

Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil

S. HERNÁNDEZ*, D. FERNÁNDEZ-NÓVOA, M. DECASTRO

**sabrina.hernandez@alumnos.uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultad de Ciencias,
Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

El cambio climático está dando lugar a una importante intensificación de las lluvias torrenciales, así como de las inundaciones asociadas, en muchas partes del mundo, y se espera que en el futuro la situación sea todavía más crítica. Sin embargo, es necesario hacer análisis regionalizados de estos eventos ya que su evolución va a ser muy dependiente de las características locales de cada zona. En el presente estudio se evalúa como se verá afectada la cuenca del Miño-Sil en relación a estos fenómenos y las implicaciones del cambio climático, mediante un análisis regionalizado de los eventos más extremos de precipitación y las riadas asociadas. Para ello, se utilizaron aquellos modelos climáticos del proyecto EURO-CORDEX que, cuando se compararon con datos reales de la zona, ofrecieron una buena reproducibilidad de los mismos. Una vez validados los modelos, se analizaron los datos de precipitación para el período histórico (1990-2019) y dos futuros, uno próximo (2030-2059) y otro más lejano (2070-2099), considerando el escenario de emisión RCP8.5. Inicialmente, se analizaron los cambios esperados en la precipitación media anual, obteniendo una disminución a lo largo del siglo que rondará el 20% en el futuro lejano. Al evaluar las variaciones estacionales se observó que el mayor descenso de precipitación ocurrirá en los meses de verano, disminuyendo en aproximadamente un 40% a finales de siglo en esta estación, lo que puede implicar una situación crítica de escasez de agua en los meses cálidos en la cuenca del Miño-Sil. Sin embargo, esta disminución de la precipitación media anual y estacional, no implica que los eventos extremos también vayan a disminuir su intensidad en el futuro. Así, se analizaron también las proyecciones futuras de los eventos más extremos de precipitación, considerando como tales aquellos que superasen el percentil 99.9. Se ha obtenido un incremento inequívoco de su intensidad, pudiendo alcanzar un 6.5% en media para la cuenca en el futuro lejano. Además, también se analizó la precipitación extrema en términos de períodos de retorno, obteniéndose también un incremento de sus valores a medida que avanza el siglo. Una vez caracterizadas las precipitaciones y su evolución futura, los datos de precipitación se utilizaron para alimentar un modelo hidrológico y obtener los caudales asociados, para analizar también su evolución futura. Se obtuvo que, de forma general, los eventos extremos de caudal aumentarán en las principales localizaciones de la cuenca, con intensificaciones máximas que pueden rondar el 30% a finales de siglo en la ciudad de Ourense y la desembocadura del Miño. En la zona del río Sil, el afluente principal del Miño, en ciudades como Ponferrada y O Barco la intensificación también será importante, aunque los aumentos serán moderados. Es en la zona superior del Miño, concretamente en la ciudad de Lugo, donde, a pesar de que se esperan ligeras intensificaciones, los resultados arrojan una mayor incertidumbre.

Palabras Clave: Eventos extremos; Cambio climático; CORDEX; Precipitación; Caudales; Cuenca del Miño-Sil

1. Introducción

La acción antropogénica del ser humano es el principal motor del cambio climático actual que estamos viviendo (Uriarte, 2013; Zalasiewicz y Willians, 2021). Esto es debido, en gran parte, al drástico aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se está produciendo desde la Revolución Industrial (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2021). La continuada emisión de GEIs a la atmósfera ha dado lugar a un desequilibrio en el balance radiativo del planeta, con un forzamiento radiativo total positivo que conduce a un incremento de la temperatura media de la Tierra. Los registros indican que el planeta recibe más energía en la actualidad en comparación al año 1750, en concreto, un aumento de 2.3 W/m^2 en 2011, siendo el principal responsable el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera (IPCC, 2013). Este desequilibrio en el balance de flujos de energía del planeta da lugar a una serie de cambios en las variables climáticas. Además de la subida de las temperaturas en la atmósfera y los océanos, se asocia con la disminución de la cantidad y extensión de hielo y nieve, la subida del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el desplazamiento de las zonas climáticas hacia los polos o el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos (olas de calor, precipitaciones extremas...) en muchas regiones del planeta (IPCC, 2013; 2021).

Entre los eventos extremos que se ven intensificados por la acción del cambio climático, los fenómenos de precipitación intensa y los eventos de inundación asociados, se sitúan como unos de los más importantes y preocupantes debido a sus catastróficas consecuencias, ya que tienen una gran

capacidad de causar daños importantes en infraestructuras, además de poner en riesgo la integridad de las personas (Noji, 2000; Fekete *et al.*, 2017; Paprotny *et al.*, 2018). Más allá del incremento tanto en frecuencia como en magnitud de estos fenómenos detectado recientemente en muchas partes del planeta, se espera que en el futuro la situación sea todavía más crítica, aunque bien es cierto que este aumento no es homogéneo, sino que depende considerablemente de las características regionales, pudiendo incluso existir alguna localización donde el riesgo disminuya (Arnell y Gosling, 2016; Alfieri, 2017; Jongman, 2018; Blöschl *et al.*, 2019). Sin embargo, de forma general, el aumento de la temperatura global facilita que la atmósfera retenga más humedad, contribuyendo a la intensificación de los eventos de precipitación extrema, y las consecuentes inundaciones, en muchas regiones del planeta (IPCC, 2021).

Como se ha comentado, la variabilidad de los eventos extremos ante el cambio climático va a ser muy dependiente de cada región, de ahí que sea fundamental analizar su evolución en cada localización que pueda ser vulnerable a dichos eventos. Es por ello que surgieron proyectos enfocados a mejorar la resolución de los modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés) para así poder analizar la evolución del clima de forma regional. Los GCMs permiten obtener simulaciones globales del clima abarcando todo el planeta, sin embargo, sus resoluciones máximas están en el entorno de los 100 km, lo que no permite analizar de forma precisa el clima a escala regional. De esa necesidad surgen los modelos climáticos regionales, como los desarrollados en el proyecto EURO-CORDEX (Coordinated Regional

Climate Downscaling Experiment, <http://www.euro-cordex.net>). Estos modelos se alimentan en sus fronteras de los datos proporcionados por los GCMs, pero proporcionan una mejor resolución espacial (en el entorno de los 12.5 km). Esto permite analizar con mayor precisión y detalle la variabilidad climática futura de las diferentes regiones. Aprovechando la información proporcionada por estos modelos, se han realizado investigaciones acerca de la evolución del ciclo hidrológico a lo largo del próximo siglo. Los resultados de estas investigaciones determinaron que la intensificación del ciclo hidrológico a causa de temperaturas atmosféricas crecientes va estrechamente ligada a la recurrencia de lluvias torrenciales que repercutirán directamente sobre el riesgo de fenómenos de inundación, que se verán intensificados en muchas regiones (Alfieri et al., 2015a). En este sentido, se ha determinado que la frecuencia de los eventos extremos de inundación en Europa se duplicará en las próximas tres décadas, con una tendencia que continuará aumentando a medida que avance el siglo. De hecho, se espera que esta intensificación afecte aproximadamente al 75% de los ríos europeos (Alfieri et al., 2015a). Esto provocará, además, un aumento significativo tanto en el número de personas afectadas, como en las pérdidas económicas asociadas a los daños provocados por las inundaciones (Alfieri et al., 2015b). También se han realizado estudios enfocados en zonas más locales. Un ejemplo es el proyecto llevado a cabo desde AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, <https://www.aemet.es/>) donde se desarrollaron modelos estadísticos de regionalización para España, una región especialmente vulnerable a estos eventos debido a sus características sinópticas (Trigo et al., 2004; Lavers et al., 2011). El objetivo

de este proyecto era elaborar proyecciones más precisas sobre cómo iban a evolucionar las principales variables climáticas en las próximas décadas en esta región. A pesar de que se detectó una disminución general de los días con lluvia, estos modelos confirmaron un aumento en la tasa de precipitaciones extremas (Morata, 2014). La evolución del caudal es más incierta, ya que hay una insuficiencia de estudios que apliquen varios modelos hidrológicos de forma simultánea para su proyección, sin embargo, se pueden detectar algunos cambios importantes y que parecen robustos. Se esperan aumentos inequívocos en los caudales extremos (periodo de retorno de 100 años) en las demarcaciones hidrográficas del Miño-Sil, Galicia Costa, Duero y Ebro (Inundaciones y Cambio Climático, 2018).

