tardan en ocurrir, estas pueden ser:

1. Súbitas: cuando la corriente de agua se desplaza con tanta fuerza que es capaz de arrasar todo a su paso.
2. Lentas: cuando se producen en zonas costeras, partes bajas de las cuencas hidrográficas... Aquí la inundación se mantiene por un tiempo más prolongado y en un área mayor.

Por todo ello, el estudio y caracterización de las causas de las inundaciones es un tema trascendente para mitigar sus efectos y buscar las medidas más idóneas de adaptación. Aunque pueden ocurrir sobre cualquier región con tendencia a fuertes precipitaciones, la lluvia no es el único factor que puede provocarlas.

En Galicia, las inundaciones tienen un carácter particular. Generalmente, los factores que intervienen en el desarrollo de las mismas son variados pero, en general, están más

asociadas a eventos con un largo período de abundante precipitación propia de la climatología de la región.

Aunque es cierto que la mayor parte de las inundaciones producidas, se deben a fenómenos hidrometeorológicos como la llegada de frentes fríos y ciclones tropicales que traen consigo vientos muy intensos y precipitación extrema, existen otros factores de carácter antropogénico que pueden aumentar el riesgo de inundaciones, entre ellos, se encuentra: el desvío de cauces debido a la modificación del flujo del río o al asentamiento de construcciones en ellos, la construcción de presas, el uso intensivo de la tierra y la silvicultura, los incendios...

Respecto a los factores de origen natural distintos de las lluvias torrenciales, en este trabajo se analizan 2 factores: La presencia o no de un río atmosférico (AR) y la situación sinóptica que tiene lugar también denominada WT (por sus siglas en inglés “*Weather Type*”).

1.2 ¿Qué es un río atmosférico?

De forma general, un río atmosférico (Figura 1.3) es una estructura filamentosa (alargada, típicamente varios miles de km, y estrecha, generalmente unos cientos de km) que transporta grandes concentraciones de flujo de vapor de agua. Por definición, estas estructuras presentan una columna vertical integrada de vapor de agua (IWV, por sus siglas en inglés “*integrated water vapor*”) a los 2cm y están localizadas en las regiones prefrontales de los frentes fríos acompañando a algunos sistemas ciclónicos o a algunas situaciones de ciclogénesis que han tenido lugar habitualmente en latitudes tropicales [Stohl et al., 2008].

Estas estructuras alargadas presentan, de forma general, una longitud media de unos 3.700 km, y una cantidad media de transporte integrado de vapor (IVT, por sus siglas en inglés “*integrated vapor transport*”) de $375 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [Guan et al., 2015]. Además, los ARs son unos de los mecanismos principales de transporte meridional de calor latente y sensible entre (sub)tropicos y latitudes medias. Aunque pueden encontrarse ARs en diversos puntos del planeta, su localización habitual coincide con los corredores oceánicos por los que transporta vapor de agua procedente de las regiones subtropicales atlánticas así como humedad “capturada” por evapotranspiración a lo largo del trayecto.

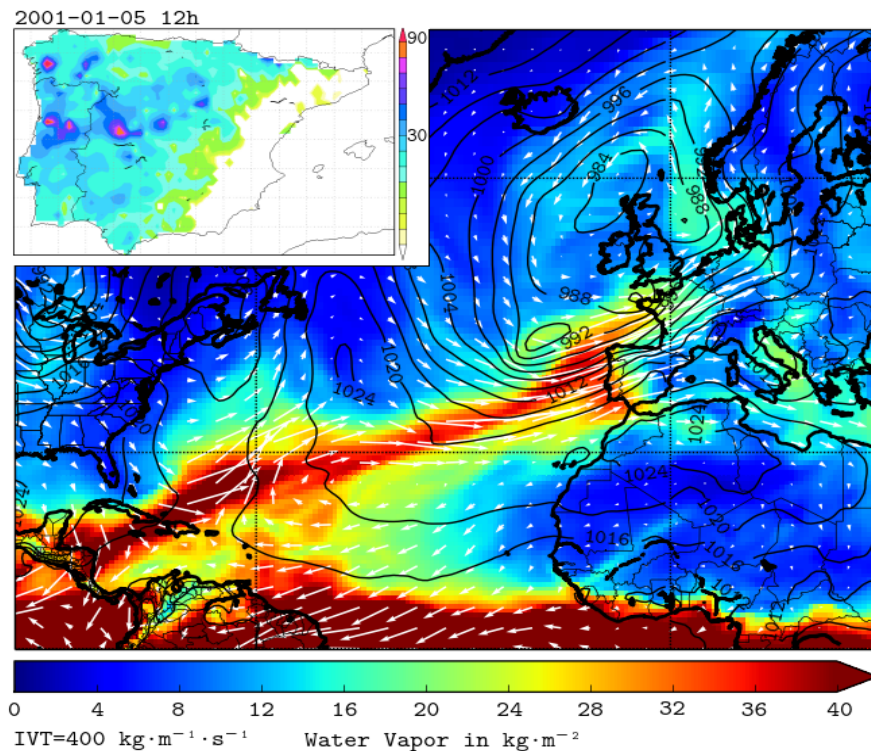


Figura 1.3, *Ejemplo de AR sobre la costa oeste y sur de la península. El campo vectorial corresponde a la columna vertical integrada de flujo de vapor de agua (IVT) mientras que el escalar hace referencia a la columna vertical integrada de vapor de agua (IWV, equivalente al agua precipitable).*

En general, puede decirse que los ARs se producen dentro del sector cálido de los ciclones extratropicales. Son considerados como el principal elemento de transporte meridional de humedad en la baja troposfera y la característica sinóptica clave detrás de la mayoría de las precipitaciones extremas de invierno en las regiones de latitud media. Por esta razón, cada vez se asocian más con el origen de las fuertes precipitaciones y las inundaciones sobre estas latitudes [Newell et al., 1992; Zhu y Newell, 1998; Gimeno et al., 2010; Ralph y Dettinger, 2011; Lavers et al., 2011; Viale y Núñez, 2011; Lavers y Villarini, 2013; Matrosov, 2013; Neiman et al., 2013; Rutz et al., 2014; Gimeno et al., 2014; Garaboa-Paz et al., 2015; Eiras-Barca et al. (2016) Gimeno et al., 2016; Waliser y Guan, 2017].

Un estudio preliminar propuesto por Zhu y Newell en 1998 muestra que existen entre 4 y 5 ríos atmosféricos por hemisferio transportando una cantidad de agua superior al caudal del río Amazonas desde las regiones tropicales y subtropicales hasta las latitudes medias y siempre en dirección zonal. En las regiones costeras que reciben flujo zonal,

puede encontrarse una alta correlación entre la precipitación extrema y la detección de un AR, pero esta es variable ya que depende de factores como la orografía, la latitud o el forzamiento atmosférico [Gimeno et al., 2014]. En cuanto al comportamiento del propio río atmosférico, es similar al de los frentes fríos.

En general, puede observarse que la intensidad de los ríos atmosféricos (en términos de IVT e IWV) depende de la “conexión” que la estructura baroclínica (típicamente el frente frío) tenga con las latitudes tropicales. Si bien es cierto que pueden encontrarse ARs en sistemas que no están conectados con los trópicos (o bien por estar localizados en latitudes muy altas, o bien por encontrarse bloqueados por un anticiclón situado más al sur), en general, los ríos que presentan unos campos más intensos y asocian mayores precipitaciones tienen una conexión directa con los trópicos (e.g. Figura 1.3), lo que permite un corredor directo de advección de humedad.

El segundo mecanismo que alimenta al río atmosférico es la convergencia local de humedad, que se maximiza en la región posfrontal. El porcentaje de aporte de humedad de los mecanismos de advección y convergencia varía en función de la situación sinóptica, raras veces superando el segundo al primero.

Como se ha comentado anteriormente, numerosos estudios han demostrado la correlación existente entre los ARs y los eventos de precipitación extrema en diferentes partes del mundo. Ejemplos de estos estudios incluyen la propia península Ibérica [Eiras-Barca et al., 2016], la costa oeste de Norteamérica [Neiman et al. 2008] etc.

Sin embargo, pocos de ellos han utilizado bases de datos sobre inundaciones para analizar cómo se refleja el impacto de estos en la vida cotidiana de las personas. Un ejemplo de este estudio se ha llevado a cabo para las islas británicas en 2011 [Lavers et al., 2011].

En cuanto a su detección, hay muchas aportaciones significativas de diferentes autores [Lavers et al., 2012; Guan y Waliser, 2015, Eiras-Barca et al., 2016]. En este trabajo se ha considerado el algoritmo de detección basado en Guan y Waliser (2015) para la detección de ARs tanto en invierno como en verano. Todos los algoritmos de detección de están basados de una forma u otra en el análisis de las propiedades de los campos de IWV e IVT.

1.3 ¿Qué es una situación sinóptica?

Diversos trabajos han observado que la variabilidad de la precipitación y de la temperatura se ve influenciada por los modos principales de variabilidad de baja frecuencia del Atlántico Norte, oscilación del Atlántico Norte, índice escandinavo, los

índices atlánticos/occidentales o del este de Rusia [Lorenzo y Taboada, 2005; de Castro et al., 2006]. Pero también es importante para el estudio de dicha variabilidad estudiar la influencia de cambios en los patrones de circulación local sobre el clima analizando en profundidad los cambios en la frecuencia de los diferentes patrones y sus efectos sobre las distintas variables meteorológicas.

Los patrones de circulación son específicos para una región dada y son resultado del análisis de los datos sinópticos meteorológicos registrados generalmente sobre una celda regular que es obtenida utilizando gran variedad de metodologías [Huth et al., 2008]. Estos esquemas de clasificación traen orden y simplicidad al sistema climático, proporcionando una gran cantidad de información de forma codificada.

Una clasificación de patrones de circulación es en general un método algorítmico que distingue entre situaciones meteorológicas describiéndolas a través de parámetros de circulación (por ejemplo, zonalidad, carácter ciclónico, posición de sistemas de altas y bajas presiones etc.) o por elementos de tiempo local como temperatura o precipitación [Ramos, 2010]. Los parámetros de circulación son usados frecuentemente ya que pueden ser usados muy fácilmente para relacionar ciertas características de la circulación atmosférica con el tiempo local a través de métodos estadísticos [Ramos, 2010]. De modo general y simplificado, se podría definir una situación sinóptica como el tipo de situación meteorológica que se presenta en un día determinado.

Una clasificación sinóptica es una tipificación de estados de la atmósfera a tal escala (sinóptica), que permite el análisis de configuraciones de longitud de onda del orden de 1000 km. Estas configuraciones (borrascas, vaguadas, anticiclones, dorsales...) influyen de forma determinante sobre el tiempo y el clima. Por ello, tradicionalmente se han desarrollado numerosas clasificaciones sinópticas, como herramientas analíticas y predictivas. En la mayoría de los casos, estas clasificaciones nacían y morían en la mente de un predictor. Éste, con su experiencia acumulada, dividía mentalmente los “mapas del tiempo” que había conocido, atendiendo a los efectos asociados

(precipitación, temperatura...). Algunos de estos profesionales publicaron sus clasificaciones, que suelen recibir el nombre de “subjetivas”. En España destacan los trabajos de Font (1983), Linés (1981) y Sánchez Rodríguez (1993) entre otros.

Para permitir que la clasificación de las configuraciones atmosféricas pueda realizarse mediante ordenador, y para disminuir la subjetividad, surgieron en las últimas décadas

las clasificaciones “objetivas” o, mejor dicho, “automatizadas” [Ribalaygua y Borén, 1995; Huth, 2008]. En los últimos años estas clasificaciones se han utilizado para estudiar la conexión entre patrones atmosféricos y el clima en superficie: precipitación, temperatura, asociación con la actividad eléctrica, la producción de uva y la calidad del vino, el afloramiento costero, etc. [Lorenzo et al., 2008; Lorenzo et al., 2011; Ramos et al., 2011; Lorenzo et al., 2012; Lorenzo et al., 2012; Picado et al., 2016].

En este trabajo para el cálculo de los distintos WTs, se ha adoptado una variación del método desarrollado por Lamb en 1972 para las islas británicas. Esa clasificación proporcionada por Lamb era la considerada como tradicional manual o subjetiva que se basaba en la experiencia del investigador y que empleaba variaciones de presiones. Posteriormente, fue adaptada en otros estudios como el de Trigo y DaCamara en el año 2000 o el estudio de Jenkinson y Collison en 1977 para las islas británicas, el cual fue evaluado en 1993 por Jones. Esos estudios modificaron la clasificación de Lamb proporcionando una, más objetiva y automatizada, apoyada por la capacidad de cálculo de los ordenadores.

2. Demarcación y objetivo del estudio

2.1 Demarcación

Este estudio se realiza sobre parte del territorio gallego agrupado en dos cuencas hidrográficas: Miño-Sil y Galicia-Costa (Figura 2.1).

Las demarcaciones de las respectivas cuencas se encuentran recogidas en los siguientes planes hidrológicos:

1. Plan Hidrológico 2016-2021 (vigente, RD 1/2016) para la demarcación de Miño-Sil.
2. Plan hidrológico 2015-2021 aprobado por Real Decreto 1/2016, de 8 de enero para la demarcación de Galicia-Costa.

La cuenca de Galicia-Costa, localizada en la parte occidental de Galicia, constituye el 44% de Galicia y se extiende desde la propia costa hasta el Macizo Galaico y posee una superficie de aproximadamente 14.700 km.

En cuanto a la precipitación media anual, se sitúa en un rango aproximado de 1600-1900 mm/año debido en gran medida a la influencia atlántica. Esta influencia atlántica en realidad afecta a ambas cuencas y provoca eventos de precipitación muy fuertes en muchos casos. Además, el mar ejerce un efecto regulador sobre la temperatura haciendo que se produzca abundante humedad y eventos de precipitación intensa. Esto provoca que el clima que posee dicha cuenca sea más oceánico que el de la cuenca del Miño-Sil que es más continental.

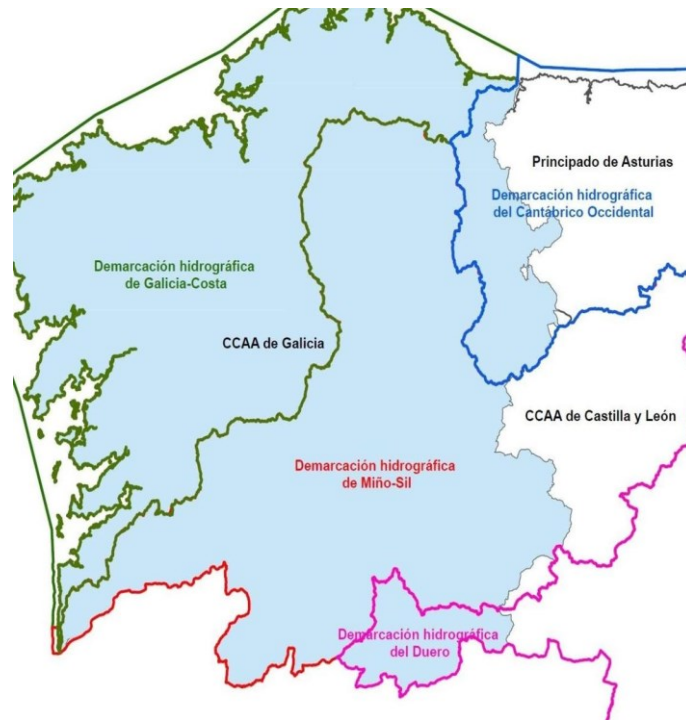


Figura 2.1, *Demarcación hidrográfica del Miño-Sil y de Galicia-Costa*. Fuente: EUROPA PRESS, 2013.

La Cuenca del Miño-Sil, localizada en la parte este de Galicia, constituye el 56% restante de Galicia y posee una superficie de 17.757 km². Los últimos 76 km hacen frontera entre España y Portugal, y de estos últimos, 33 km son navegables.

Esta cuenca, posee un clima más continental con abundante nubosidad y precipitaciones frecuentes. El clima continental generalmente supone que la diferencia sea más pronunciada entre el verano y el invierno contrario a lo que ocurre en la costa.

