

INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (EPRI) EN EL SEGUNDO CICLO DE APLICACIÓN DE LA DIRECTIVA DE INUNDACIONES (2007/60/CE)

METODOLOGÍA GENERAL

Diciembre 2018



ÍNDICE

1. Introducción	5
1.1. Contexto.....	5
1.2. Antecedentes	6
1.3. Contenido y objetivos del documento.....	8
2. Cambio climático e inundaciones. Conceptos generales	10
3. Hipótesis de partida	12
4. Influencia del cambio climático sobre las precipitaciones máximas diarias	16
5. Evaluación y cuantificación del nivel de cambio significativo	19
5.1. Generación de series nuevas de precipitación para el estudio de la incertidumbre.....	19
5.2. Número mínimo de modelos necesario para confirmar el cambio climático asociado a una celda.....	20
5.3. Cálculo del umbral de cambio significativo.....	22
6. Estimación de cambios en la precipitación máxima	25
6.1. Zonas con cambio en la precipitación máxima diaria	25
6.2. Cambios en la precipitación máxima acumulada.....	27
6.3. Localización de tramos de la red hídrica con cambios relevantes en la precipitación máxima acumulada	31
7. Valoración cualitativa de los cambios en la ley de frecuencia de caudales	33
7.1. Método racional modificado para el cálculo del caudal de T100	33
7.2. Valoración	36
8. Resumen.....	38
9. Bibliografía.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Países que han analizado la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación. Fuente: Radulescu, 2017	6
Figura 2.- Ubicación de las ARPSIs utilizadas en la metodología previa. (Fuente: Inundaciones y cambio climático. MITECO, 2018).....	7
Figura 3.- Límites del dominio Europa del proyecto CORDEX (EURO-CORDEX) utilizado en el estudio. Fuente: EURO-CORDEX.....	16
Figura 4.- Ejemplo de los análisis realizados para la selección del número mínimo de modelos que deben coincidir para considerar cambio climático en una celda, para el RCP 8.5	21
Figura 5.- Proceso de elección del umbral en las precipitaciones máximas diarias para el periodo de retorno de 100 años a partir de las 10.000 leyes de frecuencia obtenidas mediante el enfoque de simulaciones de Monte Carlo	22
Figura 6.- Número de celdas que presentan cambio por modelo según el intervalo de confianza, utilizando la mitad superior de los percentiles	23
Figura 7.- Distribución espacial de las celdas con cambio significativo positivo para distintos percentiles con al menos 6 modelos que indiquen cambio	24
Figura 8.- Cambios porcentuales de la precipitación en las celdas que cumplen los umbrales de significancia, para la España peninsular e islas Baleares y según el escenario de emisiones RCP 4.5	26
Figura 9.- Cambios porcentuales de la precipitación en las celdas que cumplen los umbrales de significancia, para la España peninsular e islas Baleares y según el escenario de emisiones RCP 8.5	26
Figura 10.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima actual. Fuente: CauMax	28
Figura 11.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima futuro según el escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 4.5.....	28
Figura 12.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima futuro según el escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 8.5.....	29
Figura 13.- Red hídrica creada a partir de las direcciones de drenaje	30
Figura 14.- Cambios por encima del umbral del 10% en la precipitación máxima diaria acumulada para la Demarcación Hidrográfica del Ebro, en el escenario de emisión RCP 4.5	32
Figura 15.- Cambios por encima del umbral del 10% en la precipitación máxima diaria acumulada para la Demarcación Hidrográfica del Ebro, en el escenario de emisión RCP 8.5	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Comparativa de las hipótesis de partida utilizadas en la primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación (2017) y las seguidas para incorporar el cambio climático en la EPRI de segundo ciclo (2018)	12
Tabla 2.- Combinaciones de modelos climáticos globales y regionales presentes del proyecto EURO-CORDEX .	14
Tabla 3.- Descripción de los parámetros de la fórmula para el cálculo del caudal según el método racional modificado	34
Tabla 4.- Descripción de los parámetros de la fórmula para el cálculo del coeficiente de escurrentía según el método racional modificado	35
Tabla 5.- Tabla tipo facilitada a las Confederaciones Hidrográficas con el estudio de los cambios porcentuales en precipitación y caudales para cada tramo valorado	36
Tabla 6.- Tabla tipo facilitada a las Confederaciones Hidrográficas con la valoración cualitativa de los cambios porcentuales observados en el estudio de sus tramos	37