Los principales objetivos del presente estudio son determinar de forma particular la evolución futura de las precipitaciones en la cuenca del Miño-Sil, así como la evolución de los caudales extremos asociados en las localizaciones más importantes de la cuenca durante el siglo XXI, debido a que, como se ha comentado, es una demarcación especialmente vulnerable a dichos eventos.

2. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se enfoca en la demarcación hidrográfica del Miño-Sil, situada en el noroeste de la Península Ibérica (Figura 1). Este territorio abarca gran parte de Galicia, atravesando también territorio leonés, incluyendo una mínima parte en Asturias e introduciéndose en su parte final en el norte de Portugal. La superficie total de la cuenca se sitúa en torno a los 17.000 km².



Figura 1. Representación del área de estudio. En azul se representa la superficie ocupada por la cuenca hidrográfica del Miño-Sil. Los puntos rojos indican las principales localizaciones en las que se analizará la evolución de los caudales extremos, de este a oeste: Ponferrada y O Barco (río Sil, principal afluente del río Miño); Lugo, Ourense y la desembocadura (río Miño).

La precipitación anual de la cuenca oscila entre 700 y 1.900 mm/año, con una media anual de 1.175 mm, según los datos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (CHMS www.chms.es). El régimen fluvial de la cuenca es básicamente pluvial, principalmente influenciado por el ciclo hidrológico caracterizado por caudales mínimos en los meses de verano y máximos durante el final del otoño y el invierno (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2017). El caudal medio supera los 300 m³s⁻¹ en la desembocadura. Durante los meses de caudales máximos, la cuenca puede presentar recurrentemente caudales elevados que provocan que el río se desborde, causando inundaciones en importantes poblaciones (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020). Esto principalmente se asocia a los sistemas de tormentas que llegan desde el Atlántico al noroeste de la Península Ibérica cargados de calor y humedad, y que por lo tanto pueden provocar, bajo condiciones favorables de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés), eventos intensos y duraderos de precipitación sobre la cuenca causando inundaciones asociadas (Trigo *et al.*, 2004; Trigo, 2006; Lavers *et al.*, 2011; Trigo *et al.*, 2014).

3. Datos y metodología

3.1. CORDEX

Para la realización de este trabajo se utilizaron los datos diarios de precipitación del proyecto EURO-CORDEX, con una resolución espacial de 0,11° x 0,11°, con el objetivo de analizar los cambios futuros esperados tanto en la precipitación, como en los caudales asociados. El proyecto CORDEX, a través de la integración de diferentes modelos climáticos regionales (RCMs por sus siglas en inglés), realiza simulaciones históricas y proyecciones futuras, que se extienden a lo largo del siglo XXI, de las variables climáticas más importantes a escala regional y bajo los distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero propuestos por el IPCC (Giorgi *et al.*, 2009). Para el desarrollo de este trabajo se consideraron un total de 31 RCMs disponibles en la rama europea del proyecto (dominio EURO-CORDEX, www.euro-cordex.net). Se descargaron los datos diarios de precipitación para el área de estudio para el período histórico 1990-2019, y el futuro, tanto cercano (2030-2059) como lejano (2070-2099), bajo el escenario de emisión RCP8.5. Este escenario es el más pesimista de todos, en el que se contempla la posibilidad de que los esfuerzos realizados por las autoridades políticas para combatir el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero sean escasos y muy limitados. Sin embargo, algunos estudios señalan el RCP8.5 como uno de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero más realistas, ya que las emisiones de GEIs en los últimos años han estado más próximas a este escenario (Schwalm *et al.*, 2020). Además, desde el punto de vista del análisis de riesgos de eventos extremos, siempre es preferible tomar una perspectiva más conservadora, que considere el peor escenario posible, para

así aplicar medidas de adaptación y mitigación suficientes.

3.2. *MeteoGalicia*

Los datos diarios de precipitación medidos por los pluviómetros de MeteoGalicia (Unidad de Observación y Predicción Meteorológica de Galicia) (www.meteogalicia.gal), se utilizaron para realizar comparaciones con los datos ofrecidos por los modelos de CORDEX y así evaluar la eficiencia de estos modelos en el área de estudio. Para ello, se seleccionaron aquellos pluviómetros de MeteoGalicia incluidos en la cuenca del Miño-Sil que tenían disponibles datos desde, al menos, 2008, con el fin de tener datos suficientes para realizar una buena comparación. En este sentido, se descargaron los datos de 54 pluviómetros para el período 2008-2020.

3.3. *Modelo Hidrológico HEC-HMS*

Se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS (Feldman, 2000; Scharffenberg, 2018; U.S. Army Corps of Engineers, 2018) para realizar el procesamiento hidrológico y transformar la precipitación en el caudal correspondiente (Cea y Fraga, 2018; González-Cao *et al.*, 2019; Fraga *et al.*, 2020; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020). El modelo fue parametrizado atendiendo a las calibraciones y validaciones previas realizadas en un estudio en donde se desarrolló un sistema de alerta temprana para el río Miño (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020).

3.4. *Metodología*

De entre los 31 modelos de CORDEX con datos de precipitación disponibles para la zona de estudio, solamente se tuvieron en cuenta para el estudio aquellos que presentaron una alta fiabilidad a la hora de representar la precipitación en la cuenca del Miño-Sil.

Para realizar esta validación, se compararon los valores de precipitación obtenidos por estos modelos con los datos registrados por los 54 pluviómetros de MeteoGalicia disponibles para el período 2008-2020 en la zona de estudio. Esta validación se realizó mediante dos métodos estadísticos: el test de solapamiento o de Perkins (Perkins *et al.*, 2007) y el análisis de la desviación de los valores más extremos, donde se analiza el valor del percentil 99 de los pluviómetros y el correspondiente de cada modelo, y se compara la diferencia entre ambos con respecto al valor observado en el pluviómetro, obteniendo así el porcentaje de desviación:

$$Desv = 100 \times \frac{abs(P_{pl}^{99} - P_{co}^{99})}{P_{pl}^{99}}$$

Donde P_{pl}^{99} es el percentil 99 del pluviómetro, P_{co}^{99} el percentil 99 de CORDEX correspondiente al píxel en el que se localiza el pluviómetro y *abs* se refiere al valor absoluto.

Estos dos métodos para la validación son complementarios, permitiendo una mejor validación de los modelos (Des *et al.*, 2021). Por un lado, el test de solapamiento o de Perkins permite la evaluación de toda la serie mientras, por otro lado, el análisis de los valores extremos permite analizar como divergen aquellos valores más críticos, que son los más importantes para el desarrollo de este estudio.