Las precipitaciones medias se sitúan en un rango de oscilación de 800-1.900 mm/año debido a factores como la influencia atlántica (menos intensa que en la costa) o la propia morfología de la cuenca.

Un ejemplo de morfología puede ser el perfil propio de los ríos, sobre los cuales se pueden producir inundaciones, cuando ocurren grandes eventos de precipitación.

En este trabajo se analizará la influencia que tienen los diferentes patrones de circulación local o WT y la presencia de ríos atmosféricos sobre los eventos de inundación registrados en las dos cuencas hidrográficas de la comunidad gallega durante el periodo de 1979-2010.

2.2 Objetivo

El objetivo fundamental de este trabajo es analizar la conexión entre los ARs y las fuertes inundaciones bajo la influencia de distintos patrones de circulación local (WT) a lo largo del periodo escogido 1979-2010.

- En primer lugar, identificaremos cuales son los principales tipos de WT a los que se le asocia no solo una inundación si no también la presencia de un río atmosférico.
- En segundo lugar se analizarán de forma pormenorizada las 5 mayores inundaciones registradas con el objetivo de comprobar si la influencia de los ARs asociados a cierto tipos de tiempo pueden influir en la intensidad de las inundaciones.

Esto puede ser muy útil para predecir adecuadamente los daños que puedan causar este tipo de eventos extremos, alertando de forma más acertada a los servicios de emergencias. La base de datos sobre inundaciones empleada en este estudio es la proporcionada por el servicio de Protección Civil de España que solo tienen en cuenta aquellas inundaciones que impliquen daños severos tanto en infraestructuras y patrimonio como en las personas.

3. Datos y metodología

3.1 Datos

3.1.1 Datos de inundaciones

Para el estudio de las grandes inundaciones de Galicia se recogieron datos correspondientes al Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. El periodo recogido en el estudio comprende desde 1979 a 2010 siendo el primer episodio registrado en las cuencas estudiadas el que corresponde al año 1987.

Este catálogo, fue elaborado en 1995 para la cuenca del río Segura pero, no fue hasta 1997 cuando se desarrolla la Guía Metodológica en la que se incluyó más tarde, los grupos de trabajo de las cuencas Galicia-Costa y de Miño-Sil.

Los organismos que intervinieron en la elaboración en nuestra área de estudio fueron:

1. Unidades de Protección Civil de las Delegaciones/Subdelegaciones del Gobierno incluidas en el ámbito territorial de la cuenca, en este caso Galicia-Costa.
2. Confederación Hidrográfica o Administración Hidráulica competente.
3. Centros Meteorológicos Territoriales del Instituto Nacional de Meteorología que resulten competentes sobre el territorio de la cuenca.
4. Protección Civil de las Comunidades Autónomas afectadas.
5. Delegaciones Regionales del Consorcio de Compensación de Seguros correspondientes a la región.

Cabe destacar que la información que se presenta en este Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas se encuentra en proceso de revisión, por lo que estos datos tienen un carácter meramente informativo. Las Tablas 3.1 y 3.2 enumeran los episodios de inundación de las cuencas hidrográficas de Galicia-Costa y Miño-Sil registrados en dicho catálogo.

Tabla 3.1 *Inundaciones de la cuenca hidrográfica Galicia-Costa para el periodo 1979-2010.*

Cuenca hidrográfica de Galicia-Costa	
Temporal de octubre 1987	13/10/1987 a 16/10/1987
Inundación de enero 1988	05/01/1988 a 05/01/1988
Tormentas de junio de 1988	15/06/1988 a 21/06/1988
Inundación de diciembre de 1989	19/12/1989 a 21/12/1989
Inundación de noviembre de 1994	06/11/1994 a 06/11/1994
Inundación de diciembre de 1995 y enero de 1996	21/12/1995 a 23/01/1996
Inundación de noviembre de 1997	10/11/1997 a 13/11/1997
Temporal abril-mayo 1998	30/04/1998 a 01/05/1998
Temporal marzo 1999	07/03/1999 a 09/03/1999
Inundación de abril 2000	24/04/2000 a 25/05/2000
Temporal finales octubre 2000 a enero 2001	20/10/2000 a 31/01/2001
Inundación marzo 2001	19/03/2001 a 24/03/2001
Inundación de octubre 2001	19/10/2001 a 23/10/2001
Temporales de noviembre y diciembre 2002	11/11/2002 a 31/12/2002
Inundación septiembre 2004	04/04/2004 a 08/09/2004
Inundación octubre-noviembre 2005	28/10/2005 a 02/11/2005
Inundación Octubre 2006	02/10/2006 a 25/10/2006
Inundaciones Noviembre 2006	18/11/2006 a 07/12/2006
Tormenta Klaus	23/01/2009 a 25/01/2009
Inundaciones noviembre y diciembre 2009	13/11/2009 a 29/12/2009
Inundaciones enero 2010	12/01/2010 a 23/01/2010
Inundaciones febrero 2010	21/02/2010 a 01/03/2010
Temporal Doris	09/06/2010 a 11/06/2010
Temporal octubre 2010	03/10/2010 a 09/10/2010

Tabla 3.2 *Inundaciones de la cuenca hidrográfica Miño-Sil para el periodo 1979-2010.*

Cuenca hidrográfica Miño-Sil	
Temporal de octubre 1987	14/10/1987 a 16/10/1987
Tormentas de junio de 1988	15/06/1988 a 21/06/1988
Inundación de diciembre de 1989	12/12/1989 a 24/12/1989
Inundación de enero 1994	01/01/1994 a 17/01/1994
Inundación de junio de 1994	07/06/1994 a 07/06/1994
Temporal de diciembre 1994 a enero 1995	31/12/1994 a 01/01/1995
Inundación de diciembre de 1995 y enero de 1996	24/12/1995 a 02/01/1996
Inundación de enero 1996	05/01/1996 a 13/01/1996
Inundaciones noviembre 1996	01/11/1996 a 30/11/1996
Temporal abril-mayo 1998	30/04/1998 a 04/05/1998
Inundación diciembre 1999	14/12/1999 a 16/12/1999
Temporal finales octubre 2000 a enero 2001	30/10/2000 a 31/01/2001
Temporal de diciembre del 2000 (subperiodo)	05/12/2000 a 13/12/2000
Temporales de noviembre y diciembre 2002	01/11/2002 a 31/12/2002
Inundación diciembre 2003	01/12/2003 a 31/12/2003

3.1.2 Datos de precipitación

En lo que respecta a la recogida de datos de precipitación, consideramos 5 estaciones como representativas de las 4 provincias gallegas pertenecientes a las dos cuencas consideradas (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 *Estaciones meteorológicas elegidas para la representación de la lluvia recogida en las dos cuencas hidrográficas.*

Estación	Provincia	Latitud	Longitud	Agencia	Tipo	Cuenca
Coruña	Coruña	43,37N	8,42W	AEMET	Manual	Galicia-Costa
Lourizán	Pontevedra	42,41N	8,66W	MeteoGalicia	Manual/Auto	Galicia-Costa
Lugo	Lugo	43,01N	7,55W	AEMET	Manual	Miño-Sil
Ourense	Ourense	42,33N	7,86W	AEMET	Manual	Miño-Sil
Santiago	Coruña	42,87N	8,55W	AEMET	Manual	Galicia-Costa

Estas estaciones proporcionan los datos de la precipitación diaria registrada desde 1987 hasta 2010 (datos obtenidos para este estudio a través de MeteoGalicia y AEMET).

Con estos datos de precipitación, se calcularán las medias de precipitación diaria para cada cuenca y se buscará el día de mayor precipitación dentro de cada uno de los episodios de inundación registrado en el CNIH. Se debe tener en cuenta que la media se calcula solo con las estaciones correspondientes a cada cuenca hidrográfica.

3.1.3 Ríos atmosféricos

Tanto para el estudio de los máximos de precipitación como para el estudio de cada periodo, se analiza el paso de ríos atmosféricos. Los datos de detección de ríos atmosféricos utilizados son aquellos proporcionados por el grupo de Física No Lineal de la Universidad de Santiago de Compostela. Estos datos han sido calculados basándose en el algoritmo de detección de Guan [Guan y Waliser, 2015].

El conjunto de datos primarios utilizados pertenecen al reanálisis del centro europeo, ECMWF, ERA-Interim [Dee et al., 2011] que nos proporciona datos cada seis horas con una resolución de 1,5°x1,5° para todo el globo.

Respecto al algoritmo de detección del AR, decir que se basa en el análisis de la columna de vapor de agua integrado (IWV) y en el estudio de los campos integrados de transporte de vapor de agua (IVT).

El IVT (ecuación 1) depende de la humedad específica y de los campos de viento en 17 niveles de presión entre 1000 y 300 hPa (ambos incluidos) mientras que, el IWV (ecuación 2) depende solamente de la humedad específica.

$$IVT = \left| \frac{1}{g} \int_{P_0}^{P_f} q \cdot \vec{u} \cdot dp \right| \quad (1)$$

$$IWV = \frac{1}{g} \int_{P_0}^{P_f} q \cdot dp \quad (2)$$

3.1.4 Datos de Presión

Para calcular los tipos de tiempo, se han tomado los datos de presión a nivel del mar procedentes del reanálisis de la NOAA NCEP/NCAR.

Este reanálisis es un trabajo conjunto entre Los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, antes conocido como NMC) y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). El objetivo de dicho conjunto es producir nuevos análisis atmosféricos a partir de datos históricos (1948 en adelante) y así reproducir el análisis del estado de la atmósfera (Climate Data Assimilation System, CDAS). El Reanálisis de NCEP/NCAR utiliza un sistema de análisis/pronóstico para llevar a cabo la asimilación de los datos del pasado a partir de 1948 hasta la actualidad [Kalnay et al., 1996].

Para nuestro estudio tomaremos los datos de presión a nivel del mar con una escala temporal diaria y una escala espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$. El periodo de análisis considerado va desde enero de 1979 hasta diciembre de 2010 y el dominio considerado abarca desde $[25^{\circ}\text{N a } 65^{\circ}\text{N}]$, $[35^{\circ}\text{W a } 30^{\circ}\text{E}]$.

3.1.5 Mapas de geopotencial a 500hPa, presión a nivel del mar y precipitación

Además de los datos en superficie para el cálculo de tipos de tiempo, se utilizaron también los mapas de geopotencial a 500hPa, presión a nivel del mar y precipitación recogidos en la página del Wetterzentrale (<http://www.wetterzentrale.de/>). Estos mapas pertenecen al NCEP Climate Forecast System Reanalysis que se inicia en el año 1979. Estos mapas se usan para el análisis pormenorizado de episodios de inundaciones concretos.

3.2 Métodos

3.2.1 Cálculo de los máximos de precipitación

El procedimiento seguido para calcular el día de máxima precipitación dentro de un periodo de inundación es el siguiente:

el 16 de octubre. Los datos de precipitación registrados en las estaciones de dicha cuenca fueron los siguientes (ver Tabla 3.4):

Tabla 3.4 *Datos de precipitación diaria en mm para el primer episodio de inundación detectado en la cuenca hidrográfica Galicia-Costa.*

Fecha	A Coruña	Lourizán	Santiago
13-10-1987	24,9	41,6	106,5
14-10-1987	42,2	106,7	137,9
15-10-1987	13,8	39,8	43,4
16-10-1987	8,9	3,4	13,5

Para observar el día de máxima precipitación, se realiza un gráfica, Figura 3.1, con la cantidad de precipitación media, obteniendo en este caso que el día que registra el máximo de precipitación en nuestras estaciones es el 14 de octubre.

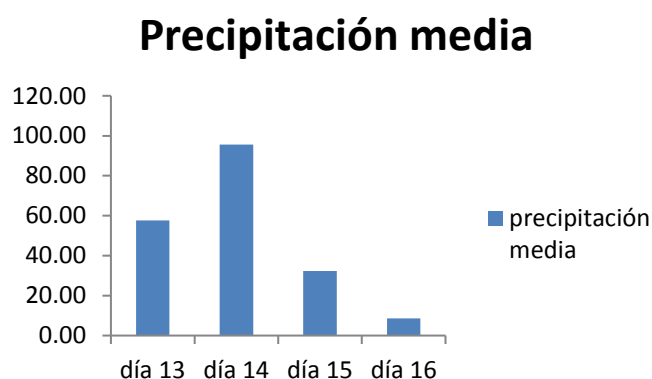


Figura 3.1, *Gráfica de la precipitación media diaria de un episodio de inundación.*

3.2.2 Cálculo de patrones sinópticos

Para el cálculo de los patrones sinópticos o WT se adoptó el método desarrollado en Trigo y DaCamara en el año 2000 que recoge 16 puntos de cuadrícula que conforman una malla (Figura 3.2) centrada sobre la región de estudio. Este método es a su vez una adaptación de los métodos de Jenkinson y Collison (1977) y Jones et al. (1993).

Los diferentes tipos de tiempo se obtienen a través del cálculo de una serie de índices: flujo del sur (SF), flujo del oeste (WF), flujo total (F), vorticidad por cizalladura del sur (ZS), vorticidad por cizalladura del oeste (ZW), y vorticidad de cizalla total (Z). Estos índices se calculan a través de las siguientes expresiones recogidas en el artículo Lorenzo et al., 2008:

$$SF = 1.350 [0.25 (p_5 + 2 p_9 + p_{13}) - 0.25 (p_4 + 2p_8 + p_{12})]$$

$$WF = [0.5 (p_{12} + p_{13}) - 0.5 (p_4 + p_5)]$$

$$ZS = 0.85 [0.25 (p_6 + 2 p_{10} + p_{14}) - 0.25 (p_5 + 2 p_9 + p_{13}) - 0.25 (p_4 + 2p_8 + p_{12}) + 0.25 (p_3 + 2p_7 + p_{11})]$$

$$ZW = 1.12 [0.5 (p_{15} + p_{16}) - 0.5 (p_8 + p_9)] - 0.91 [0.5 (p_8 + p_9) - 0.5 (p_1 + p_2)]$$

$$F = (SF^2 + WF^2)^{1/2}$$

$$Z = ZS + ZW$$

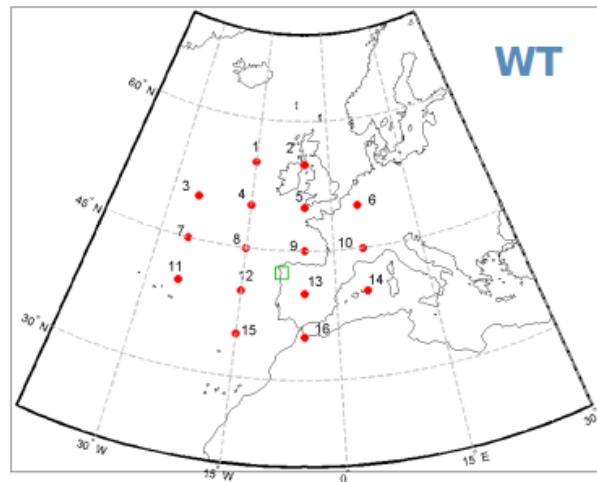


Figura 3.2, Malla de puntos utilizada para el cálculo de los patrones sinópticos.

Las condiciones que definen los distintos tipos de circulación son:

1. El sentido de flujo viene dado por la expresión $\arctan(WF/SF)$ que en el caso de que WF sea positivo, se añaden 180° aunque la dirección apropiada sea de 45° por sector utilizando el compás de ocho puntos.
2. Si $|Z| < F$, el flujo es esencialmente recto y se considera como un tipo direccional puro (ocho casos diferentes, de acuerdo con las direcciones de la compás).
3. Si $|Z| > 2F$ y $Z > 0$ se considera un tipo ciclónico puro y si $Z < 0$ se considera anticiclónico puro.
4. Si $F < |Z| < 2F$, el flujo se considera tipo híbrido y se caracteriza por lo tanto en la dirección y la circulación. serían 8 tipos multiplicados por 2 (16 tipos).