1. Introducción

1.1. Contexto

La normativa comunitaria sobre inundaciones, la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, de 23 de octubre de 2007, relativa a la “Evaluación y la gestión de los riesgos de inundación”, denominada como Directiva de Inundaciones, y traspuesta al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, tiene entre sus objetivos generar nuevos instrumentos para reducir las posibles consecuencias de las inundaciones, a través de una actuación coordinada entre todas las administraciones y la sociedad. Para ello, establece 3 fases consecutivas de actuación, las cuales son de carácter cíclico, debiendo repetirse y revisarse cada 6 años.

Dentro de la Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI), la primera fase, para proporcionar una aproximación del riesgo potencial por inundación asociado a los cauces de cada Demarcación Hidrográfica, se han identificado las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs). Posteriormente, en la segunda fase, se han elaborado los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación sobre esos cauces con riesgo potencial seleccionados, según los distintos escenarios de probabilidad que requiere la Directiva.

La última fase supone la adopción y ejecución (de acuerdo con las competencias de cada Administración) de una serie de medidas escogidas específicamente para cada una de las zonas con riesgo estudiadas en las anteriores fases, según sus características de peligrosidad y riesgo y las particularidades de la cuenca. Estas medidas se recogen en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs), una herramienta clave de la Directiva para lograr los objetivos de gestión del riesgo de las zonas identificadas en la EPRI de cada Demarcación.

Una de las medidas propuestas en relación con la prevención (para reducir la vulnerabilidad) es la medida 13.04.01, que consiste en la elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación, como por ejemplo el estudio de las leyes de frecuencia de caudales, los efectos del cambio climático o la modelización de los riesgos de inundación y su evaluación, entre otras.

Es decir, la medida contempla la incorporación de la evaluación de los efectos del cambio climático sobre el riesgo de inundación, la cual deberá hacerse conjuntamente con la Oficina Española de Cambio Climático. Esta medida, además, cumple con una de las demandas exigidas por la Comisión Europea en la Directiva de Inundaciones, recogida en su artículo 14 del capítulo VIII, que dice que “las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones indicadas en los apartados 1 y 3”.

En otras palabras, el estudio de la influencia del cambio climático debe incluirse en la revisión de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación y de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación de segundo ciclo, que han de llevarse a cabo antes de finales de 2018 y de 2021, respectivamente.

Aunque la mayoría de ellos sí han tenido en cuenta la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación (Figura 1), la fase de la Directiva en la que se ha incorporado es bastante variable. Se ha implantado mayormente en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs), seguido de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) y en menor medida, de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación.

Con respecto a los tipos de inundación sobre los que se analizó la influencia del cambio climático, las inundaciones fluviales fueron las más ampliamente estudiadas, seguidas por las inundaciones pluviales y las costeras, en menor medida.

También son variables los modelos climáticos utilizados para las proyecciones, los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y los horizontes temporales sobre los que basar el estudio del clima futuro.

En el caso de España, se ha considerado la influencia del cambio climático en los estudios sobre inundaciones costeras a través de la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española, pero no en las fluviales ni pluviales. Por ello, en este segundo ciclo, es necesario incorporarlo a la EPRI y a los PGRIs.

Igualmente, a nivel español, entre las actuaciones realizadas para dar cumplimiento a la normativa, también se desarrolló una primera aproximación metodológica que incorporaba los efectos del cambio climático en la meteorología y, después, permitía valorar las consecuencias en la hidrología e hidráulica. Esta primera aproximación se aplicó a 5 ARPSIs de distintas Demarcaciones Hidrográficas, representativas de la variabilidad del territorio español (Figura 2).