Considerando cada modelo de CORDEX, se calculan tanto el test de Perkins como la desviación de los valores extremos para cada pluviómetro y su punto correspondiente en el modelo, con lo que se van a obtener 54 valores para cada modelo, a los cuales se le hace el promedio obteniendo así el dato representativo de cada modelo para la cuenca. Para que el modelo sea considerado válido, debe cumplir simultáneamente dos condiciones: que

el promedio del test de Perkins sea superior al 90%, y que el promedio de la desviación de los valores extremos sea inferior al 30%. Los modelos de CORDEX que cumplan estos requisitos serán los que se tendrán en cuenta para analizar la evolución de las precipitaciones y caudales en el futuro. Este análisis se llevará a cabo analizando, primeramente, los cambios esperados en la precipitación media en el futuro respecto al período histórico, tanto a nivel anual como estacional, y también analizando los cambios en las precipitaciones extremas. También se evaluarán los cambios esperados en las situaciones extremas de precipitación analizando los cambios en los valores asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia, lo que se conoce como periodos de retorno. Esto permitirá estimar cómo se espera que cambien estos eventos extremos en el futuro, que son los más relevantes a nivel de impacto sobre las actividades socio-económicas, infraestructuras y población. Tras obtener los datos individuales para cada modelo, se realizará el promedio de los resultados de todos los modelos para poder analizar los resultados desde un enfoque multi-modelo. Este procesado se realiza puesto que estudios previos evidencian que un enfoque multi-modelo limita los errores de cada modelo por separado y favorece la consistencia de los datos (Jacob *et al.*, 2014).

Una vez analizada la precipitación, los datos de precipitación de cada modelo válido de CORDEX se introducirán en el modelo hidrológico y se obtendrán los caudales diarios representativos de las principales ciudades de la cuenca Miño-Sil, así como en su desembocadura, tanto para el período histórico (1990-2019) como para el período futuro más lejano (2070-2099). Poniendo el foco en la evolución de los caudales extremos, este procesado permitirá estudiar y analizar la

evolución futura de estos caudales críticos en diferentes localidades de la cuenca mediante un procedimiento similar al comentado anteriormente: primero observando y analizando el cambio individual arrojado por cada modelo en referencia a diferentes períodos de retorno, y posteriormente analizando los cambios según un enfoque multi-modelo. Mediante este enfoque se podrá evaluar si las situaciones de caudal extremo, aquellas que conllevan un importante riesgo de inundación asociado, se van a intensificar en el futuro.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de los modelos climáticos

En primer lugar, se ha analizado que modelos disponibles de CORDEX, para la región de estudio, son capaces de representar adecuadamente los patrones característicos de precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Para ello, se han comparado los datos de cada modelo disponible (Tabla 1, donde un número fue asignado a cada modelo) con los registros de precipitación de los pluviómetros gestionados por MeteoGalicia, para el período 2008-2020. Esta comparación se realizó para los meses lluviosos (de noviembre a marzo), puesto que es el período cuando existe una mayor probabilidad de precipitaciones intensas e inundaciones en la zona de estudio (González-Cao *et al.*, 2019; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2022). Como se ha comentado, los criterios de validación para los modelos implican un valor en el test de Perkins superior al 90% y una desviación de los valores extremos menor al 30%. Los modelos 1, 4, 6, 13, 14, 26 y 29 son los que cumplen ambos criterios y, por lo tanto, serán los que se tendrán en cuenta en el desarrollo de este estudio.

#	Modelo Climático Global // Regional	Test de Perkins	Desviación Extremos
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom//CCLM4-8-17	Sí	Sí
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RMIB-UGent//ALARO-0	-	-
3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_SMH// RCA4	-	-
4	ICHEC-EC-EARTH_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
5	ICHEC-EC-EARTH_DMI//HIRHAM5	Sí	-
6	ICHEC-EC-EARTH_KNMI// RACMO22	Sí	Sí
7	ICHEC-EC-EARTH_SMHI//RCA4	-	Sí
8	IPSL-IPSL-CM5A-MR_DMI//HIRHAM5	-	-
9	IPSL-IPSL-CM5A-MR_GERICs//REMO2015	-	-
10	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS// WRF331F	-	-
11	IPSL-IPSL-CM5A-MR_KNMI//RACMO22E	-	-
12	IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMH// RCA4	-	-
13	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom// CCLM4-8-17	Sí	Sí
14	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
15	MOHC-HadGEM2-ES_CNRM//ALADIN63	-	-
16	MOHC-HadGEM2-ES_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
17	MOHC-HadGEM2-ES_SMHI//RCA4	-	-
18	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom// CCLM4-8-17	-	-
19	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	-
20	MPI-M-MPI-ESM-LR_CNRM//ALADIN63	-	-
21	MPI-M-MPI-ESM-LR_DMI//HIRHAM5	-	-
22	MPI-M-MPI-ESM-LR_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
23	MPI-M-MPI-ESM-LR_KNMI//RACMO22E	-	-
24	MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC//REMO2009	-	-
25	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI//RCA4	-	-
26	NCC-NorESM1-M_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
27	NCC-NorESM1-M_CNRM//ALADIN63	-	-
28	NCC-NorESM1-M_GERICs//REMO2015	-	-
29	NCC-NorESM1-M_IPSL//WRF381P	Sí	Sí
30	NCC-NorESM1-M_KNMI//RACMO22E	-	Sí
31	NCC-NorESM1-M_SMHI//RCA4	-	-

Tabla 1. Validación de los modelos climáticos de CORDEX con precipitación diaria y proyecciones del RCP8.5, disponibles para la cuenca del Miño-Sil. Los modelos con un valor del test de Perkins superior al 90% y una desviación en los valores extremos menor del 30%, serán considerados como válidos (marcados en verde).

4.2. Análisis de la precipitación obtenida a través de los modelos climáticos y sus proyecciones futuras

La precipitación característica de la cuenca del Miño-Sil, en el período histórico considerado, que ofrecen los modelos de CORDEX validados, tanto a nivel anual como estacional, será analizada y contrastada en este apartado. Además, se profundizará en la estimación y evaluación de los cambios futuros esperados como consecuencia del cambio climático.

En la Figura 2 se muestra la distribución anual de precipitación para el período histórico (1990-2019) a partir del promedio ofrecido por los 7 modelos

válidos seleccionados. Se puede apreciar que la zona final de la cuenca (suroeste) es la que presenta los mayores valores de precipitación, superando en algunas zonas los 6 mm diarios de media. Este valor se traduce en más de 2000 mm de precipitación acumulados a lo largo del año. Por otra parte, los menores valores de precipitación se detectan en las zonas interiores del río Sil y del río Miño superior, con valores inferiores a 3 mm diarios de media, que implican una precipitación acumulada de aproximadamente 1000 mm a lo largo del año. El valor anual promedio de la precipitación para el período histórico

proporcionado por los modelos es de 3.74 mm diarios, que se corresponde con una precipitación acumulada de aproximadamente 1365 mm anuales para la cuenca. Una vez obtenidos los datos que arrojan los modelos válidos, estos se contrastaron con estudios previos que analizan la precipitación característica de la cuenca del Miño-Sil utilizando datos reales medidos (Cortizas y Alberti, 1999), resultando que los valores de precipitación y variabilidad indicados por los modelos se aproximan a la realidad de la cuenca. Por lo tanto, se puede concluir que los modelos utilizados ofrecen una buena representatividad de la realidad a escala anual, tanto de los valores de precipitación en términos absolutos como en su variabilidad espacial.

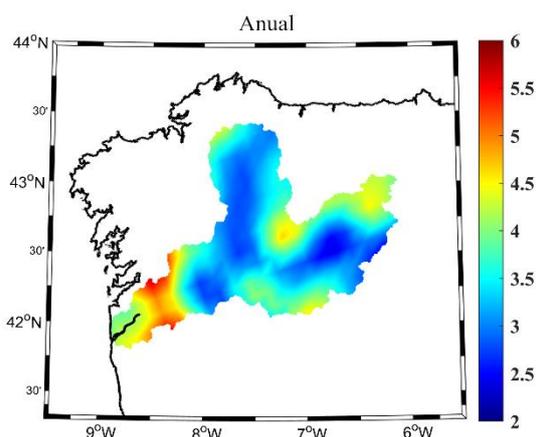


Figura 2. Valores medios de precipitación a escala anual (mm/día), promediando los resultados ofrecidos por los 7 modelos válidos para el período histórico considerado (1990-2019).