Según estas reglas habría 26 tipos de tiempo diferentes de los cuales 10 tipos son puros (NE, E, SE, S, SW, W, NW, N, C y A) y 16 son híbridos entre un tipo de flujo puro y

una situación ciclónica o anticiclónica (8 para C y 8 para A). Sin embargo, en este trabajo solo se han considerado aquellos que tienen una frecuencia de aparición superior al 3% en cada uno de los periodos de estudio considerados (verano, abril-septiembre, e invierno, octubre-marzo).

Como resultado del filtrado se consideran un total de 14 WT (Figura 3.3), (9 WT para invierno y 12 WT para verano): los 10 direccionales puros ya mencionados y 4 híbridos (ANE, AW, ASW y ANW).

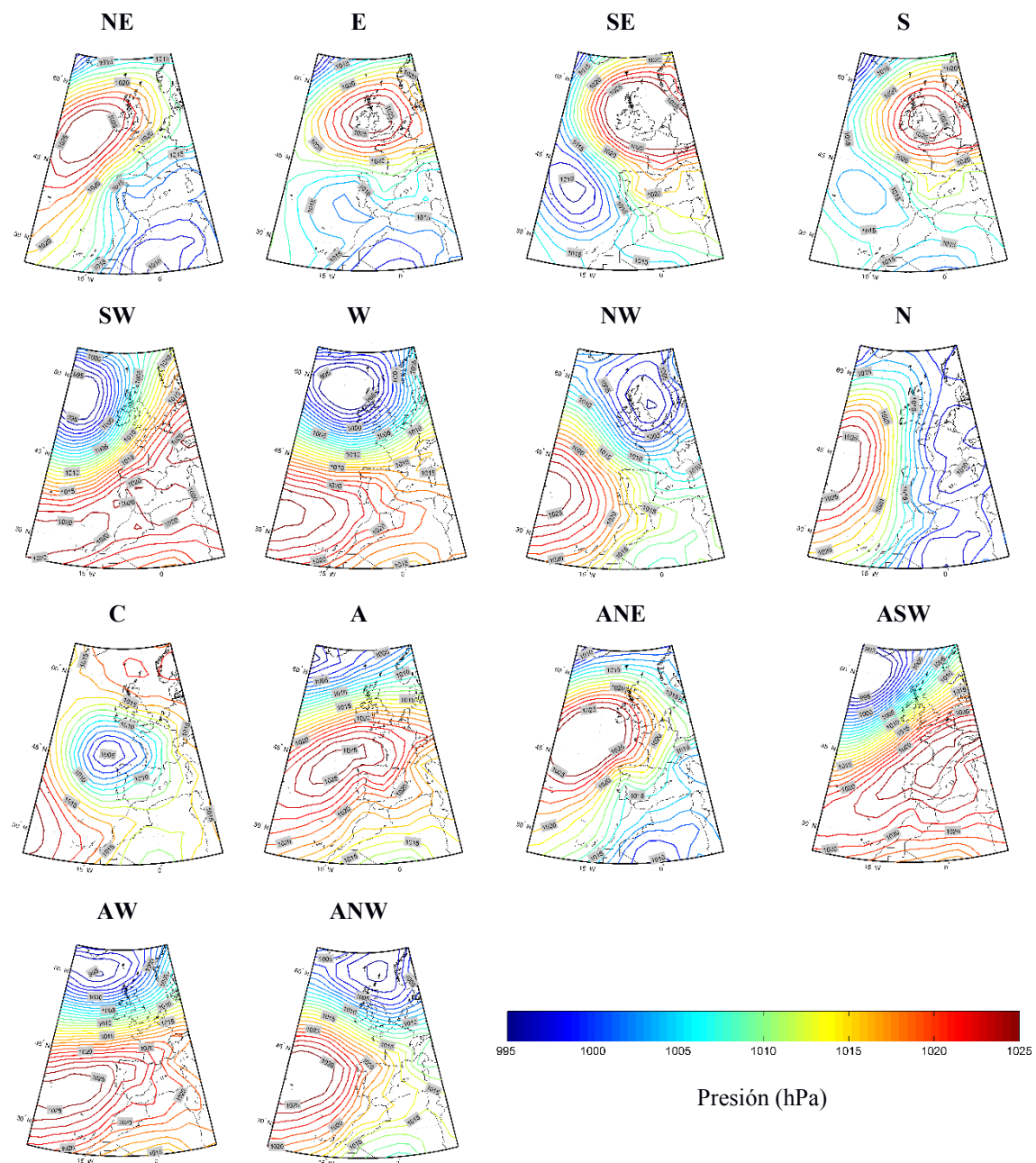


Figura 3.3, *Campo promedio de presión a nivel del mar para cada uno de los patrones sinóticos con una frecuencia de aparición superior al 3%.*

4. Resultados

A continuación procedemos a presentar los resultados obtenidos. El estudio se ha hecho primeramente analizando la relación entre los distintos periodos de inundaciones y la presencia o no de ríos atmosféricos asociada a diferentes tipos de tiempo o WT, posteriormente se escogieron las cinco inundaciones más relevantes del catálogo de inundaciones y se analizó en más profundidad la situación atmosférica de cada una.

4.1 Caracterización de las inundaciones

Dadas las diferentes características de la lluvia en invierno y en verano de nuestra región de estudio, se ha dividido el año en dos periodos estacionales diferenciados. Por un lado se ha considerado el invierno extendido de octubre a marzo (ambos incluidos) y por otro el periodo de verano extendido que va desde abril a septiembre (ambos incluidos).

Además, como ya se mencionó, solo se han considerado únicamente aquellos WT que posean una frecuencia de aparición superior al 3% en cada una de las estaciones consideradas por separado.

Para cada estación, se ha estudiado también la conexión entre los ARs y las inundaciones a través de dos análisis:

1. En relación a los patrones sinópticos y la presencia de ríos atmosféricos.
2. Analizando los campos de presión a nivel del mar (SLP), de IVT y de IWV a través de mapas de anomalías, en función de la detección o no de ARs e inundaciones.

4.1.1 Relación con patrones sinópticos y ríos atmosféricos

4.1.1.1 Invierno extendido

En el estudio de las inundaciones y su relación con los patrones sinópticos o WT, la Figura 4.1 muestra la frecuencia de aparición de los diferentes WT, que ocurren de forma significativa durante el invierno, para los eventos de inundación distinguiendo entre si se detecta o no un AR. El estudio se hace para cada una de las cuencas hidrográficas consideradas.

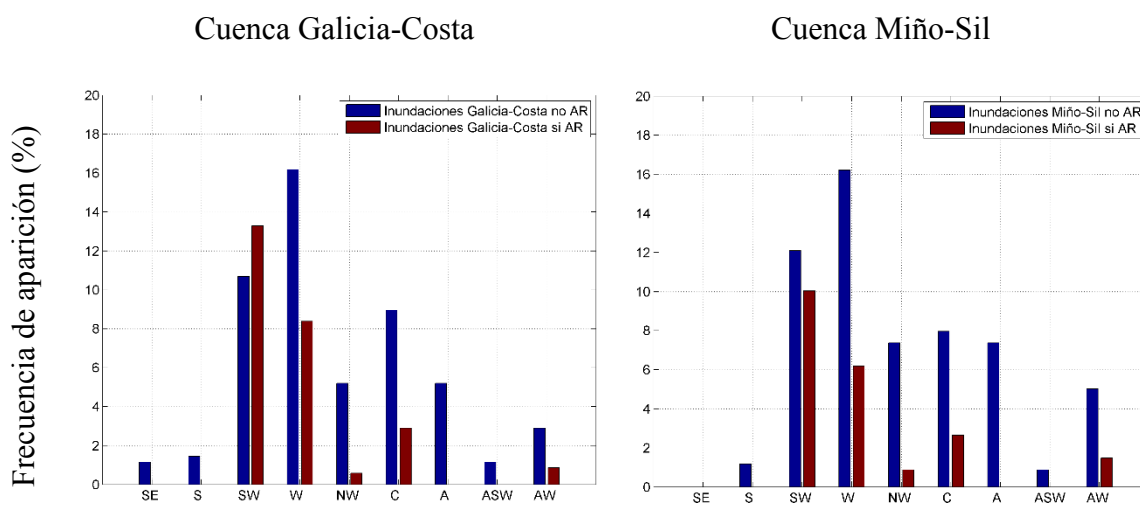


Figura 4.1, Frecuencia de aparición de cada WT durante los eventos de inundación del invierno con y sin AR para las dos cuencas hidrográficas.

Las barras de color rojo representan aquellas inundaciones asociadas a un determinado tipo de WT en las cuales además se ha detectado la presencia de un río atmosférico. Por contra, las barras azules, corresponde a aquellos episodios de inundación en los que no se detectó la presencia de un AR.

Para ambas cuencas hidrográficas, la mayoría de inundaciones tienen lugar con situaciones sinópticas que presentan o bien una situación ciclónica o flujo de oeste, W, SW, NW AW y C, aunque también se detectan inundaciones en algunas situaciones de tipo anticiclónico. En este último caso el origen de las inundaciones posiblemente sea tormentoso. La presencia asociada a estos eventos de ARs como se puede ver no siempre aparece pero cuando se observa siempre está asociado a situaciones con flujo de oeste o ciclónicas. Estos tipos de tiempo se caracterizan por estar asociados a precipitaciones entre moderadas y fuertes en Galicia [Lorenzo et al., 2008].

El WT de SW, conocido también como advección del suroeste, es un patrón sinóptico que se caracteriza por la presencia de una depresión al oeste de las islas británicas, que propicia la presencia de frentes en la costa occidental ibérica. Los vientos, que trae esta situación sinóptica, procedentes del océano son cálidos y húmedos por lo que favorece la presencia de lluvias. Un estudio que relacionó la precipitación con cada WT en Galicia [Lorenzo et al., 2008] lo muestra como un WT cuyo máximo de precipitación se presenta durante el invierno y que además, al igual que los tipos de W y C, es uno de los WT que producen los mayores eventos de precipitación en la comunidad gallega seguidos de los tipos de NW y S.

Respecto al tipo W (Figura 3.3), tiene un comportamiento muy similar al SW aunque su asociación con detección de ARs es menor que en los SW (Figura 4.1). Este WT se caracteriza por la presencia de una depresión sobre el Atlántico Norte y un anticiclón sobre las Azores. En el estudio de Lorenzo et al., 2008 también se mostró que el máximo de precipitación de este WT se sitúa en los meses de invierno.

El patrón de NW o advección del noroeste, es responsable de que en invierno entre aire marítimo polar por Galicia [Lorenzo et al., 2008]. Suele venir acompañado por frentes fríos. En la Figura 3.3, se puede ver que este patrón se caracteriza por un anticiclón sobre las Azores y una depresión sobre las islas británicas.

Por último el tipo C (ciclónico), es uno de los patrones que mayores eventos de precipitación proporciona. Tiene un máximo de precipitación en primavera y otro secundario en otoño [Lorenzo et al., 2008]. Se caracteriza por la presencia de una depresión sobre el noroeste peninsular (Figura 3.3).

Todas estas situaciones se encuentran asociadas a la presencia de depresiones más o menos profundas lo que propicia la llegada de frentes a la costa gallega. De todos estos tipos, es de destacar el caso del patrón SW, que registra una alta frecuencia de aparición en eventos de inundaciones tanto si se detecta un evento AR como si no se detecta. En el caso de las situaciones de NW, la presencia de esta situación junto con AR es bastante menor que en el resto de situaciones al igual que se observa en la situación híbrida AW.

Con los datos registrados en las estaciones sinópticas de la Tabla 3.3 se ha estimado la precipitación producida, para cada tipo de WT en cada cuenca, distinguiendo si hay presencia o no de AR (Figura 4.2). La visualización de esta precipitación se hizo a

través de cálculo de la ratio entre la precipitación registrada en los eventos de inundación con y sin ARs y la precipitación característica de cada uno de los WT durante el invierno.

En general, se observa que la cantidad de precipitación producida en los eventos de inundación que cuentan con la presencia de un AR puede duplicarse con respecto a los eventos de inundación en los que no se detecta un AR.

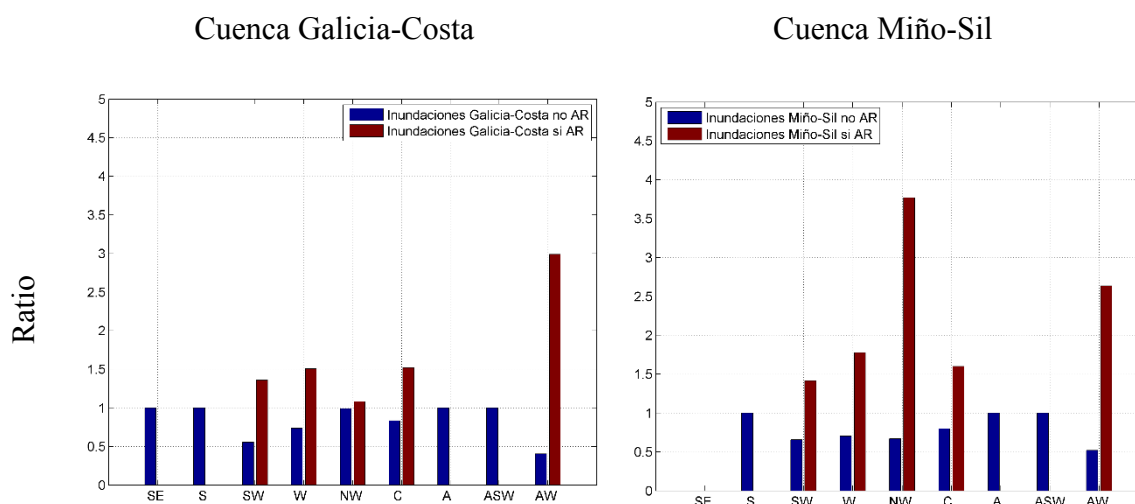


Figura 4.2, *Precipitación asociada a cada WT con eventos de inundación y que coincide o no con un AR en el invierno extendido para ambas cuencas normalizada en función de la precipitación asociada a cada WT en el invierno.*

Analizando ambas cuencas, se ha observado que los WT asociados a una mayor precipitación cuando se detecta un AR corresponden a los tipos: SW, W, NW, C y AW. Sin embargo, la intensidad de esta precipitación difiere según la cuenca considerada.

En el caso de la cuenca de Galicia-Costa (Figura 4.2), es especialmente notable el caso de la situación AW que corresponde a un tipo de WT híbrido entre una situación de advección del W y una anticiclónica. En este WT es especialmente destacable el papel de los ARs en la inundación ya que la precipitación cuando hay detección de un AR se multiplica por 6 con respecto a la situación en la que no se detecta un AR.

En el caso de la cuenca Miño-Sil, es el tipo sinóptico de NW el que se ve más afectado por la presencia o no de un AR.

Para los tipos restantes (SW, W, C y NW en el caso de Galicia-Costa y S, W, C y AW en el caso de la cuenca Miño-Sil) la precipitación también aumenta considerablemente en presencia de ARs aunque con menor intensidad.

Estos resultados nos muestran que en el caso del invierno, la presencia de AR aumenta de forma considerable la presencia de precipitaciones intensas, agravando los efectos de las inundaciones.

4.1.1.2 Verano extendido

Para el caso del verano, también se han analizado las inundaciones en función del tipo de WT y de la presencia o no de AR (Figura 4.3).