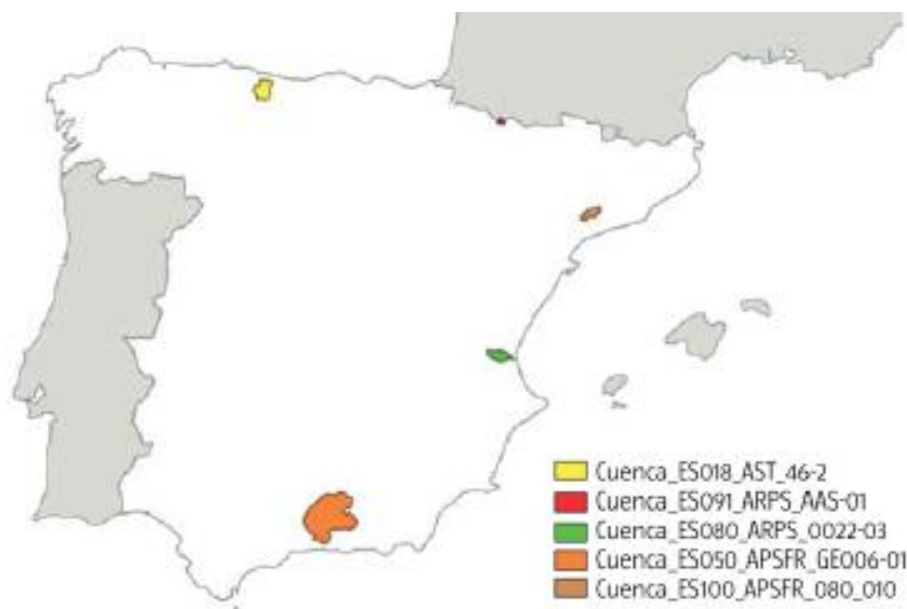


Figura 2.- Ubicación de las ARPSIs utilizadas en la metodología previa. (Fuente: Inundaciones y cambio climático. MITECO, 2018)

El desarrollo de esta primera aproximación contó con el asesoramiento de diversos organismos de investigación (el Centro Superior de Investigaciones Científicas, CSIC; el Grupo de Meteorología de Santander del Instituto de Física de Cantabria y el Grupo de

Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia).

Como resultado de este primer enfoque metodológico, se alcanzaron ciertas conclusiones y recomendaciones a tener en cuenta en el planteamiento de la inclusión del cambio climático en la EPRI del segundo ciclo de implantación de la Directiva, metodología objeto de este documento.

Las principales conclusiones y recomendaciones fueron las siguientes:

- Dado que uno de los principales resultados obtenidos fue que la señal de cambio en las precipitaciones diarias no era común a todas las ARPSIs piloto, como consecuencia de la propia variabilidad natural, se recomendó que el análisis de la influencia del cambio climático fuera acometido a nivel de Demarcación Hidrográfica, sin particularizar en sectores o tramos.
- Como consecuencia de la elevada incertidumbre inherente a los distintos modelos climáticos, se aconsejó utilizar todos los modelos climáticos disponibles, al entender que todos ellos suponen alternativas equiprobables dentro de la variabilidad natural. Además, también se indicó la conveniencia de analizar la incertidumbre relacionada con la estimación de la variable estadística (cuantil de 100 años de periodo de retorno).
- Dado que el objetivo es facilitar a las Confederaciones Hidrográficas una valoración cualitativa del cambio en los caudales de avenida, de cara a considerar la posibilidad de incluir nuevas zonas de riesgo en la EPRI, se sugirió afrontar un cálculo sencillo de los cambios en la ley de frecuencia de caudales.

En cualquier caso, el resultado de todos estos trabajos (revisión de bibliografía y primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en España), se encuentra recogido en el documento titulado “Inundaciones y cambio climático” (2018, MITECO).

1.3. Contenido y objetivos del documento

El objetivo de este documento es recoger la metodología seguida para determinar los cambios potencialmente esperables en las precipitaciones máximas de periodo de retorno de 100 años y en las correspondientes precipitaciones máximas acumuladas (según las hipótesis de partida que se comentarán a lo largo del informe), así como presentar una sistemática sencilla para determinar la posible influencia en la ley de frecuencia de caudales, y valorar cualitativamente sus cambios.

Es importante mencionar que no es el objetivo de estos trabajos evaluar el impacto del cambio climático en los caudales de avenida, sino únicamente realizar un primer análisis que permita obtener unos resultados aproximados para la consideración del cambio climático en la revisión de la EPRI, de acuerdo a los requerimientos de la Directiva de Inundaciones. Por lo tanto, se han asumido simplificaciones, sin estudiar en profundidad

ciertos aspectos, de tal forma que la influencia en la ley de frecuencia de caudales no debe ser considerada como un dato exacto, sino únicamente como una orientación.