Una vez analizados los valores medios de la precipitación a escala anual, se evaluaron los cambios esperados de cara al futuro (Figura 3). Se identifica un ligero descenso en los valores medios de precipitación anual hacia el futuro cercano (Figura 3a), con un descenso promedio para la cuenca en torno al 8.50% respecto al período histórico. Hacia finales de siglo, cabe esperar un descenso más drástico de la precipitación (Figura 3b), lo que

confirma la tendencia hacia una probable disminución en la frecuencia de las precipitaciones. Según indican los valores obtenidos, en el futuro lejano puede llover alrededor de un 20% menos que en la actualidad a escala anual. Estudios previos centrados en la Península Ibérica reafirman las expectativas de disminución de la precipitación media a lo largo del siglo XXI (Morata, 2014), situación que ya fue observada en los años más recientes en muchas zonas de la Península Ibérica (Inundaciones y Cambio Climático, 2018). En concreto, estudios previos llevados a cabo en la cuenca del Miño-Sil, mediante diferentes modelizaciones, también detectaron una futura disminución de la precipitación media anual, con valores en rangos similares a los obtenidos en el desarrollo del presente estudio (Morata, 2014).

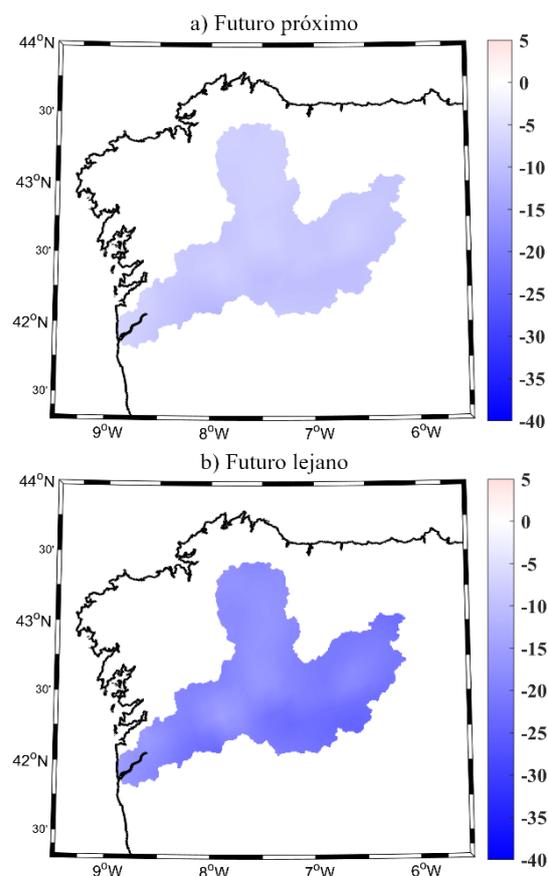


Figura 3. Cambios en las precipitaciones medias anuales (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) futuro lejano (2070-2099), promediando los 7 modelos válidos.

A pesar de que la tendencia indica una disminución de la lluvia en el futuro a escala anual, también es fundamental analizar en qué épocas se van a producir esos cambios en la precipitación, es decir, como se distribuirán esas variaciones a lo largo de las diferentes estaciones del año. A continuación, se caracterizará la precipitación a escala estacional, junto con los cambios esperados. Así, en la Figura 4 se muestra la distribución estacional de las precipitaciones en referencia al período histórico, lo que permite apreciar las variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del año. En general, se observan patrones espaciales semejantes a la media anual, por lo que las variaciones se dan principalmente en los valores absolutos, a excepción de los meses de verano, donde la menor precipitación se da en la parte final de la cuenca. En particular, la estación más seca es el verano, registrándose una media en torno a los 1.30 mm diarios, lo que equivale aproximadamente a 120 mm de lluvia acumulados durante la estación. Por otro lado, la mayor precipitación a escala estacional tiene lugar durante el invierno, donde en promedio se tiene una precipitación de 6.21 mm diarios, que supera los 9 mm en algunas zonas cercanas a la desembocadura. Esto supone una precipitación acumulada a lo largo de la estación en el entorno de los 550 mm, que puede superar los 800 mm acumulados cerca de la desembocadura. Se dan valores intermedios en primavera y en otoño, con un valor promedio para la cuenca de 3,88 y 3,63 mm diarios, respectivamente. Nuevamente, estos valores concuerdan con los datos obtenidos en estudios previos (Cortizas y Alberti, 1999). En cuanto a los cambios que se esperan en el futuro, en la Figura 5 se puede

observar cómo en todas las estaciones se espera una disminución de la lluvia, que será más acusada en el futuro lejano. El verano presentará la reducción porcentual más drástica en la precipitación, donde la disminución será superior al 20% en media para la cuenca en el futuro próximo, pero que alcanzará un descenso promedio cercano al 40% en el futuro lejano. Por tanto, se espera que a finales de siglo llueva casi la mitad en verano de lo que llueve actualmente, atendiendo a los resultados arrojados por los modelos analizados. Esto puede tener consecuencias críticas ya que, como se ha mostrado anteriormente, el verano es la época en la que menos llueve con diferencia y, a mayores, se va a experimentar la mayor disminución relativa en precipitación, lo que puede provocar importantes problemas de disponibilidad de agua en la cuenca en el futuro. De hecho, esta mayor pérdida de precipitación en la época estival detectada en este estudio es coherente con los resultados obtenidos en estudios previos (Morata, 2014), lo que corrobora esa situación crítica de escasez de agua hacia la que se tiende en el futuro en los meses más cálidos en la cuenca del Miño-Sil. En el lado opuesto se encuentra el invierno, que es la estación que menos va a sufrir ese decrecimiento de la precipitación, con escasas disminuciones en el futuro próximo (~ 5%), y con valores en torno al 10% de disminución a finales de siglo en promedio para la cuenca. La primavera y el otoño presentan disminuciones intermedias, con valores promedio de 7.73% y 9.82%, respectivamente en el futuro próximo, que se incrementarán hasta alcanzar bajadas de 25.90% y 22.04%, respectivamente, para el futuro lejano.

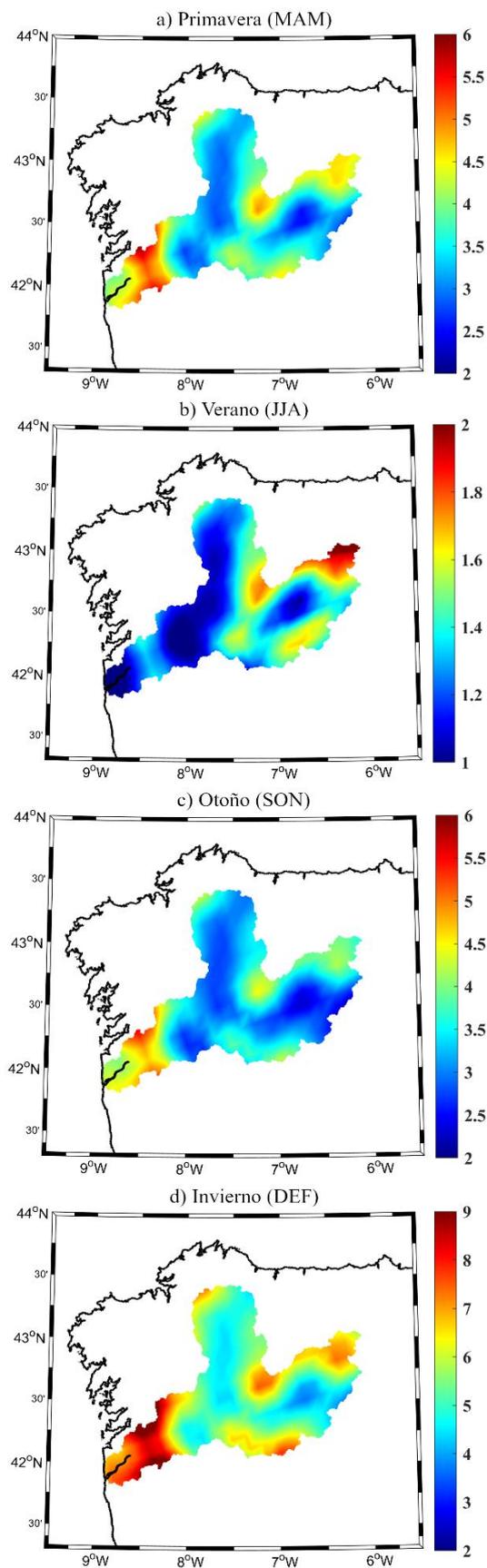


Figura 4. Valores medios de la precipitación para cada estación (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019). Entre paréntesis se indican los meses considerados para cada estación.