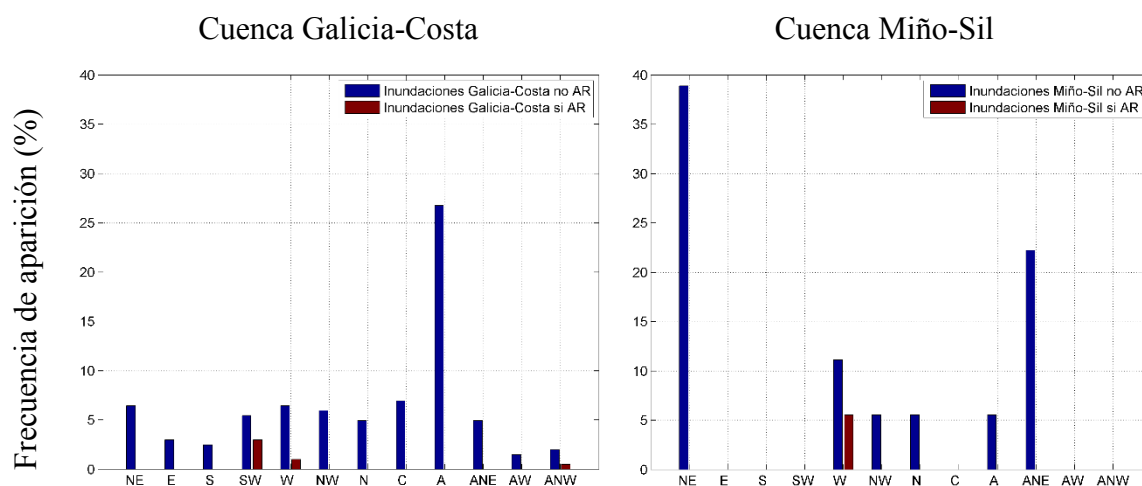


Figura 4.3, Frecuencia de aparición de cada WT durante los eventos de inundación del verano con y sin AR para las dos cuencas hidrográficas.

En este caso, se puede observar, de manera general, que los eventos de inundación están asociados principalmente con condiciones de flujo este y anticiclónicas (NE, A, ANE) que por regla general bloquean el paso de los AR. Dado que analizamos el verano extendido que va de abril a septiembre, también se detecta alguna situación de inundación debida a situaciones de W y SW, posiblemente ocurridas en abril o septiembre. Cuando se analizan las cuencas por separado, el WT que predomina es diferente en cada caso.

Para la cuenca de Miño-Sil tan solo se detecta presencia de AR e inundación en las situaciones de W. El resto de tipos que han registrado eventos de inundación se encuentran asociados a situaciones con flujos de este o tipos anticiclónicos lo que dado el periodo del año, probablemente se encontrarán asociados a precipitaciones convectivas causantes de inundación. Ninguno de estos tipos (NE, A, ANE, N) se caracterizan por ser situaciones de precipitación intensa, salvo en situaciones tormentosas [Lorenzo et al., 2008].

Para la cuenca de Galicia-Costa tan solo se detecta presencia de AR e inundación en las situaciones de SW y W. El resto de tipos que han registrado eventos de inundación se

encuentran asociados al igual que ocurría en la cuenca Miño-Sil a situaciones con flujos de este o tipos anticiclónicos cuya precipitación suele tener un origen convectivo.

En Galicia-Costa, se observa que a pesar de que las situaciones más dominantes sean las anticiclónicas (Figura 4.3), la precipitación asociada es mayor en los WTs de SW y ANW cuando van asociados a la presencia de ARs (Figura 4.4) en el resto de situaciones o tipos no se detectan ARs en las inundaciones de esta época del año lo que hace que la ratio sea igual a uno.

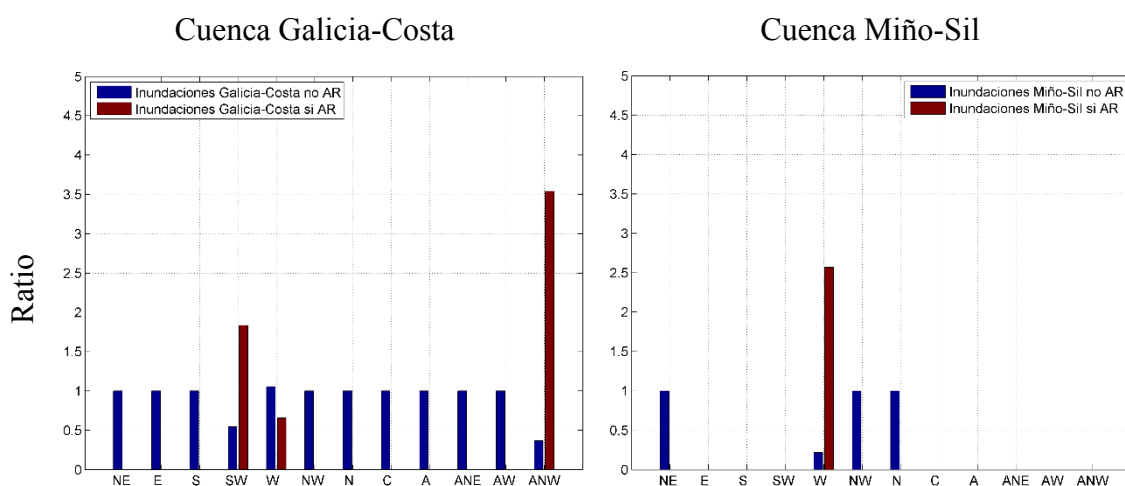


Figura 4.4, *Precipitación asociada a cada WT con eventos de inundación y que coincide o no con un AR en el verano extendido para ambas cuencas normalizada en función de la precipitación asociada a cada WT en el verano.*

En la cuenca del Miño-Sil, la situación general es parecida debido a que las situaciones anticiclónicas no cuentan con la presencia de ARs y la precipitación suele ir asociada a situaciones tormentosas. En las situaciones ciclónicas, la precipitación en las situaciones de W se incrementa de manera notable cuando hay detección de ARs (Figura 4.4).

Como podemos concluir de las Figuras 4.3 y 4.4, en verano dominan en ambas cuencas las situaciones de tipo anticiclónico y de advección del este como A, ANE o NE. La presencia de inundaciones en estos casos es motivada en su mayor parte a precipitaciones convectivas fruto de tormentas intensas y no por la llegada de ARs.

Dado que los periodos de inundación considerados en nuestro catálogo de inundaciones engloban días en los que no siempre se produce lluvia extrema, (esto es debido a que después de uno o dos días de lluvia extrema pueden mantenerse activos eventos de inundaciones con lluvias de intensidad normal), se ha estudiado la relación entre inundaciones y la presencia de ARs considerando el día con mayor precipitación de cada evento de inundación. El resultado para la cuenca de Galicia-Costa es que en 16 de los 23 eventos de inundación el día de máxima precipitación coincide con la detección

de un AR sobre Galicia (Tabla 4.1) es decir en el 70% de los casos de inundación se observa la presencia de ARs. En la cuenca del Miño-Sil en 7 de los 17 eventos de inundación considerados se detectan ARs (41%) (Ver Tabla 4.2). Si nos restringimos al periodo del invierno el porcentaje es del 79% en la cuenca de Galicia-Costa y el 54% en la cuenca Miño-Sil. Esto refuerza el papel de la presencia de ARs en los eventos de inundación sobre todo en invierno y en la cuenca costera ya que en el interior muchos eventos de precipitación extrema tienen un origen convectivo en lugar de frontal.

Tabla 4.1, *Los eventos de inundación más importantes para Galicia-Costa*

Episodio	Día máx prec	Prec.máx	AR	WT
13/10/87-16/10/87	14/10/87	286,8	1	W
19/12/89-21/12/89	19/12/89	253,7	1	SW
07/09/99-09/03/99	08/03/99	253,6	1	C
20/10/00-10/01/01	06/12/00	202,8	1	SW
02/10/06-25/10/06	21/10/06	189,1	1	SW
11/11/02-31/12/02	12/11/02	185	0	W
13/11/09-29/12/09	05/12/09	182,1	1	SW
21/02/10-01/03/10	21/02/10	181,2	1	CW
19/10/01-23/10/01	21/10/01	179,9	1	SW
03/10/10-09/10/10	08/10/10	160	0	S
21/12/95-23/01/96	23/12/95	156,9	1	W
05/01/88-05/01/88	05/01/88	145,9	1	CSW
18/11/06-07/12/06	27/11/06	139,2	1	SW
19/03/01-24/03/01	20/03/01	105,2	1	CSW
24/04/00-25/05/00	24/04/00	103,9	1	CSW
28/10/05-02/11/05	29/10/05	103	1	SW
12/01/10-23/01/10	22/01/10	88,2	0	W
10/11/97-13/11/97	10/11/97	83	1	W
30/04/98-01/05/98	30/04/98	66	0	N
09/06/10-11/06/10	10/06/10	63,6	0	C
04/04/04-08/09/04	04/09/04	62,6	0	ANE
06/11/94-06/11/94	06/11/94	41,7	0	CSW
23/01/09-25/01/09	24/01/09	40,8	1	W
15/06/88-21/06/88	15/06/88	27,9	0	NE

Tabla 4.2, *Los eventos de inundación más importantes para Miño-Sil*

Episodio	Día máx prec	Prec.máxima	AR	WT
14/10/87-16/10/87	15/10/87	95,4	1	C
31/12/94-01/01/95	31/12/94	88,7	1	NW
12/12/89-24/12/89	16/12/89	69,2	1	CSW
01/01/94-17/01/94	05/01/94	68,1	1	W
24/12/95-02/01/96	30/12/95	66,6	0	CSW
01/11/96-30/11/96	22/11/96	60,2	0	W
10/01/91-12/01/91	10/01/91	58,4	1	W
14/12/99-16/12/99	14/12/99	56,8	1	CNW
06/01/96-13/01/96	06/01/96	50,2	0	CSW
15/06/88-21/06/88	15/06/88	46,4	0	NE
30/10/00-31/03/01	21/11/00	36,5	1	W
05/12/00-13/12/00	07/12/00	29,9	0	CSW
30/04/98-04/05/98	30/04/98	26,6	0	N
01/11/02-31/12/02	20/11/02	24,7	0	SW
01/12/03-31/12/03	09/12/03	12,6	0	C
	27/12/03	12,6	1	C

4.1.2 Relación con SLP, IVT e IWV

A continuación pasaremos a mostrar los resultados de los mapas de anomalías de SLP, IVT e IWV para los casos de inundación y detección de AR en Galicia con sus diferentes casuísticas. En este estudio englobaremos todos los casos de inundación sin hacer distinción entre cuencas.

En la Figura 4.5 se muestran los mapas de anomalías de presión a nivel del mar para el área del Atlántico Norte. Se han considerado para cada estación, invierno y verano, las cuatro posibles situaciones que se pueden dar si combinamos la ocurrencia o no de inundación con la presencia o no de un AR.

En invierno, cuando se detecta un AR en la costa de Galicia, normalmente Galicia se encuentra entre la acción de un centro de altas presiones al sur de la Península, y un centro de bajas presiones sobre las islas británicas. Cuando además de AR, se detecta un evento de inundación, se observa que el centro de bajas presiones es más profundo y ligeramente desplazado hacia el sur de las islas británicas. Cuando ocurren eventos de

inundación, sin presencia de AR, se observa que ambos centros de acción se encuentran desplazados hacia el oeste y presenta una menor intensidad que en el caso de presencia de AR. Finalmente, en el caso en el que no se detecta AR y no ocurre inundación la península se ve bajo la influencia de un anticiclón que desplaza el paso de frentes hacia las islas británicas.

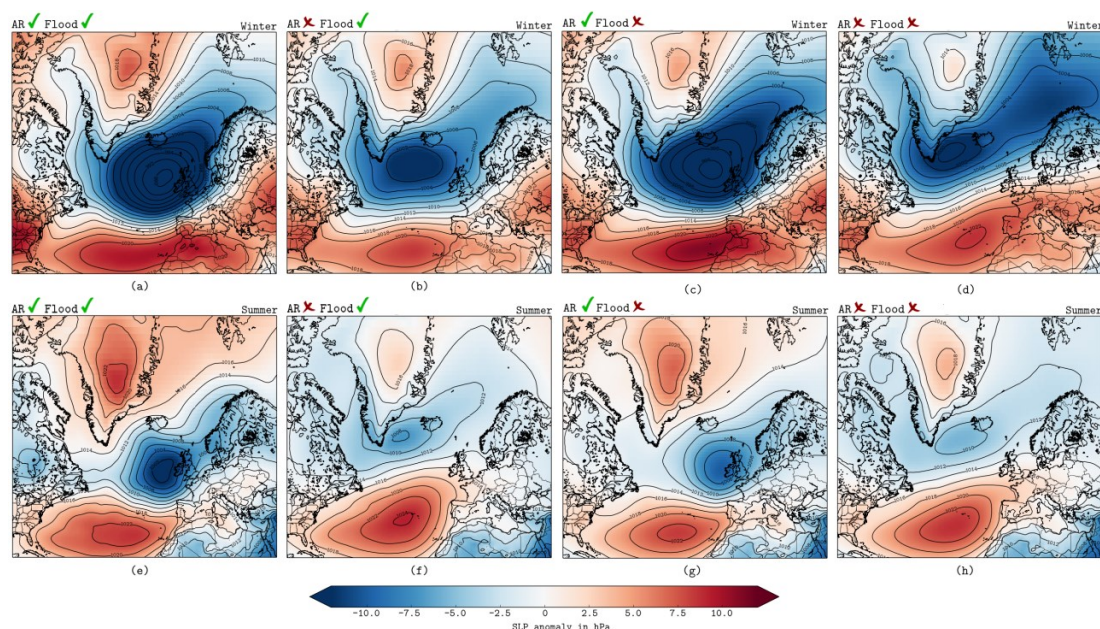


Figura 4.5, Mapas de anomalías de SLP para los meses de invierno y verano extendidos a lo largo del período 1979-2010, dependiendo de si se han detectado o no tanto ARs como episodios de inundación.

Durante el verano, la situación es similar a la de los meses de invierno. En los episodios de detección de AR de nuevo se observa a Galicia entre la influencia de un centro de bajas presiones situado al sur de las islas británicas y un anticiclón en el sur de la península Ibérica. No obstante en esta estación las anomalías son mucho más suaves que las observadas en invierno. Por el contrario, las situaciones de inundación sin presencia de ARs, parecen estar inducidas por situaciones de precipitación convectiva ya que la región de estudio se ve influenciada por un centro de altas presiones situado en las Azores. Esto es compatible con las conclusiones sacadas del estudio de inundaciones y WT hecho para el verano en la sección 4.1.1.

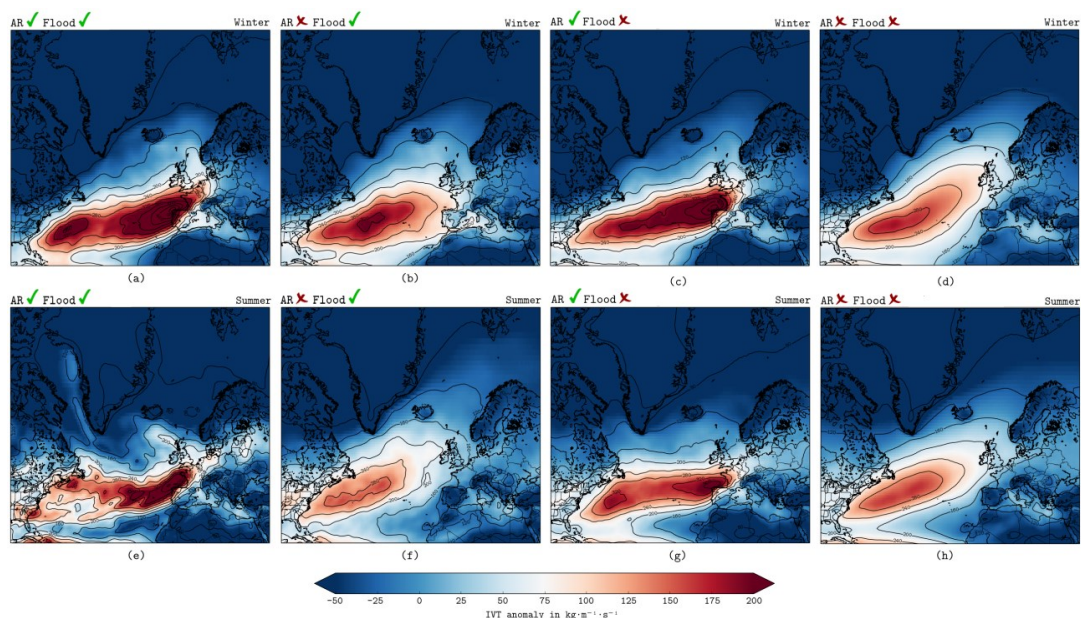


Figura 4.6, Mapas de anomalías de IVT para los meses de invierno y verano extendidos a lo largo del período 1979-2010, dependiendo de si se han detectado o no tanto ARs como episodios de inundación.