Los resultados obtenidos a partir de esta metodología, aplicada en todas las Demarcaciones Hidrográficas, han sido puestos a disposición de los distintos Organismos de Cuenca para su consideración en la revisión de la EPRI y facilitar la selección de nuevas zonas ARPSI, si procede.

El contenido incluido en este documento metodológico es el siguiente:

En primer lugar, se realiza una breve introducción al concepto del cambio climático en la que se explican algunos aspectos básicos. Posteriormente, se exponen las hipótesis de partida seguidas a lo largo de todo el procedimiento. Estas hipótesis no han servido solo para obtener unos resultados concretos, sino también para acotar el análisis.

Con respecto a la metodología como tal, primero se describe la influencia del cambio climático sobre el régimen de precipitaciones máximas (concretamente sobre las de periodo de retorno de 100 años), para seguidamente explicar cómo se ha tratado la incertidumbre asociada a la estimación de la variable estadística (cuantil de 100 años). De esta forma, es posible valorar si los cambios proyectados por los modelos son o no significativos.

Seguidamente, se muestran las zonas donde se aprecia un cambio significativo positivo en el régimen de precipitaciones máximas, que pueden dar lugar a un aumento de los eventos de avenidas extremas.

A continuación, se detalla el procedimiento para el cálculo teórico de los caudales de avenida de periodo de retorno de 100 años a partir de los datos de precipitación con cambio climático obtenidos anteriormente (transformación lluvia – escorrentía).

Finalmente, se expondrá el criterio para la valoración cualitativa a partir de los cambios porcentuales obtenidos en precipitación máxima y caudal.

2. Cambio climático e inundaciones. Conceptos generales

De acuerdo a los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos recogidos en el último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, en sus siglas en inglés), éste producirá cambios en los patrones de inundación (Jiménez-Cisneros et al., 2014), por lo que resulta importante tener acceso a la información sobre su posible influencia y sus potenciales consecuencias, así como gestionar los riesgos que se puedan derivar (Döll et al., 2015). Por lo tanto, el cambio climático es un tema que requiere de nuevos conocimientos y estudios, tanto de posibles impactos como de estrategias de adaptación que mitiguen sus efectos.

Actualmente, no hay un consenso sobre cómo realizar estos estudios, ya que existe una gran incertidumbre en las proyecciones climáticas para estimar los cambios en la precipitación máxima y extrema, lo que ha dificultado la implementación de la Directiva de Inundaciones.

El número de informes procedentes de organismos internacionales que disponen de referencias para España es reducido, mientras que los informes realizados por organismos europeos presentan mayor precisión y nivel de detalle en sus trabajos. Sin embargo, rara vez llegan al detalle de Demarcación Hidrográfica, es decir, rara vez tienen un detalle suficiente como para obtener conclusiones adecuadas.

Los resultados obtenidos por diversos estudios sobre inundaciones, tanto de valores observados en el pasado como de cambios obtenidos para el futuro, tampoco muestran una tendencia clara y uniforme alrededor del planeta, variando de unas zonas a otras o incluso de unas cuencas contiguas a otras. Especialmente en España, donde existe una variabilidad natural muy alta por la cohabitación de varios climas (mediterráneo, atlántico, etc.), el consenso sobre los cambios es aún más débil.

El calentamiento del sistema climático del planeta es inequívoco (IPCC, 2014). Este calentamiento es debido a los llamados gases de efecto invernadero (GEI). Los gases absorben y emiten la radiación procedente del exterior y ayudan a conservar una temperatura en el planeta para que éste sea habitable. Sin embargo, un aumento de la concentración de estos gases provoca un aumento de la temperatura media en el planeta, lo que ha venido ocurriendo desde la revolución industrial, llegando a niveles que nunca antes se habían registrado en la historia.

Una de las partes fundamentales en el sistema climático es la atmósfera. Los cambios que puedan ocurrir en ella afectan de manera directa al ciclo hidrológico, en concreto en los patrones de precipitación. Esto a su vez puede provocar cambios en los patrones de caudales, especialmente en los eventos extremos como las inundaciones (Jiménez-Cisneros et al., 2014). De hecho, desde 1950 se han observado muchos eventos climáticos extremos, y algunos de ellos pueden verse relacionados con la influencia humana (IPCC, 2013a). Por ello, el cambio climático es un tema que requiere de tantos conocimientos y estudios como sea posible.