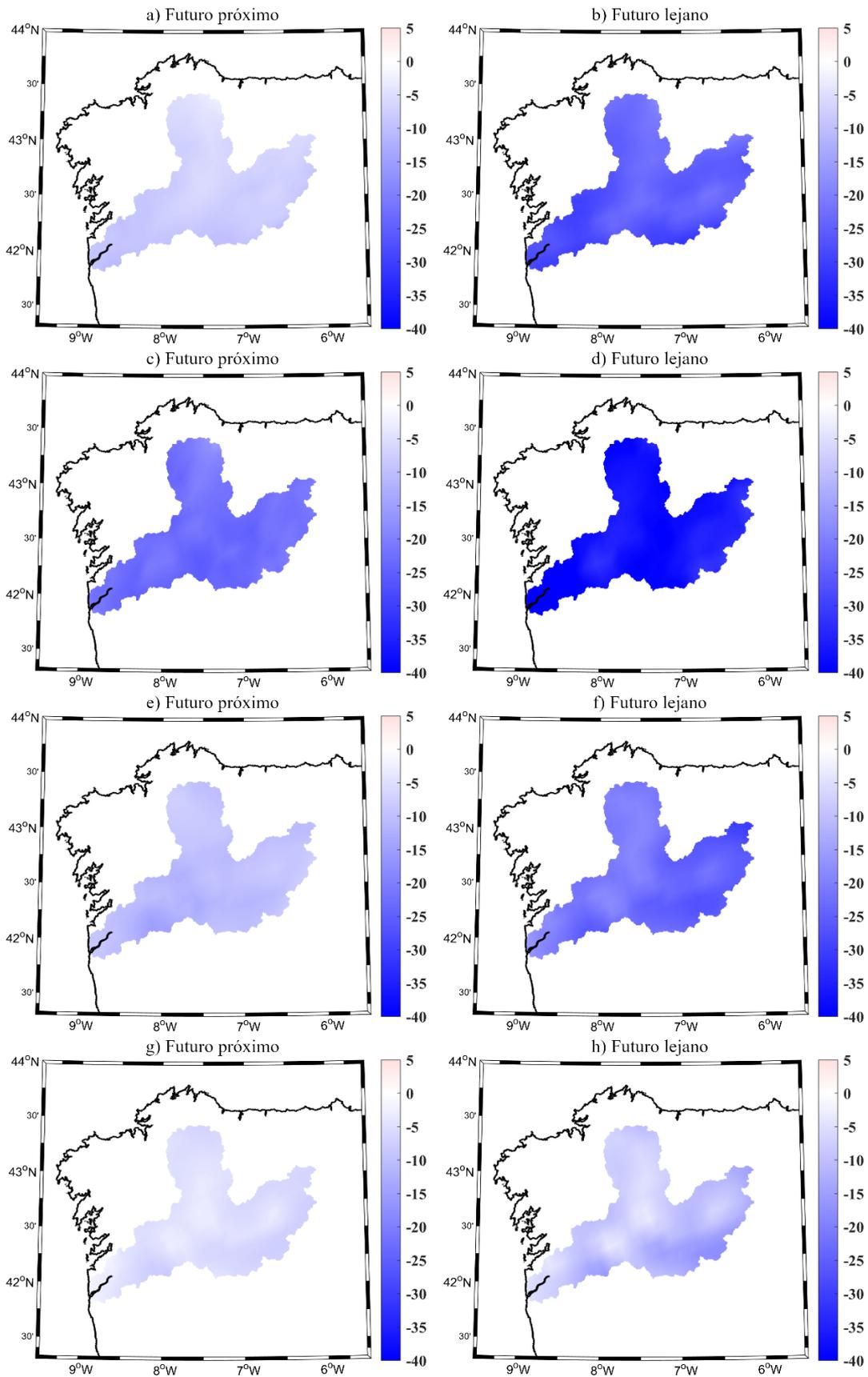


Figura 5. Cambios en las precipitaciones medias estacionales (%) en el futuro próximo (2030-2059) y lejano (2070-2099) promediando los 7 modelos válidos. a) y b) primavera, c) y d) verano, e) y f) otoño, g) y h) invierno.

4.3. Valores extremos de precipitación y sus proyecciones futuras

Los resultados obtenidos indicaron que, de forma general, la precipitación en la cuenca del Miño-Sil va a disminuir en el futuro, tanto a escala anual como estacional. Sin embargo, también es relevante analizar de forma particular los valores más extremos, considerados aquellos que superen el percentil 99.9 de precipitación, ya que pueden llevar asociados eventos de inundación. Así, se caracterizarán los eventos extremos y se analizará su evolución futura.

El patrón medio de precipitaciones extremas presenta una distribución espacial similar a la precipitación media anual, con los valores más altos en la zona próxima a la desembocadura y los valores más bajos en las zonas interiores de la cuenca (Figura 6). La media de valores extremos considerados en toda la cuenca es de 73.28 mm diarios, pudiendo llegar a superar los 100 mm diarios en las zonas próximas a la desembocadura.

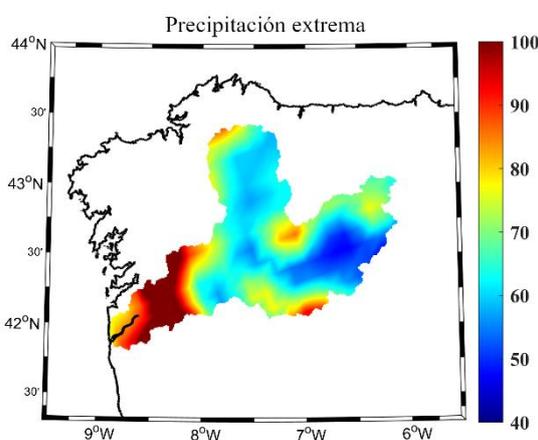


Figura 6. Valores extremos de precipitación (percentil 99.9) en la cuenca del Miño-Sil (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019).

Una vez evaluado el patrón medio de precipitaciones extremas, se analizó su evolución futura (Figura 7). El futuro próximo presenta una evolución variable a escala espacial, ya que en unas zonas de la cuenca la precipitación extrema aumentaría (principalmente en

la cuenca del río Sil), disminuyendo en otras (principalmente en la cuenca del río Miño) (Figura 7a). A pesar de esa variabilidad espacial, en promedio la cuenca muestra una ligera tendencia a la intensificación de los valores extremos en el futuro próximo (2.62%). En el futuro más lejano la tendencia apunta más claramente hacia un aumento en la intensidad de los valores extremos de forma general para toda la cuenca, con un aumento medio del 6.44%, llegando a superar el 10% en una parte importante de la cuenca (Figura 7b). Estos resultados corroboran el pronóstico de que los eventos de precipitación serán más intensos con el paso de los años, lo que puede llevar asociadas inundaciones más importantes.