Los mapas de anomalías del transporte de humedad o lo que es lo mismo del campo de IVT (Figura 4.6) siguen el mismo esquema que los de SLP. Se observa que en los casos en que se detecta un AR alcanzando Galicia, una intenso transporte de humedad tiene lugar a lo largo del Atlántico entre el mar de los Sargazos, situado frente a la península de Florida, y Galicia. Este transporte de humedad es mayor cuando además de detectarse un AR tiene lugar un episodio de inundación. En los casos en los que no se detecta un AR, el intenso transporte de humedad no alcanza Galicia. Finalmente cuando no se observa ni AR ni inundación en la región de estudio, el transporte de humedad se desplaza hacia latitudes superiores, probablemente debido al bloqueo del Anticiclón observado en la Figura 4.5. El comportamiento de las anomalías de IVT en los meses de verano, es muy similar aunque en este caso la intensidad del transporte es menor.

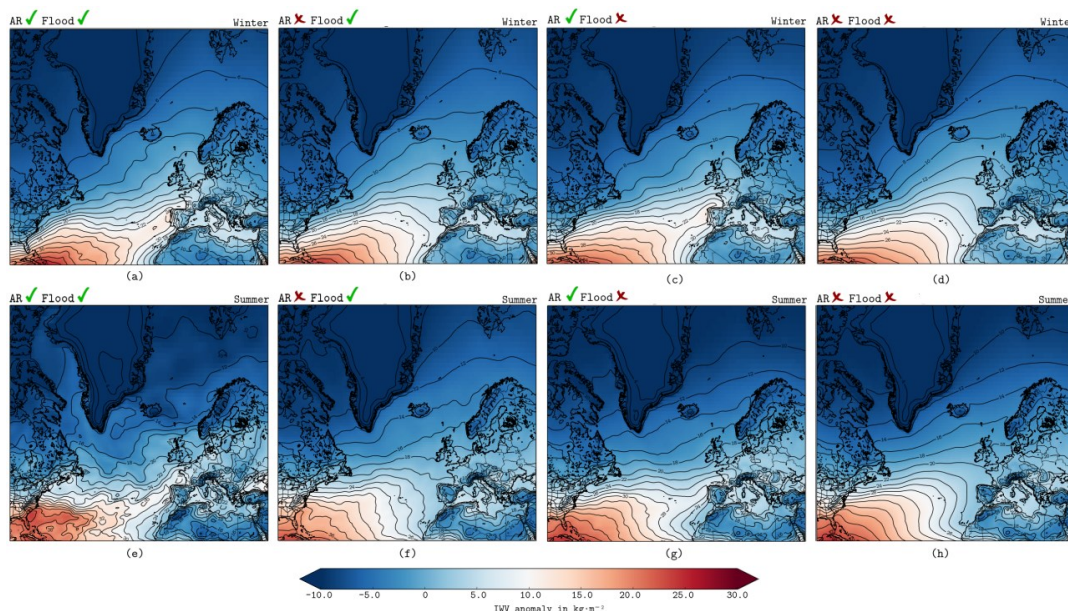


Figura 4.7, Mapas de anomalías de IWV para los meses de invierno y verano extendidos a lo largo del período 1979-2010, dependiendo de si se han detectado o no tanto ARs como episodios de inundación.

Los mapas de anomalías del vapor de agua a través de toda la columna atmosférica o IWV (Figura 4.7) son análogos a los de SLP e IVT. Los resultados muestran que tanto para el verano como el invierno, se observan anomalías más pronunciadas de IWV en Galicia al detectarse el AR. También se observa que las inundaciones se asocian con perturbaciones de los campos de IWV. Las conclusiones son análogas a las obtenidas en el IVT; sin embargo son mucho menos pronunciadas ya que los campos de IWV son mucho más estables que los campos de IVT. Además, un AR implica una perturbación en los campos de IWV mucho más espaciada que en el caso de IVT, y por lo tanto la huella que deja en el compuesto climático es mucho menor.

4.2 Las 5 mayores inundaciones del periodo 1979-2010

Dentro de todos los episodios de inundaciones del periodo comprendido entre 1979-2010, se han escogido las 5 inundaciones con un mayor registro de precipitación (Tabla 4.3).

La Tabla 4.3, presenta las cinco inundaciones históricas con mayor cantidad de precipitación asociada. Como se puede ver en dicha tabla en todos los episodios se detectó la presencia de un AR en el día de máxima precipitación. El valor Prec.

corresponde a la precipitación registrada en el día de precipitación máxima en las estaciones de la cuenca y WT hace referencia a la situación sinóptica presente en el día de máxima precipitación registrada durante el evento de inundación. Estas inundaciones corresponden a la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa y todas ocurrieron durante el periodo invernal (de octubre a marzo).

Tabla 4.3, *Inundaciones con mayor cantidad de precipitación registrada en el periodo 1979-2010 de las cuencas Galicia-Costa y Miño-Sil.*

Episodio	Día de máx Prec.	Prec. (mm)	AR	WT
13/10/87-16/10/87	14/10/87	286,8	1	W
19/12/89-21/12/89	19/12/89	253,7	1	SW
07/03/99-09/03/99	08/03/99	253,6	1	C
20/10/00-10/01/01	06/12/00	202,8	1	SW
02/10/06-25/10/06	21/10/06	189,1	1	SW

La mayoría de las estaciones usadas en los registros de precipitación fueron manuales. Cuando una estación es manual significa que la observación la realiza el propio observador que se encarga de registrar las distintas variables meteorológicas como la precipitación, temperatura por lo que debido a la dependencia humana que poseen se pueden generar lagunas de observaciones. Otro factor a tener en cuenta con las estaciones manuales, es el hecho de que el observador puede recoger datos desde las 6 de la mañana de un día hasta las 6 de la mañana del día siguiente y debido a eso puede ocurrir que la inundación pudiera haberse producido al día siguiente y no en la fecha registrada por el observador.

4.2.1 Invierno de 1987

El periodo de esta inundación comprende desde el 13 al 16 de octubre para la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa. A pesar de que hubo otro episodio de inundación casi en la misma fecha en la cuenca hidrográfica Miño-Sil, la inundación de Galicia-Costa presentó mayores valores de precipitación.

Una de las regiones más afectada por esta inundación perteneciente a la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa fue la ciudad de Santiago de Compostela que aportó los mayores datos de precipitación de aproximadamente 301 mm durante los cuatro días de inundación que duró el evento. Según los datos de la AEMET la estación del aeropuerto de Santiago en Lavacolla registró 218 mm el 14 de octubre de 1987. Un valor que, según la tabla de periodos de retorno, ocurre, en promedio, menos de una vez cada 100 años. La razón de este episodio fue debida a la situación ocurrida entre los día 14 y 15

de octubre en los que una borrasca infiltrada en medio de una circulación zonal baja provocó una situación de intensas precipitaciones de carácter torrencial seguida de vientos huracanados [Guimerans Rodríguez, 2016].

El episodio analizado duró cuatro días. De estos, en tres días se tuvo situación de W y en uno de ellos situación C (Tabla 4.4). Ambos patrones sinópticos se encuentra fuertemente relacionados con eventos de precipitación intensa [Lorenzo et al., 2008].

Tabla 4.4, *Datos de la precipitación diaria (mm) para el periodo de inundación de 1987 de la cuenca hidrográfica Galicia-Costa.*

Día	AR	WT	A Coruña	Lourizán	Santiago
13/10/87	1	W	24,9	41,6	106,5
14/10/87	1	W	42,2	106,7	137,9
15/10/87	1	C	13,8	39,8	43,4
16/10/87	0	W	8,9	3,4	13,5

Analizando los resultados de las detecciones de ARs, de los registros proporcionados por el grupo de Física no Lineal de la USC se detectó la presencia de un AR a las 18h del día 13 y a las 0, 6, 12 y 18h del día 14 y 15. Las precipitaciones más intensas se registraron entre los días 14 y 15 de octubre (ver Tabla 4.4).

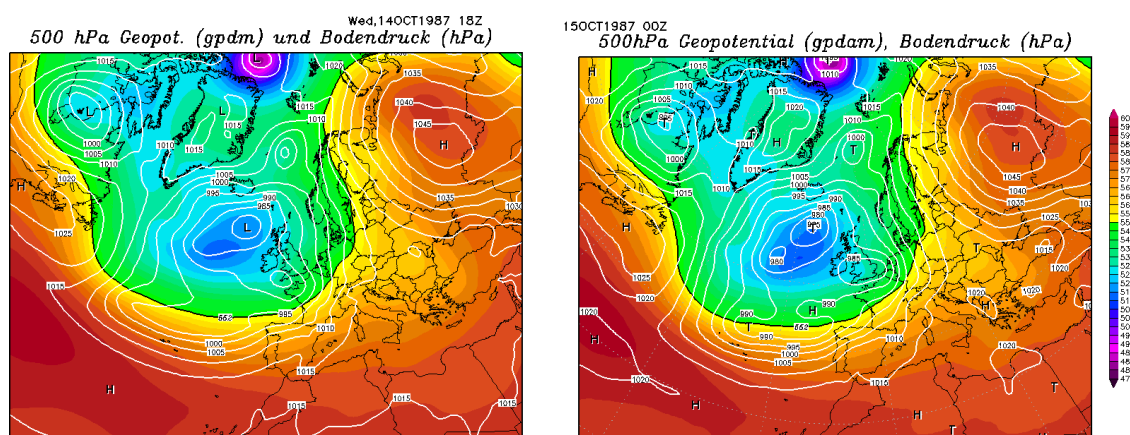


Figura 4.8, *Geopotencial a 500 hPa (gpdam), contornos de color y presión en superficie (hPa), isobaras de color blanco entre los días 14 y 15 de octubre.* Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

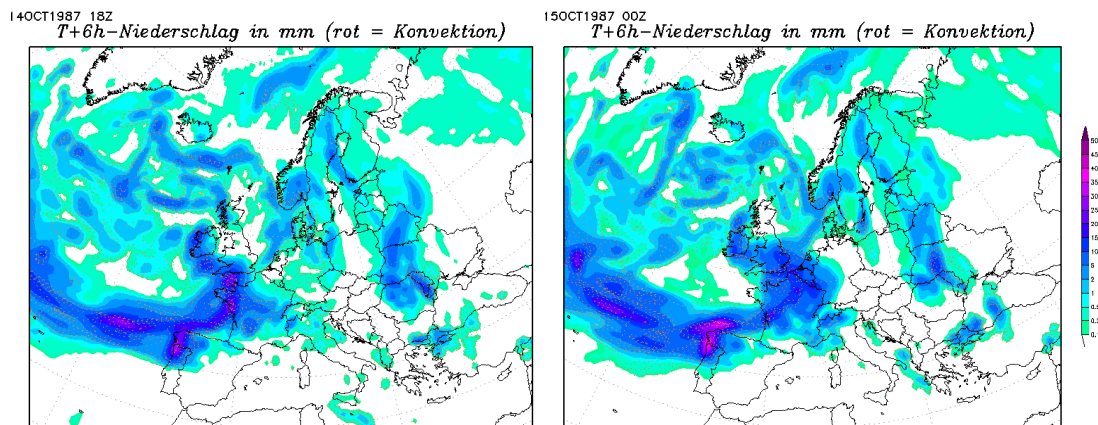


Figura 4.9, Precipitación (mm) asociada al paso de la borrasca entre los días 14 y 15 de octubre de 1987. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

Como se puede observar en la Figura 4.8, se produjo la entrada de un borrasca bastante profunda, 985 hPa, por el norte. Esta borrasca afecta a Galicia desplazando el Anticiclón de las Azores al suroeste y dejando Galicia bajo la influencia de vientos del oeste. Por otro lado, se puede observar que la región de estudio se encuentra dentro del mínimo de una vaguada (552 gpm) como indica la imagen del geopotencial en 500hPa.

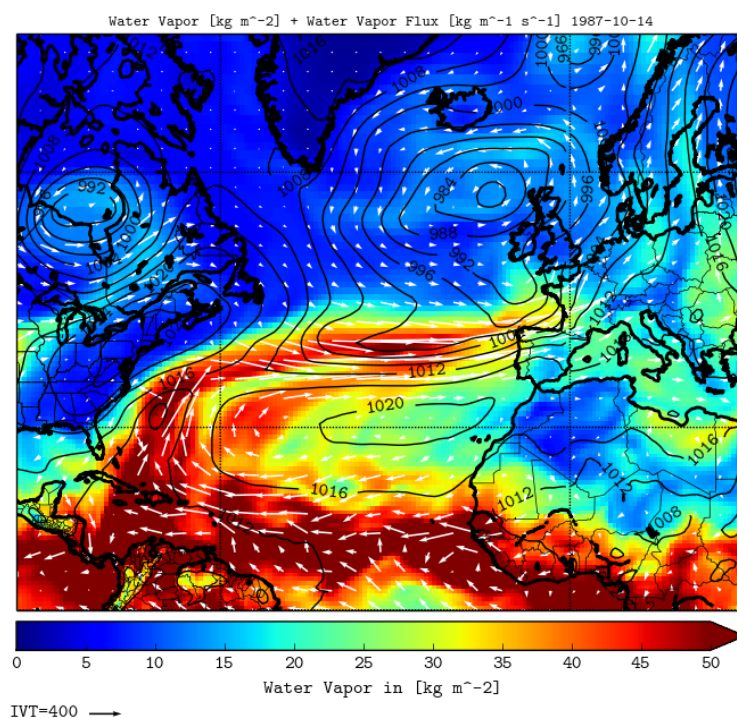


Figura 4.10, Columna de vapor de agua integrado, IWV , (kgm^{-2}), mapa de color, campos integrados de transporte de vapor, IVT , ($kg m^{-1}s^{-1}$), flechas blancas y presión en superficie (hPa), isobaras de color negro, para el día 14 de octubre de 1987.

En la Figura 4.9, se puede observar la precipitación asociada a esta borrasca con un máximo de precipitación sobre Galicia acompañando al frente. Esta imagen puede

darnos una idea de por donde se sitúa el AR. De hecho en la Figura 4.10 se puede ver el AR que afectó a la región a través de las variables IVW e IVT.

En estos días 14-15 de Octubre de 1987 las clases se suspendieron en toda Galicia, en la ciudad de Pontevedra faltó el fluido eléctrico gran parte de la jornada, numerosos árboles fueron arrancados de raíz en parques del centro de la ciudad por vientos con registro récord en el observatorio de Mourente de 115 km/h. Las fuertes precipitaciones desbordaron el río Lérez llevándose por delante la canalización de agua y la estación de bombeo. Pero lo más recordado de este episodio de octubre de 1987, son las inundaciones de las localidades de Padrón y Caldas de Reyes, por los desbordamientos del río Sar y Umia, respectivamente [Guimerans Rodríguez, 2016].

4.2.2 Invierno de 1989

El periodo de esta inundación comprende desde el 19 al 21 de diciembre para la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa.

Es un periodo caracterizado por precipitación intensa y bajo la influencia de WTs de SW, W y CW que son patrones fuertemente relacionados con eventos de precipitación intensa. En cuanto a la detección de ríos atmosféricos, destaca la detección de un AR los días 19 (desde las 12h) y 20. Por tanto, se considera que el paso del río atmosférico junto con la situación sinóptica presente pudo propiciar la inundación en la cuenca Galicia-Costa.

En cuanto al día de precipitación máxima (Tabla 4.5), esta se registró el día 19 en nuestras estaciones (A Coruña, Lourizán y Santiago). Junto con la detección de un AR y bajo la influencia de un patrón sinóptico del SW.

Tabla 4.5, Datos de la precipitación diaria (mm) para el periodo de inundación de 1989 de la cuenca hidrográfica Galicia-Costa.