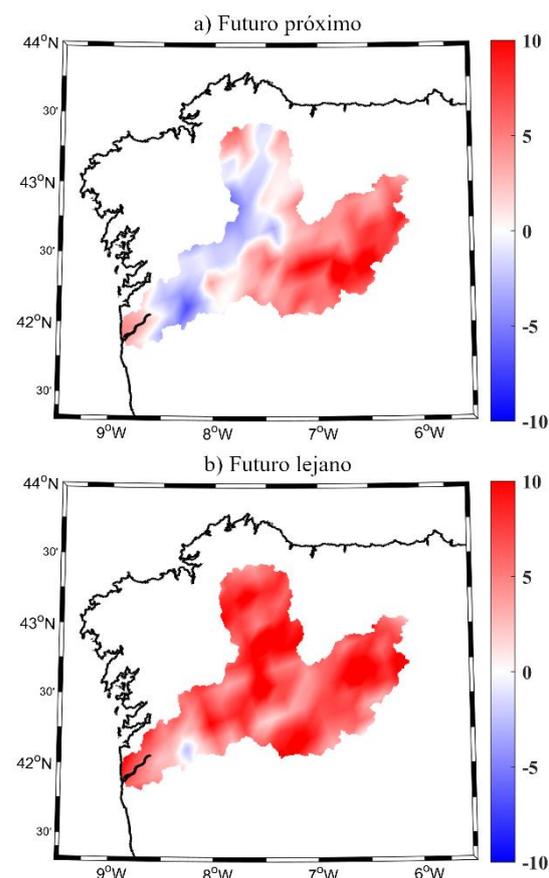


Figura 7. Cambios en los valores extremos de precipitación (percentil 99.9) (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) lejano (2070-2099), promediando los 7 modelos válidos.

Una vez confirmado que, a pesar de la disminución general de las precipitaciones medias, los eventos más extremos tienden a intensificarse, se analizará este punto en más profundidad haciendo una evaluación en términos de períodos de retorno, es decir, aquellos eventos que tienden a darse una vez cada ciertos años. Se van a considerar diferentes períodos de retorno (10, 25, 50 y 100 años), calculándose tanto a nivel diario, como aplicando una media móvil a 3 días, es decir, la lluvia acumulada en 3 días, ya que los frentes que llegan a la cuenca suelen tener varios días de duración (Cabalar, 2000). Considerando el análisis a nivel diario, de los 7 modelos climáticos validados, 4 de ellos muestran un aumento de precipitaciones extremas en términos de períodos de retorno para el futuro próximo, mientras que 5 confirman esta tendencia para el futuro lejano (Tabla 2). Por lo tanto, el mayor aumento, y más robusto, se da para el futuro lejano. Considerando la media de precipitación de 3 días (Tabla 3), en el futuro lejano la mayoría de modelos también indican un aumento de las precipitaciones extremas asociadas a períodos de retorno, mientras que para el futuro próximo existe mayor incertidumbre. Las Tablas 4 y 5 muestran los valores de precipitación extrema para los diferentes periodos de retorno promediando los resultados ofrecidos por todos los modelos climáticos considerados. En promedio, los modelos indican un aumento muy ligero en el futuro próximo, pero que se intensificará a finales de siglo. Concretamente, se observa un ligero aumento de los valores de precipitación de cara al futuro próximo de apenas 0.5 mm en promedio, que se vuelve considerablemente mayor si nos enfocamos en el futuro lejano, desde un incremento de aproximadamente 10 mm para el menor período de retorno considerado, llegando hasta 20 mm para

el período de retorno de 100 años, considerando los datos diarios (Tabla 4). Estos valores, en términos relativos, implican un aumento aproximado del 12% para la precipitación correspondiente al período de retorno de 10 años, que se incrementa hasta alcanzar un 17% para el período de retorno de 100 años. Al analizar los resultados considerando la media móvil a 3 días (Tabla 5), el promedio de los modelos también indica un ligero aumento de los diferentes períodos de retorno considerados en el futuro próximo, aún a pesar de la incertidumbre asociada a que prácticamente tantos modelos indicaban disminución como aumento en este período. A finales de siglo la tendencia nuevamente es más clara, con un aumento aproximado en el entorno del 7% para el período de retorno de 10 años, que aumenta hasta un 10% para el valor del período de retorno de 100 años. En ambos casos se observa que, cuanto más alto es el período de retorno considerado, las precipitaciones extremas tendrán un mayor porcentaje de intensificación, de forma que los eventos más extremos son los que experimentarán un aumento todavía mayor. Estudios previos que analizaron algunos modelos de EURO-CORDEX a través de un downscaling dinámico, disponible en AEMET, también concluyeron que, a pesar de que se espera una disminución de las precipitaciones medias en la cuenca del Miño-Sil, los eventos extremos de precipitación tenderán a intensificarse (Inundaciones y Cambio Climático, 2018), lo que refuerza los resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo. Lorenzo y Alvarez, 2020, mediante un análisis general de proyecciones futuras de precipitación para toda la Península Ibérica, también obtuvieron una tendencia hacia el incremento de los eventos extremos de precipitación en la cuenca del Miño-Sil.

Futuro próximo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	H	F_p												
P^{R10}	76	84	83	80	79	79	76	72	74	76	78	83	70	65
P^{R25}	87	98	96	94	92	92	90	85	88	90	91	96	83	74
P^{R50}	95	108	107	105	101	103	101	95	97	101	101	106	92	81
P^{R100}	103	118	117	115	110	112	112	105	107	111	111	115	101	87
Futuro lejano														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	H	F_l												
P^{R10}	76	83	83	79	79	84	76	107	74	93	78	87	70	69
P^{R25}	87	96	96	93	92	98	90	134	88	115	91	103	83	81
P^{R50}	95	105	107	103	101	108	101	154	97	131	101	114	92	90
P^{R100}	103	115	117	113	110	118	112	174	107	146	111	125	101	99

Tabla 2. Valores de precipitación extrema en la cuenca Miño-Sil para cada modelo válido (Mod) según diferentes periodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando datos diarios. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.

Futuro próximo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	H	F_p	H	F_p	H	F_p	H	F_p	H	F_p	H	F_p	H	F_p
P^{R10}	44	55	51	47	49	48	49	47	52	52	45	51	45	40
P^{R25}	50	66	60	56	56	56	57	56	62	61	52	61	54	45
P^{R50}	54	74	67	63	62	62	64	62	69	69	57	68	60	49
P^{R100}	58	83	73	69	67	68	70	68	77	76	63	75	67	54
Futuro lejano														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	H	F_l	H	F_l	H	F_l	H	F_l	H	F_l	H	F_l	H	F_l
P^{R10}	44	50	51	48	49	49	49	62	52	63	45	48	45	40
P^{R25}	50	58	60	56	56	57	57	75	62	77	52	56	54	48
P^{R50}	54	64	67	63	62	62	64	85	69	88	57	62	60	53
P^{R100}	58	70	73	69	67	68	70	95	77	98	63	68	67	58

Tabla 3. Valores de precipitación extrema en la cuenca Miño-Sil para cada modelo válido (Mod) según diferentes periodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando 3 días de lluvia acumulada. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.

P^R	H	F_p	F_l
P^{R10}	76.58 ± 3.97	76.96 ± 6.67	86.11 ± 11.69
P^{R25}	89.54 ± 4.34	89.97 ± 8.15	102.70 ± 16.96
P^{R50}	99.16 ± 4.79	99.63 ± 9.37	115.02 ± 20.91
P^{R100}	108.70 ± 5.34	109.21 ± 10.61	127.23 ± 25.01

Tabla 4. Promedio y desviación estándar de la precipitación, promediando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando datos diarios.

P^R	H	F_p	F_l
P^{R10}	47.96 ± 3.36	48.69 ± 4.89	51.34 ± 8.02
P^{R25}	55.94 ± 4.42	57.37 ± 6.56	60.93 ± 10.82
P^{R50}	61.86 ± 5.29	63.81 ± 7.83	68.06 ± 12.91
P^{R100}	67.73 ± 6.19	70.20 ± 9.07	75.12 ± 15.03

Tabla 5. Promedio y desviación estándar de la precipitación, promediando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando 3 días de lluvia acumulada.

4.4. Proyecciones futuras de caudales extremos

Los resultados obtenidos en los análisis previos indicaron una disminución, en promedio, de la precipitación en el futuro. Sin embargo, también se detectó que las precipitaciones extremas, cuando se produzcan, van a ocurrir con mayor intensidad en el futuro, lo que implicará eventos de precipitación cada vez más extremos. Esta intensificación de los eventos extremos de precipitación puede tener unas consecuencias importantes sobre las poblaciones, ya que pueden dar lugar al desbordamiento de los ríos, lo que puede provocar inundaciones cada vez más devastadoras. En este sentido, para analizar la correspondiente evolución de los caudales, los datos diarios de precipitación proporcionados por los 7 modelos climáticos validados se introdujeron en el modelo hidrológico, para obtener y analizar cómo se verán afectados los eventos extremos de caudal en las principales ciudades de la

cuenca del Miño-Sil, contrastando los valores esperados de cara al futuro con los obtenidos para el período histórico. Dado que los modelos muestran un inequívoco y robusto incremento de las precipitaciones extremas en el futuro lejano, el análisis de los caudales se centrará en los cambios esperados a final de siglo (2070-2099) (Tabla 6).

En el área correspondiente a Lugo, los resultados no son muy claros, ya que 4 modelos indican un aumento moderado de los caudales extremos, mientras que los otros 3 indican una disminución. Al focalizarnos en otras áreas de estudio, los cambios son más consistentes. Para las áreas correspondientes a Ponferrada y O Barco, se detecta una tendencia hacia la intensificación de los caudales extremos en 6 de los 7 modelos, aunque también indican que ésta será moderada. En cuanto a las áreas correspondientes a Ourense y a la desembocadura de la cuenca, todos los modelos indican de forma unánime que los caudales extremos van a experimentar una intensificación de mayor magnitud.

Lugo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	<i>H</i>	<i>F_l</i>												
p^R10	702	819	808	725	575	592	701	933	1001	876	851	804	321	475
p^R25	863	1014	1039	915	731	738	888	1205	1332	1130	1082	1021	388	595
p^R50	902	1158	1211	1056	846	846	1028	1407	1578	1318	1253	1182	438	685
p^R100	1101	1301	1381	1196	960	954	1166	1608	1821	1505	1423	1342	488	773
Ponferrada														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	<i>H</i>	<i>F_l</i>												
p^R10	737	788	570	636	666	701	566	872	636	889	623	544	596	762
p^R25	963	991	719	806	827	865	714	1139	811	1180	770	683	754	1006
p^R50	1095	1142	829	933	946	986	825	1338	941	1395	880	786	871	1187
p^R100	1247	1292	938	1058	1064	1107	934	1534	1069	1609	988	888	987	1367
O Barco														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	<i>H</i>	<i>F_l</i>												
p^R10	1329	1434	856	1096	919	959	926	1288	1139	1390	924	884	839	943
p^R25	1668	1792	1046	1381	1127	1167	1153	1647	1457	1800	1105	1077	1038	1194
p^R50	1919	2058	1188	1592	1282	1321	1322	1913	1693	2105	1238	1220	1186	1381
p^R100	2169	2321	1328	1802	1436	1474	1489	2176	1928	2407	1371	1362	1332	1565
Ourense														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	<i>H</i>	<i>F_l</i>												
p^R10	3379	4280	2666	3232	2704	2985	2838	4249	3330	4213	2659	2894	2229	2630
p^R25	4179	5333	3254	4009	3280	3586	3511	5440	4201	5416	3191	3539	2710	3325
p^R50	4773	6115	3691	4587	3709	4033	4012	6326	4847	6310	3586	4019	3067	3842
p^R100	5362	6891	4124	5159	4133	4476	4508	7203	5488	7195	3978	4494	3421	4353
Desembocadura														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
P^R	<i>H</i>	<i>F_l</i>												
p^R10	4224	5349	3333	4040	3379	3731	3547	5311	4162	5266	3324	3617	2787	3288
p^R25	5224	6666	4068	5011	4100	4483	4389	6800	5251	6700	3989	4424	3388	4157
p^R50	5966	7644	4614	5733	4636	5041	5015	7907	6059	7887	4483	5023	3834	4802
p^R100	6702	8613	5155	6448	5166	5595	5635	9003	6860	8994	4972	5617	4276	5442

Tabla 6. Valores de caudal extremo en las principales localizaciones de la cuenca según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (*H*) y el futuro lejano (*F_l*). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

En la Tabla 7 se muestran los valores extremos de caudal para los diferentes períodos de retorno y los períodos histórico y futuro, promediando los resultados de los 7 modelos validados. En promedio, se espera un aumento de un 4~5% para la localidad de Lugo (Miño Alto), lo que supone una intensificación, aunque ligera, en comparación con otras localidades. En Ponferrada (río Sil), el aumento en la intensidad de los caudales extremos ronda entre un 18% y un 23% según el período de retorno considerado. De la misma forma, en O Barco (río Sil) este incremento será de entre un 15% y un 18%. Los cambios más notables se producirán en la localidad de Ourense (Miño medio) y en la desembocadura (Miño bajo), con aumentos desde un 24% para un período de retorno de 10 años, hasta un 28% para un período de retorno de 100 años. Estos resultados corroboran que los eventos extremos de caudal cada vez serán más críticos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil. Muchas de estas localizaciones, que están sujetas a inundaciones cuando el río Miño y sus afluentes sobrepasan ciertos umbrales de caudal (González-Cao *et al.*, 2019; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020, 2022), sufrirán consecuencias cada vez más frecuentes y drásticas debido a esta intensificación de los caudales extremos, por lo que será necesaria la aplicación de medidas de mitigación y/o adaptación para contrarrestar el incremento futuro de esta problemática. Estudios previos de carácter más general, a nivel europeo, en donde se analizan los cambios esperados en los caudales extremos a través de la inclusión de las variables climáticas proyectadas en modelos hidrológicos, también obtuvieron una intensificación de los caudales extremos y riesgo de inundación para la cuenca del Miño-Sil a medida que avanza el siglo (Alfieri *et al.*, 2015a), resultados corroborados en

Inundaciones y Cambio Climático, 2018, lo que va en consonancia y muestra la robustez de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

	Lugo	
p^R	H	F_l
p^{R10}	708.57 ± 217.59	746.35 ± 162.30
p^{R25}	903.36 ± 297.51	945.40 ± 215.32
p^{R50}	1048.09 ± 357.44	1093.28 ± 255.10
p^{R100}	1191.45 ± 417.02	1239.76 ± 294.68
	Ponferrada	
p^R	H	F_l
p^{R10}	627.61 ± 60.11	741.69 ± 124.72
p^{R25}	790.95 ± 79.13	952.75 ± 179.25
p^{R50}	912.31 ± 209.36	1109.56 ± 220.66
p^{R100}	1032.51 ± 108.61	1264.89 ± 262.06
	O Barco	
p^R	H	F_l
p^{R10}	990.37 ± 178.48	1142.13 ± 227.19
p^{R25}	1227.75 ± 240.07	1436.75 ± 303.33
p^{R50}	1404.11 ± 286.53	1655.65 ± 367.73
p^{R100}	1578.79 ± 332.91	1872.46 ± 427.92
	Ourense	
p^R	H	F_l
p^{R10}	2829.22 ± 405.01	3497.32 ± 723.24
p^{R25}	3475.17 ± 544.02	4378.41 ± 974.14
p^{R50}	3955.09 ± 648.76	5033.01 ± 1163.28
p^{R100}	4430.45 ± 752.64	5681.41 ± 1352.06
	Desembocadura	
p^R	H	F_l
p^{R10}	3536.53 ± 506.26	4371.66 ± 904.05
p^{R25}	4343.96 ± 680.01	5473.01 ± 1217.57
p^{R50}	4943.86 ± 810.66	6291.26 ± 1454.13
p^{R100}	5538.06 ± 940.78	7101.77 ± 1689.89