Día	AR	WT	A Coruña	Lourizán	Santiago
12/12/89	1	SW	7,5	18,4	31,9
13/12/89	0	SW	3,7	9,1	27,6
14/12/89	1	SW	66,6	35,2	95,9
15/12/89	1	CSW	13,6	53,8	29
16/12/89	1	CSW	5,5	12,3	38,6
17/12/89	0	W	6	42,8	20,6
18/12/89	1	C	4,3	8,2	4,1
19/12/89	1	SW	32,9	100,6	120,2
20/12/89	1	SW	12,4	69,2	60,8
21/12/89	0	SW	13,2	30	26,4
22/12/89	0	W	23,8	5,8	6,3
23/12/89	0	ASW	0,4	0,6	0,4
24/12/89	0	SW	3,8	22,4	33

El tiempo observado durante esos días, se puede ver en el análisis del mapa de geopotencial en 500 hPa y presión en superficie (Figura 4.11) y en el mapa de precipitación asociada al paso de esa borrasca (Figura 4.12).

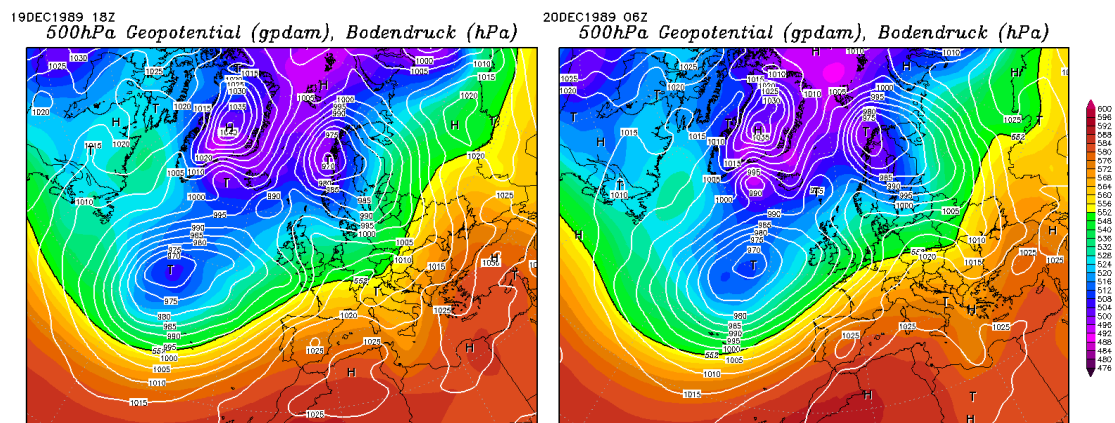


Figura 4.11, Geopotencial a 500 hPa (gpdam), contornos de color y presión en superficie (hPa), isobaras de color blanco. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

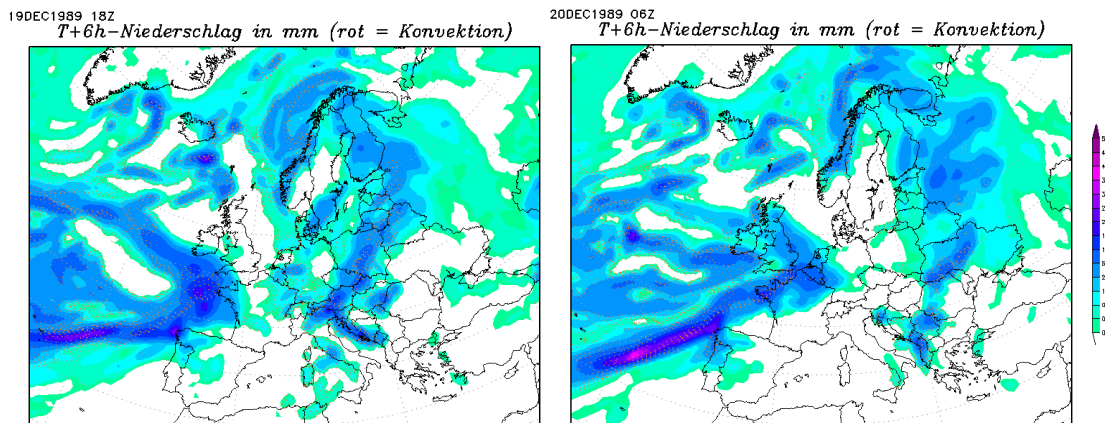


Figura 4.12, Precipitación (mm) asociada al paso de la borrasca sobre la cuenca de Galicia-Costa. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

En la Figura 4.11, se puede observar que Galicia se encuentra bajo la influencia de un mínimo asociado a una vaguada (556 gpdm) en 500hPa. Por otro lado, las líneas de presión en superficie muestran la entrada de una borrasca bastante profunda procedente del W de las islas británicas que deja a Galicia bajo la influencia de la advección del SW.

En la Figura 4.12, se puede observar que la costa gallega se ve afectada por un máximo de precipitación asociado al frente. Ese máximo forma una banda estrecha pudiendo indicar el paso del AR. La Figura 4.13 muestra la trayectoria del AR a través de las variables IVW e IVT.

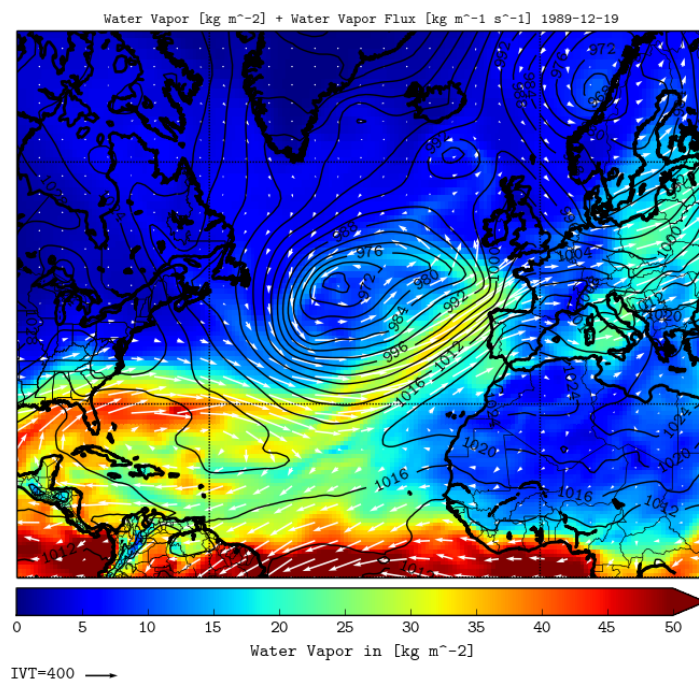


Figura 4.13, Columna de vapor de agua integrado , IWV, (kg m^{-2}), mapa de color; campos integrados de transporte de vapor, IVT, ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), flechas blancas y presión en superficie (hPa), isobaras de color negro, para el día 19 de diciembre de 1989.

El temporal se cobró la vida de un conductor, que perdió el control de su vehículo como consecuencia del exceso de agua en la carretera en Vilagarcía (Pontevedra). Los vientos, que superaron los 120 kilómetros por hora, y las fuertes lluvias afectaron sobre todo a las zonas costeras del sur de La Coruña y de la provincia de Pontevedra, ocasionando centenares de cortes en suministro eléctrico y telefónico y, la caída de árboles y farolas. En Vigo el viento derrumbó un muro de piedra que aplastó varios coches que estaban aparcados. Padrón (La Coruña), quedó totalmente inundada por el desbordamiento del río Sar con daños que podrían superar los 30.000 euros. En Pontevedra quedó cortado el servicio de traída de aguas, que también fallo en Santiago. El mayor peligro se registró en las zonas costeras, donde los vientos soplaron a más de 100 kilómetros por hora y las olas superaron en algunos casos los 10 metros [Guimerans Rodríguez, 2016].

4.2.3 Invierno de 1999

El periodo de inundación comprende desde el 7 al 9 de marzo en la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa. El tipo de tiempo registrado durante este periodo fue de un día CNW (híbrido de C y NW) y 2 días de situación ciclónica. Estos patrones se caracterizan por estar asociados a precipitaciones intensas.

En cuanto a la detección de ríos atmosféricos, se registró la presencia de un AR desde el día 8 a las 6h hasta el día 9 a las 6h. Lo que pudo agravar las lluvias registradas en dichos días (ver Tabla 4.6).

Tabla 4.6, *Datos de la precipitación diaria (mm) para el periodo de inundación de 1999 de la cuenca hidrográfica Galicia-Costa.*

Día	AR	WT	A Coruña	Lourizán	Santiago
07/03/99	0	CW	12,4	17,6	79,7
08/03/99	1	C	132,7	37,2	83,6
09/03/99	1	C	19,5	32,8	38,4

El tiempo observado durante ese día, se puede ver en el análisis del mapa de geopotencial en 500 hPa y presión en superficie (Figura 4.14) y en el mapa de precipitación asociada al paso de esa baja presión (Figura 4.15).

En la Figura 4.12, se puede observar en el geopotencial a 500hPa la profundización de una vaguada sobre Galicia extendiéndose de S a N. Además, las líneas de presión indican la presencia de una borrasca que entra por el noreste trayendo una masa de aire frío sobre Galicia que choca con los vientos de oeste de origen marítimo que la propia borrasca proyecta sobre Galicia.

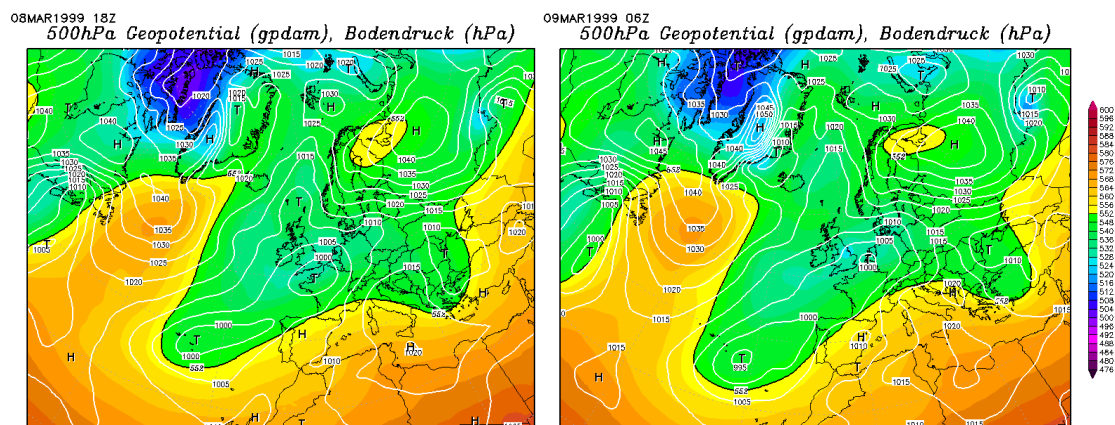


Figura 4.14, Geopotencial a 500 hPa (gdam), contornos de color y presión en superficie (hPa), isobaras de color blanco. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

En la Figura 4.15, se puede observar la precipitación asociada a ese paso del frente. Hay un máximo intenso que afecta a la costa gallega y que indica además por donde puede venir el AR. La Figura 4.16 muestra la trayectoria seguida por el AR hasta nuestras costas a través de las variables, IVT e IWV.

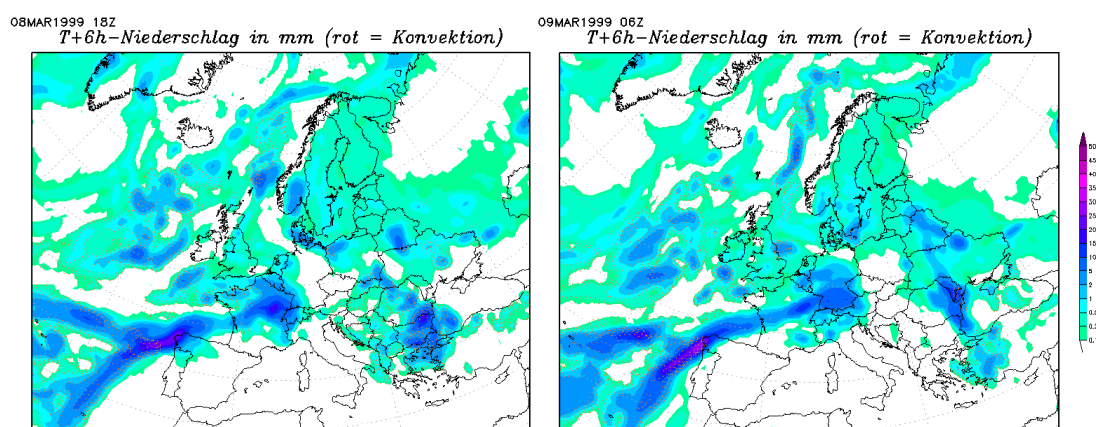


Figura 4.15, Precipitación (mm) asociada al paso del ciclón para Galicia-Costa. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

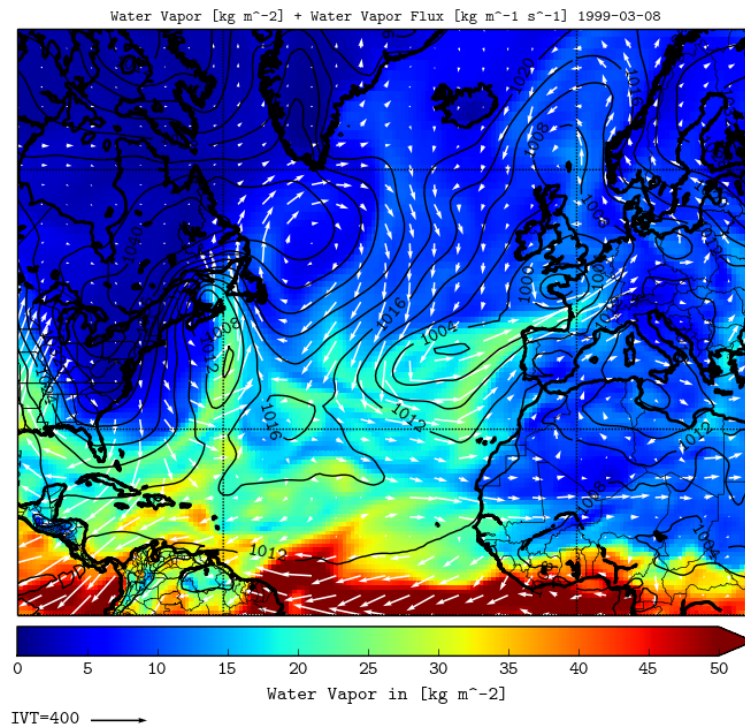


Figura 4.16, *Columna de vapor de agua integrado*, IWV , (kg m^{-2}), *mapa de color*, *campos integrados de transporte de vapor*, IVT , ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), *flechas blancas* y *presión en superficie* (hPa), *isobaras de color negro*, para el día 8 de marzo de 1999.

Durante este episodio en Santiago se registraron 164 litros por metro cuadrado. Las precipitaciones fueron menores en A Coruña capital, con 136 litros por metro cuadrado, y Ferrol, con 140 litros. Pero en estas zonas se desataron riadas que dejaron incomunicados los municipios de Miño, Pontedeume y Ferrol [Hemeroteca El País, marzo 1999].

4.2.4 Invierno del 2000

El periodo de inundación registrado por el CNIH, que va de octubre de 2000 a enero de 2001 se engloba dentro de uno de los periodos más lluviosos de la historia de Galicia con cantidades del orden de 1700 mm a lo largo de tres meses o cuando extendemos la comparación a cinco meses consecutivos (noviembre de 2000 y marzo de 2001) con cantidades cercanas a los 2500 mm lo que lo convierte en el periodo más lluvioso. En muchos aspectos, este periodo, en el que únicamente el mes de febrero se alejó de los valores máximos históricos de precipitación, resultó excepcional según confirman los datos de la AEMET. En los 5 meses que van de noviembre del 2000 a marzo del 2001, destacaron 2 meses por encima del resto, diciembre y marzo, en los que se producen algunas efemérides de precipitación, especialmente en marzo. Las efemérides de precipitación de diciembre del 2000 se limitan más a observatorios del SW de Galicia.

La gran cantidad de agua acumulada durante este periodo, provocó constantes desbordamientos de los ríos. En particular, a su paso por la localidad de Caldas de Reis, el río Umia se desbordó en 5 meses en 12 ocasiones [Guimerans Rodríguez, 2016].