Tabla 7. Promedio y desviación estándar del caudal extremo, considerando los resultados de todos los modelos válidos en las principales localizaciones de la cuenca, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo consistió en analizar la evolución futura de las precipitaciones extremas en la cuenca del Miño-Sil, así como los cambios esperados en los caudales extremos asociados en las principales localidades de la cuenca, que incluyen las ciudades de Lugo, Ponferrada, O Barco y Ourense, así como el río Miño en su desembocadura. Para ello, se emplearon datos de precipitación obtenidos de 7 RCMs de la rama europea del proyecto CORDEX seleccionados tras una validación, considerando un período histórico (1990-2019) y dos períodos futuros: uno próximo (2030-2059) y otro lejano (2070-2099), bajo el escenario de emisiones RCP8.5. En primer lugar, se analizaron las proyecciones futuras de la precipitación, con especial atención a la evolución de sus valores extremos. Una vez realizado dicho análisis, con los datos de precipitación se alimentó un modelo hidrológico que permitió obtener el caudal fluvial correspondiente y analizar así la evolución futura de los caudales en la cuenca, con especial atención a aquellos caudales más extremos. Las principales conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- De forma general, se espera una disminución de la precipitación media anual en la cuenca del Miño-Sil. En particular, las proyecciones futuras indican una disminución media de un 8.50% para el futuro próximo, disminución que se espera que sea más acusada, en torno a un 20% en promedio para la cuenca, en el futuro lejano. La situación podría ser especialmente crítica en los meses de verano, puesto que se espera una disminución promedio cercana al 40% en el futuro lejano, lo cual puede conllevar problemas importantes de disponibilidad de agua.
- En cuanto a los eventos extremos de precipitación, cabe esperar una intensificación en el futuro. Se espera que los eventos de precipitación extremos (por encima del percentil 99.9), aumenten su intensidad en más de un 6% a finales de siglo en promedio para la cuenca. Analizando los valores extremos de precipitación en términos de períodos de retorno, se espera una intensificación en torno a un 12% a finales de siglo considerando un período de retorno de 10 años, que se incrementa hasta un 17% para el período de retorno de 100 años.
- El incremento de la precipitación extrema va a propiciar que los eventos extremos de caudal también se vean intensificados en el futuro. En zonas del alto Miño, como Lugo, existe una mayor incertidumbre en los resultados, aunque la tendencia en promedio es hacia una ligera intensificación de los caudales extremos. En el río Sil, el principal afluente del Miño, concretamente en áreas como Ponferrada y O Barco, los caudales extremos aumentarán de forma consistente, aunque de manera moderada. Ya aguas abajo de la desembocadura del río Sil en el río Miño, el incremento de los caudales extremos se verá todavía más intensificado. A la altura de la ciudad de Ourense y en la desembocadura del río Miño, se esperan intensificaciones de entre un 25% y un 30% al considerar un período de retorno del caudal de entre 10 y 100 años, con una mayor intensificación cuanto mayor es el período de retorno considerado, lo que indica que los caudales más extremos sufrirán una mayor intensificación. Esto dará lugar a más situaciones de desbordamiento de los ríos y mayor amplitud de las zonas inundadas, lo que tendrá consecuencias notables sobre las poblaciones afectadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los responsables del proyecto CORDEX y a Meteogalicia, por el suministro de los datos de precipitación. Los autores también agradecen a los desarrolladores del modelo hidrológico HEC-HMS por su desarrollo y la libre disponibilidad del modelo.

Bibliografía

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. y Forzieri, G. (2015a). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247-2260.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F. y Bianchi, A. (2015b). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199-212.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K. y Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5, 171-182.
- Arnell, N. W. y Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climate Change*, 134(3), 387-401.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... y Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.
- Cabalar Fuentes, M. (2005). Los temporales de lluvia y viento en Galicia. Propuesta de clasificación y análisis de tendencias (1961-2001). *Investigaciones geográficas*, 36, 103-118.
- Cea, L. y Fraga, I. (2018). Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54, 8774-8791.
- Cortizas, A. M. y Alberti, A. P. (1999). Atlas climático de Galicia. Xunta de Galicia, 187.
- Des, M., Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Gómez-Gesteira, J. L., Sousa, M. C. y Gómez-Gesteira, M. (2021). Modeling salinity drop in estuarine areas under extreme precipitation events within a context of climate change: Effect on bivalve mortality in Galician Rías Baixas. *Science of the Total Environment*, 790, 148147.
- Fekete, A., Tzavella, K. y Baumhauer, R. (2017). Spatial exposure aspects contributing to vulnerability and resilience assessments of urban critical infrastructure in a flood and blackout context. *Natural Hazards*, 86(1), 151-176.
- Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA; Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA.
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., deCastro, M. y Gómez-Gesteira, M. (2022). Multiscale flood risk assessment under climate change: the case of the Miño river in the city of Ourense, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3957-3972.
- Fernández Nóvoa, D., Des Villanueva, M. y Gómez Gesteira, M. (2021). O Cambio Climático. Esenciais. Breviarios de Divulgación do Saber. Universidade de Vigo. ISBN: 9788481588910.
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J. A., del Portal, C. R. y Gómez-Gesteira, M. (2020). MIDAS: A New Integrated Flood

- Early Warning System for the Miño River. *Water*, 12 (9), 3420.
- Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Des, M., Costoya, X., Mendes, R. y Gómez-Gesteira, M. (2017). Characterization of Iberian turbid plumes by means of synoptic patterns obtained through MODIS imagery. *Journal of Sea Research*, 126, 12-25.
- Fraga, I., Cea, L. y Puertas, J. (2020). MERLIN: a flood hazard forecasting system for coastal river reaches. *Natural Hazards*, 100 (3), 1171–1193.
- Giorgi, F., Jones, C. y Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58, 175-183.
- González-Cao, J., García-Feal, O., Fernández-Nóvoa, D., Domínguez-Alonso, J.M. y Gómez-Gesteira, M. (2019). Towards an automatic early warning system of flood hazards based on precipitation forecast: the case of the Miño River (NW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 2583-2595.
- Inundaciones y Cambio Climático (2018). Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid, 105.
- IPCC (2013). Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge University Press.
- IPCC (2021). Climate change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K. y Caud., N. (eds.)]. Cambridge University Press.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... y Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563-578.
- Jongman, B. (2018). Effective adaptation to rising flood risk. *Nature communications*, 9(1), 1-3.
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Wood, E. F., Villarini, G., Brayshaw, D. J. y Wade, A. J. (2011). Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 38(23).
- Lorenzo, M. N. y Alvarez, I. (2020). Climate change patterns in precipitation over Spain using CORDEX projections for 2021-2050. *Science of The Total Environment*, 723, 138014.
- Morata, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 197.
- Noji, E. K. (2000). The public health consequences of disasters, Prehospital and disaster medicine: the official journal of the National Association of EMS Physicians and the World Association for Emergency and Disaster Medicine in association with the Acute Care Foundation, 15 (4), 147-157.
- Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O. y Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J. y McAneney, J. (2007).

- Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate*, 20, 4356-4376.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. y Karlovits, G. (2018). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). User's Manual: Version 4.3. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA.
- Schwalm, C. R., Glendon, S. y Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656-19657.
- Trigo, I. F. (2006). Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 26, 127–143.
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. y Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24, 925–944.
- Trigo, R. M., Varino, F., Ramos, A. M., Valente, M. A., Zêzere, J. L., Vaquero, J. M., Gouveia, C. M. y Russo, A. (2014). The record precipitation and flood event in Iberia in december 1876: Description and synoptic analysis. *Frontiers in Earth Science*, 2, 3.
- Uriarte, A. (2013). *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Victoria-Gasteiz, Spain, 306.
- U.S. Army Corps of Engineers (2018). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual: Version 4.3. Institute for Water Resources Davis: Hydrologic Engineering Center. 2018.
- Zalasiewicz, J. y Williams, M. (2021). Climate change through Earth's history. *Climate Change*, 3–17.