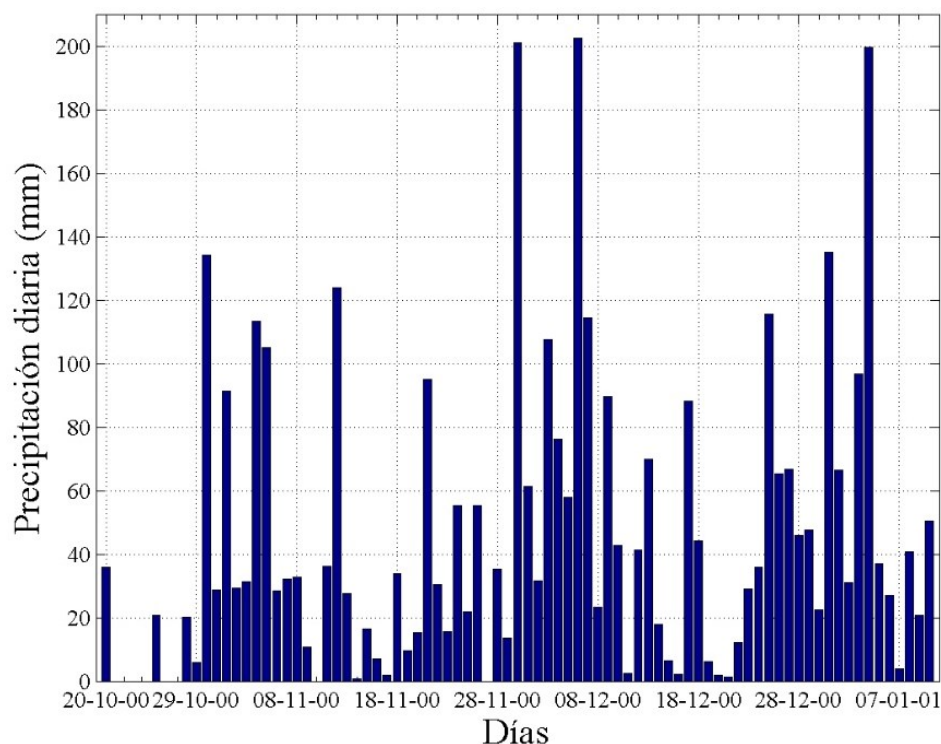


Figura 4.17, *Precipitación registrada durante el periodo de inundación en las estaciones consideradas de la cuenca Galicia-Costa.*

En este episodio de inundación tan extenso centraremos nuestro estudio entorno al 6-7 de diciembre que son los días que mayor cantidad de precipitación registran las estaciones consideradas de la cuenca hidrográfica de Galicia-Costa según se puede ver en la Figura 4.17 donde se muestra la serie de las precipitaciones registradas en las tres estaciones consideradas para el análisis de la cuenca Galicia-Costa durante todo el periodo de inundación.

El día 7 de diciembre una profunda borrasca procedente de latitudes muy bajas con vientos fuertes que afectan a casi toda la península, se encuentra asociada a un denso AR que provoca precipitaciones muy fuertes, casi torrenciales en muchos puntos de Galicia. El desbordamiento de los ríos gallegos es generalizado, por la cantidad de precipitación registrada así como por la saturación de agua acumulada en los últimos 2 meses. Se desborda el río Miño a su paso por Ourense capital, con 8 metros por encima de su caudal habitual. En la Figura 4.18 se puede ver como la borrasca de 985 hPa se encuentra sobre Galicia, induciendo fuertes vientos de SW sobre la misma.

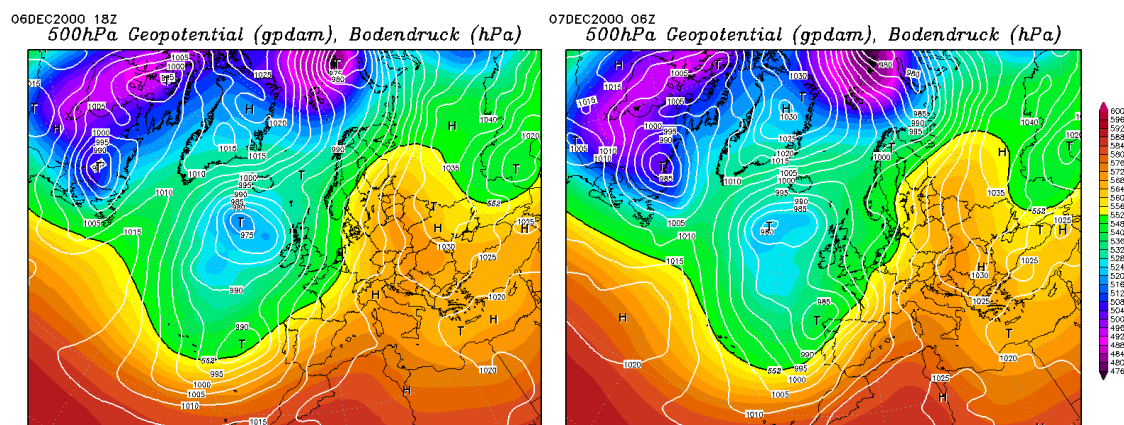


Figura 4.18, Geopotencial a 500 hPa (gdam), contornos de color y presión en superficie (hPa), isobaras de color blanco. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

En la Figura 4.19 se muestra la precipitación asociada a dicha situación con un intenso máximo de precipitación sobre las Rías Baixas. La configuración de la precipitación registrada parece marcar el camino seguido por el AR detectado en dicho día. La Figura 4.20 nos muestra más claramente el AR a través de las variables IVT e IWV para el 7 de diciembre.

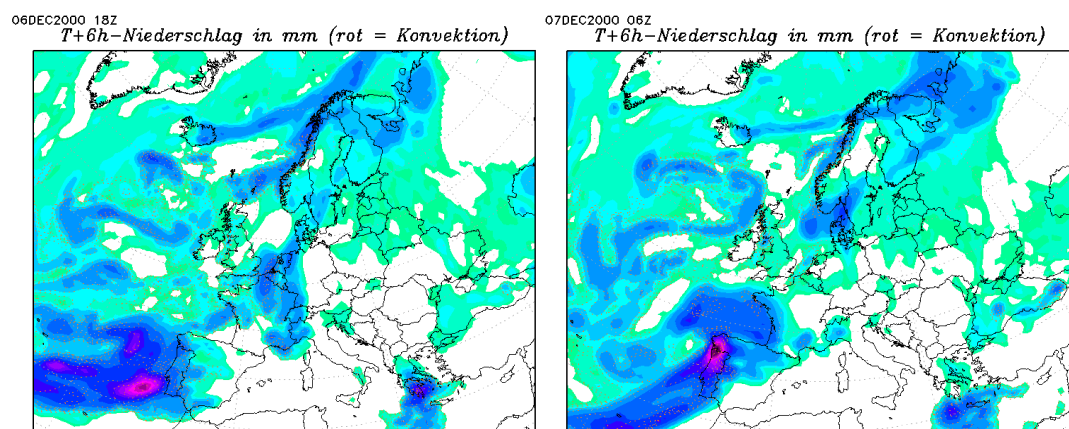


Figura 4.19, Precipitación (mm) asociada al paso del frente por la cuenca de Galicia-Costa. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

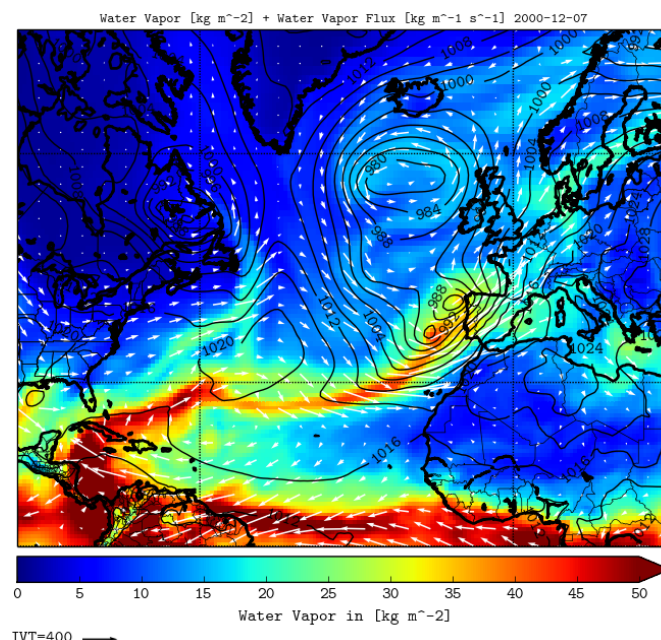


Figura 4.20, Columna de vapor de agua integrada , IWV , (kgm^{-2}), mapa de color, campos integrados de transporte de vapor, IVT , ($kg\ m^{-1}s^{-1}$), flechas blancas y presión en superficie (hPa), isobaras de color negro, para el día 7 de diciembre de 2000.

4.2.5 Invierno de 2006

El periodo de inundación del 2006 al igual que el del 2000-2001 es relativamente largo. Abarca desde el 2 al 25 de octubre para la cuenca de Galicia-Costa. Fue un periodo que duró unos 23 días y en el que se produjeron intensas precipitaciones sobre todo hacia el final del periodo. Además, las desastrosas inundaciones ocurridas durante octubre de 2006, se vieron agravadas por una situación especial ocurrida meses antes. En el verano de 2006, en la primera quincena de agosto se produjo una de las peores oleadas de incendios que sufría Galicia desde el verano de 1989, ardiendo casi 80.000 hectáreas en toda la comunidad gallega, la mayoría en las provincias de Coruña y Pontevedra, y a su vez la mayoría en la franja más occidental de ambas provincias, que es la zona más pluviosidad de Galicia [Guimerans Rodríguez, 2016]. Esta situación agrava las consecuencias de un periodo lluvioso, debido a que los incendios dejaron sin apenas cubierta vegetal los montes gallegos favoreciendo la ocurrencia de riadas. El caso es que el otoño de 2006 resultó ser muy lluvioso, con la llegada continua de borrascas y restos de tormentas tropicales. El otoño comenzó con la llegada del ciclón extratropical Gordon (21-septiembre-2006). Posteriormente octubre, registró en los 23 días del periodo de inundación un 76% de días con Galicia bajo la influencia de situaciones de tipo ciclónico o con flujo del oeste. A principios de octubre, se formó una ciclogénesis extrema (2/3-octubre-2006) que afectó a todo el extremo norte peninsular y que provocó

intensas precipitaciones (la AEMET registro en la estación de Coruña 64,1l/m² y en la del aeropuerto de Alvedro 68,7l/m²). Pasada la ciclogénesis se instauró un régimen de fuertes precipitaciones de carácter continuo que provocaron las primeras inundaciones en la localidad coruñesa de Cee, afectada por los incendios de verano. Esta situación empeoró en la madrugada del día 22 de octubre de 2006 cuando un AR, impacta directamente contra las Rías Baixas provocando chubascos torrenciales generalizados. Las lluvias torrenciales junto con las condiciones del terreno provocaron terribles riadas e inundaciones en todos los ayuntamientos del litoral pontevedrés y en algunos coruñeses como el de Cee. El resultado fueron dos muertos, varios heridos, numerosas carreteras cortadas, los bancos marisqueros arrasados en las Rías Baixas por la riada de ceniza, casi medio millar de casas afectadas por las inundaciones, importantes destrozos en fábricas conserveras, puentes medievales y molinos centenarios y tradicionales arrastrados por las aguas, etc. En pocos minutos arroyos y riachuelos de no más de un metro de ancho pasaron a tener casi 100m como ocurrió en la ladera sur del Monte Castrove en Poio [Guimerans Rodríguez, 2016].

En la Figura 4.21 se muestra la serie de las precipitaciones registradas en las tres estaciones consideradas para el análisis de la cuenca Galicia-Costa durante todo el periodo de inundación.

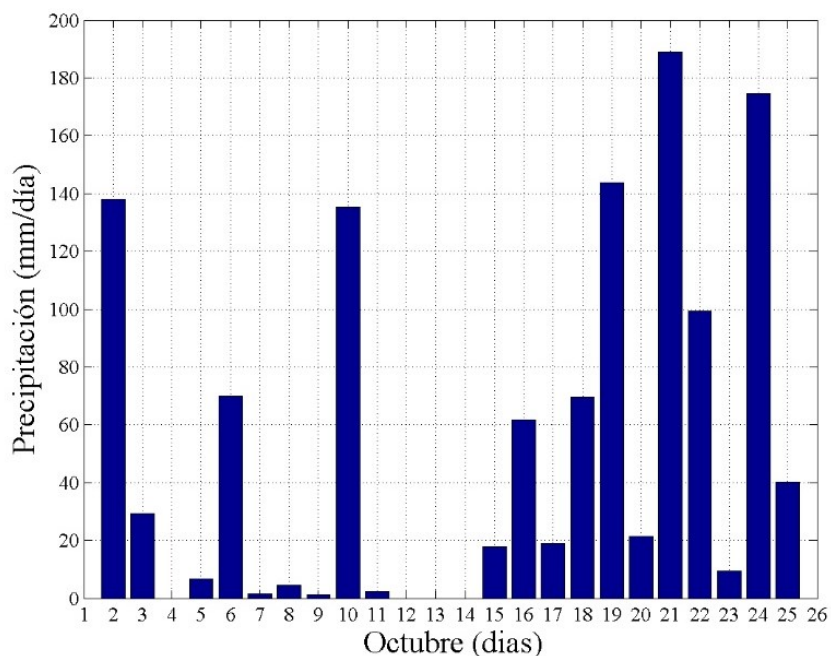


Figura 4.21, *Precipitación registrada durante el periodo de inundación en las estaciones consideradas de la cuenca Galicia-Costa.*

Si nos centramos en los últimos días del periodo de la inundación. Podemos ver en la Tabla 4.8 que junto con la presencia de situaciones ciclónicas y de flujo de oeste nos encontramos con la presencia persistente de un AR.

Tabla 4.8, *Datos de la precipitación diaria (mm) en las tres estaciones de la cuenca hidrográfica Galicia-Costa durante los días 19-25 de octubre junto con la detección o no de AR en las costas de Galicia y el tipo de situación sinóptica presente.*

Día	AR	WT	A Coruña	Lourizán	Santiago
19/10/06	1	CW	22,6	45,2	75,8
20/10/06	0	W	0,8	3,2	17,5
21/10/06	1	SW	22,3	73,5	93,3
22/10/06	1	CSW	8,3	35,4	55,5
23/10/06	1	CW	4,4	3	1,9
24/10/06	1	SW	26	65,1	83,5
25/10/06	0	C	1,7	29,8	8,8

Si nos fijamos en el periodo de máxima precipitación que según los registros ocurrió entre los días 21 y 22 de octubre y analizamos la situación sinóptica nos encontramos con que como se puede observar en la Figura 4.22, se produjo la entrada de una borrasca por el norte que se extiende hacia el sur afectando a Galicia y dejándola bajo la influencia de fuertes vientos del suroeste. Por otro lado, se puede observar que Galicia se encuentra bajo la influencia de una profunda vaguada en 500 hPa.

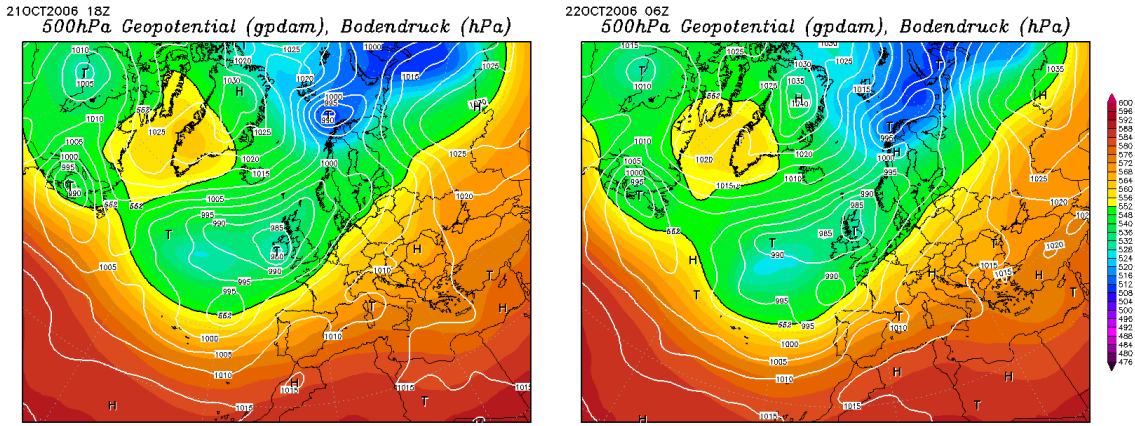


Figura 4.22, *Geopotencial a 500 hPa (gpdam), contornos de color y presión en superficie (hPa), isobaras de color blanco.* Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

En la Figura 4.23, se puede observar la intensa precipitación registrada en la madrugada del día 22, sobre la costa gallega.

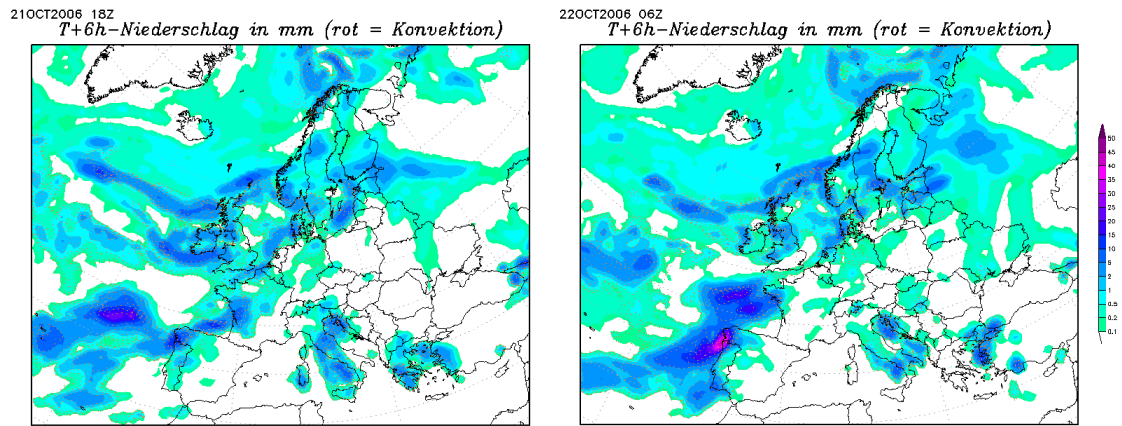


Figura 4.23, Precipitación (mm) asociada al paso del frente por la cuenca de Galicia-Costa. Figura tomada del archivo CFSR de Wetterzentrale.

El río atmosférico, desencadenante, junto con la situación atmosférica presente, de la gran cantidad de precipitación registrada entre el 21 y el 22 de octubre se puede ver en la Figura 4.24 a través de la visualización de las variables, IVT e IWV.

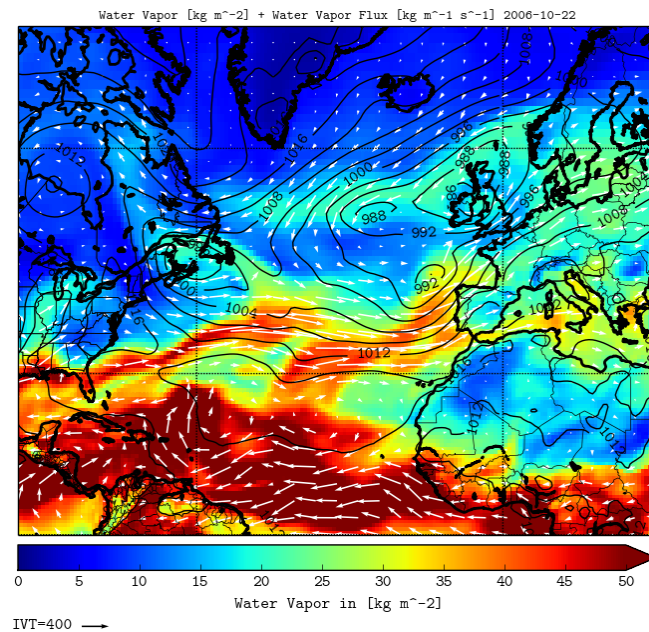


Figura 4.24, Columna de vapor de agua integrado, IWV, (kg m^{-2}), mapa de color, campos integrados de transporte de vapor, IVT, ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), flechas blancas y presión en superficie (hPa), isobaras de color negro, para el día 22 de octubre de 2006.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha encontrado que los episodios de inundaciones correspondientes al periodo de invierno (entre octubre y marzo) en las zonas costeras de Galicia (NW de la península Ibérica) están asociados generalmente con situaciones sinópticas de W, SW y C. Estas situaciones sinópticas se asocian a la entrada de estructuras baroclínicas y borrascas procedentes del Atlántico; si además coinciden con el impacto de un río atmosférico en la costa gallega el resultado será un episodio de fuertes e intensas precipitaciones en esta región. Los resultados ratifican el papel de los ARs en el aumento de la intensidad de las precipitaciones. En el 79% de los episodios invernales de inundación de la cuenca Galicia-Costa registrados por el CNIH, se ha detectado la presencia de un AR. De hecho en los 5 eventos de inundación considerados el registro de máxima precipitación se detectó justo con el paso de un AR sobre la cuenca.

En la cuenca del Miño-Sil el comportamiento es similar aunque en este caso solo en el 54% de los episodios invernales de inundación de la cuenca Miño-Sil registrados por el CNIH, se ha detectado la presencia de un AR.

Durante los meses de verano, Los episodios de inundación tienen un carácter más convectivo y en su mayor parte son provocadas por lluvias torrenciales procedentes de situaciones tormentosas. Las situaciones sinópticas asociadas a los episodios de inundación de verano son: NE, A, ANE que por regla general suelen ir asociadas a situaciones tormentosas en esta época del año y por su configuración sinóptica bloquean el paso de los ARs hacia Galicia. No obstante en algún episodio de inundación en el que la situación sinóptica era de W o SW la presencia de un AR, aumentaba de forma considerable la precipitación con respecto a la no presencia de AR

Aunque en la mayoría de días de precipitación intensa y en algunos episodios de inundación no se detecta la presencia de ARs, sí que es cierto que en todos aquellos

episodios de precipitaciones o inundaciones más extremas se ha detectado el impacto de un AR sobre la costa gallega.

Por ello el estudio de la relación entre los AR y las inundaciones es muy importante, no solo por la posibilidad de provocar la inundación si no por la posibilidad de agravar la cantidad de precipitación asociada a una situación ya de por si lluviosa. Cuando se detecta un AR bajo cualquier condición sinóptica, los resultados arrojan que la precipitación puede ser más del doble de la esperada, eso es muy importante a la hora de hacer una predicción meteorológica y decidir qué nivel de alerta activar.

6. Referencias

- Martínez Cortizas, A., Pérez Alberti, A. (coord.): Atlas Climático de Galicia, Xunta de Galicia, 1999.
- Brands, S., Gutiérrez, J., y San-Martín, D.: Twentieth-century atmospheric river activity along the west coasts of Europe and North America: algorithm formulation, reanalysis uncertainty and links to atmospheric circulation patterns, *Climate Dynamics*, pp. 1–25, 2016.
- Bueh, C. y Nakamura, H.: Scandinavian pattern and its climatic impact, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133,5 2117–2131, 2007.
- Cabalar-Fuentes, M.: Los temporales de lluvia y viento en Galicia. Propuestas de clasificación y análisis de tendencias (1961-2001), *Investigaciones Geográficas*, pp. 103–118, 2005.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., y Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597, doi:10.1002/qj.828, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.828>, 2011.
- Dettinger, M.: Climate Change, Atmospheric Rivers, and Floods in California - A Multimodel Analysis of Storm Frequency and Magnitude Changes¹, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47, 514–523, doi:10.1111/j.1752-1688.2011.00546.x, 2011.

- Drumond, A., Nieto, R., Gimeno, L., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda E.: Characterization of the atmospheric component of the winter hydrological cycle in the Galicia/North Portugal Euro-region: a Lagrangian approach. *CLIMATE RESEARCH*, 48, 193–201, 2011.
- Eiras-Barca, J., Brands, S., y Miguez-Macho, G.: Seasonal variations in north atlantic atmospheric river activity and associations with anomalous precipitation over the iberian atlantic margin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016.
- Garaboa-Paz, D., Eiras-Barca, J., Huhn, F., y Pérez-Muñuzuri, V.: Lagrangian coherent structures along atmospheric rivers, *Chaos*, 25, 063105, doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4919768>,<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/chaos/25/6/10.1063/1.4919768>, 2015.
- Gimeno, L., Drumond, A., Nieto, R., Trigo, R. M., y Stohl, A.: On the origin of continental precipitation, *Geophysical Research Letters*, 37, n/a–n/a, doi: 10.1029/2010GL043712, <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043712>, 2010.
- Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M., y Lavers, D. A.: Atmospheric rivers: a mini-review, *Frontiers in Earth Science*, 2, 15 doi:10.3389/feart.2014.00002, 2014.
- Gimeno, L., Dominguez, F., Nieto, R., Trigo, R., Drumond, A., Reason, C. J., Taschetto, A. S., Ramos, A. M., Kumar, R., y Marengo, J.: Major mechanisms of atmospheric moisture transport and their role in extreme precipitation events, *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 117–141, 2016.
- Gómez-Gesteira, M., Gimeno, L., deCastro, M., Lorenzo, M. N., Alvarez, I., Nieto, R., Taboada, J. J., Crespo, A. J. C., Ramos, A. M., Iglesias, I., Gómez- Gesteira, J. L., Santo, F. E., Barriopedro D., Trigo, I. F.: The state of Climate in North-West Iberia. *Climate Research*, 48, 109–144, doi: 10.3354/cr00967, 2011.
- Guan, B. y Waliser, D. E.: Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 12514–12535, 2015.
- Huth, R., C. Beck, A. Philipp, M. Demuzere, Z. Ustrnul, M. Cahynová, J. Kysely y O. E. Tveito, 2008: Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent

- Advances and Applications in Trends and Directions in Climate Research: Ann. N.Y. Acad. Sci., 1146: 105–152.
- Interior, M.: Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas, Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Ministerio del Interior español, 2014.
- Jenkinson, A. y Collison, F.: An initial climatology of gales over the North Sea, Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62, Meteorological Office, Bracknell, Available from the National Meteorological Library, Meteorological Office, Bracknell, UK, 1977.
- Jones, P., Hulme, M., y Briffa, K.: A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme, International Journal of Climatology, 13, 655–663, 1993.
- 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, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J. Jenne, R. y Joseph, D.: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 3(437472), 1996.
- Lavers, D. A. y Villarini, G.: The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe, Geophysical Research Letters, 40, 3259–3264, doi:10.1002/grl.50636, <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50636>, 2013.
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Wood, E. F., Villarini, G., Brayshaw, D. J., y Wade, A. J.: Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers, Geophysical Research Letters, 38, doi:10.1029/2011GL049783, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL049783>, 2011.
- Lavers, D. A., Villarini, G., Allan, R. P., Wood, E. F., y Wade, A. J.: The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalysis and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117, doi:10.1029/2012JD018027, <http://dx.doi.org/10.1029/2012JD018027>, 2012.
- Lorenzo, M. N. y Taboada, J. J.: Influences of atmospheric variability on freshwater input in Galician Rias in winter, Journal of Atmospheric & Ocean Science, 10, 377–387, 2005.

- Lorenzo, M. N., Taboada, J. J., y Gimeno, L.: Links between circulation Weather Types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain), *International Journal of Climatology*, 28, 1493–1505, 2008.
- Lorenzo, M. N., Ramos, A. M., Taboada, J. J., y Gimeno, L.: Changes in present and future circulation types frequency in northwest Iberian Peninsula, *PloS one*, 6, e16201, 2011.
- Martín, J.: Mapas del tiempo: fundamentos, interpretación e imágenes de satélite. Barcelona: oikos-tau, S.A., 2000.
- Matrosov, S. Y.: Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the eastern North Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, 141, 3757–3768, 2013.
- Neiman, P. J., Hughes, M., Moore, B. J., Ralph, F. M., y Sukovich, E. M.: Sierra barrier jets, atmospheric rivers, and precipitation characteristics in northern California: A composite perspective based on a network of wind profilers, *Monthly Weather Review*, 141, 4211–4233, 2013.
- Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., y Scott, C.: Tropospheric rivers? – A pilot study, *Geophysical Research Letters*, 19, 2401–2404, doi: 10.1029/92GL02916, <http://dx.doi.org/10.1029/92GL02916>, 1992.
- Olcina Cantos, J.: Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en España, páginas 35-43. Murcia: Instituto Euromediterráneo del Agua, 2007.
- Ralph, F. M. y Dettinger, M. D.: Storms, floods, and the science of atmospheric rivers, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92, 265–266, doi: 10.1029/2011EO320001, <http://dx.doi.org/10.1029/2011EO320001>, 2011.
- Ralph, F. M., Neiman, P. J., Wick, G. A., Gutman, S. I., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., y White, A. B.: Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers, *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL026689, <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026689>, 2006.
- Ramós, A.M.Ramos, A. M., Trigo, R. M., Liberato, M. L. R., y Tomé, R.: Daily precipitation extreme events in the Iberian Peninsula and its association with Atmospheric Rivers, *Journal of Hydrometeorology* doi:10.1175/JHM-D-14-0103.1, <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-14-0103.1>, 2015.

- Ramos, A. M., Lorenzo, M. N., Gimeno, L.: Compatibility between modes of low-frequency variability and circulation types: a case study of the Northwest Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research* 115:D02113. doi:10.1029/2009 JD 012194, 2010.
- Rapela Freire, L., Rodríguez-Toubes, D., Uña-Álvarez, E.: La gestión de riesgos de riadas: el caso de Ourense, Congreso Internacional del Agua–Termalismo y Calidad de Vida. Campus da Auga, Ourense, Spain, 2015.
- Rutz, J. J., Steenburgh, W. J., y Ralph, F. M.: Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western United States, *Monthly Weather Review*, 142, 905–921, 2014.
- Trigo, R. M., DaCamara, C. C., et al.: Circulation Weather Types and their influence on the precipitation regime in Portugal, *International Journal of Climatology*, 20, 1559–1581, 2000.
- Trigo, R. M., Valente, M. A., Trigo, I. F., Miranda, P., Ramos, A. M., Paredes, D., y García-Herrera, R.: The impact of North Atlantic wind and cyclone trends on European precipitation and significant wave height in the Atlantic, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, 212–234, 2008.
- Viale, M., y Nuñez M.: Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical Central Andes and associated synoptic and regional characteristics, *Journal of Hydrometeorology*, 12, 481–507, 2011. doi:10.1175/2010JHM1284.1.
- Waliser, D. y Guan, B.: Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers, *Nature Geoscience*, 10, 179–183, 2017.
- Zhu, Y. y Newell, R. E.: A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers, *Monthly. Weather Review*, 126, 725–735, 1998.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- Blog Meteouvigo: Benito Guimerans Rodríguez **Fuentes:** Aemet, MTGalicía diezminutales, El País, La Voz de Galicia, Diario de Pontevedra, Faro de Vigo, anotaciones propias.
- CRID: <http://searchcrid.cridlac.org/cgi-bin/wxis.exe/iah/>

- Inundaciones: <http://www.monografias.com/trabajos81/estudio-factores-determinan-peligros-inundaciones/estudio-factores-determinan-peligros-inundaciones2.shtml>
- Cuenca hidrográfica del Miño-Sil: <http://www.cadc-albufeira.eu/es/cuencas-hidrograficas/cuenca-minio/>.
- Cuenca hidrográfica Galicia-Costa: http://augasdegalicia.xunta.gal/seccion-tema/c/Planificacion_hidroloxica?content=plan-hidroloxico-gc/seccion.html&sub=Subseccion_002/
- Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2011) Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_metodologica_ZI.aspx
- NOAA Research: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/atmrivers/>
- Wetterzentrale: mapas de geopotencial a 500hPa, presión a nivel del mar y precipitación: <http://www.wetterzentrale.de/> .