El organismo oficial encargado de su estudio es el ya mencionado Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), perteneciente al Programa de las Naciones Unidas para el

Medio Ambiente y a la Organización Meteorológica Mundial (WMO en sus siglas en inglés). Este organismo realiza periódicamente Informes de Evaluación sobre el cambio climático, en los cuales se expone el conocimiento técnico-científico disponible sobre el cambio climático al conocimiento público.

En estos informes se establecen, entre muchas otras cosas, los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero que se van a considerar en el ciclo marcado hasta su actualización al cabo de los años. Los escenarios de emisiones son proyecciones de la evolución de dichos gases a lo largo del tiempo futuro. Estos escenarios dependen tanto del desarrollo socioeconómico de la población mundial como de la política ambiental que marquen los distintos gobiernos, así como acuerdos mundiales sobre el clima y otros aspectos.

El Quinto Informe de Evaluación (AR5 por sus siglas en inglés), publicado entre 2013 y 2014, es el último informe publicado hasta la fecha. Pone un mayor énfasis en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y en sus implicaciones para el desarrollo y la gestión de los riesgos, así como en medidas de adaptación y mitigación, proponiendo nuevos escenarios de emisiones llamados Sendas de Concentración Representativas (RCP en sus siglas en inglés). Dos de estos escenarios RCP serán parte de las consideraciones de partida para la realización de estos trabajos. En concreto los RCP 4.5 y RCP 8.5. Mientras que el RCP 8.5 supone un escenario en el que las emisiones no dejan de aumentar, el RCP 4.5 es un escenario tendente a la estabilización.

Los avances en el campo de la modelización climática junto con los nuevos escenarios de emisiones permiten avanzar en el análisis del impacto del clima en los sistemas naturales y, con ello, en los eventos extraordinarios que afectan a la población, como las inundaciones o sequías. Sin embargo, es difícil relacionar estos cambios con el clima debido a la falta de registros largos, así como a la gran variabilidad natural del clima. Sin embargo, los escenarios de emisiones nos remiten a un posible futuro en el que se puede estudiar cómo habrá cambiado el clima y las consecuencias que habrá tenido en otros aspectos respecto al tiempo presente. Este enfoque es el que se sigue cuando se estudia el cambio climático.

Por lo anteriormente mostrado, es difícil distinguir un cambio provocado por el cambio climático antropogénico de lo que es la propia variabilidad natural del clima, y de forma aún más ardua distinguir cambios en la frecuencia o magnitud de las inundaciones provocados por un cambio en las condiciones climáticas, de las provocadas por los cambios antropogénicos de las condiciones de la cuenca.

En la metodología desarrollada y aplicada en la revisión de la EPRI en España, se ha abordado esta identificación de forma sencilla y sistemática, tal y como se explica en el punto 5.3.

Los estudios que tratan de vislumbrar los efectos del cambio climático en los factores hidroclimáticos del planeta tienen que lidiar con la incertidumbre asociada a las proyecciones de los modelos climáticos y a la estimación de las variables estadísticas, así como los sesgos que se producen en la transformación lluvia-escorrentía.

3. Hipótesis de partida

Con el fin de valorar la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación y considerar su incorporación en el segundo ciclo de la Directiva (fase EPRI), se ha desarrollado una metodología que permite determinar las posibles zonas con mayor impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas de 100 años de periodo de retorno, en base al conocimiento desarrollado a lo largo del tiempo gracias a los diferentes estudios sobre cambio climático, tal y como indica la Directiva. Es decir, aquellas zonas donde las distintas proyecciones de la precipitación máxima de 100 años de periodo de retorno a futuro presentan mayores cambios con respecto a la situación en clima actual.

Como punto de partida, se han seguido en lo posible las recomendaciones de la primera aproximación metodológica (2017), incorporando las particularidades o criterios específicos propuestos para la incorporación a la EPRI (2018). Estas particularidades permiten abordar el estudio con una visión más amplia, incluyendo todo el espectro de cambio.

A continuación se incluye un resumen de las hipótesis de partida previas y las actuales, resaltándose las que son de aplicación en estos trabajos. Se explicarán seguidamente.

		PRIMERA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA 5 ARPSIs (2017)	METODOLOGÍA CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EPRI Nivel general (2018)
Periodo de retorno de las precipitaciones máximas diarias (PMD)		100 años	
Escenario de emisión de gases de efecto invernadero (según el Quinto Informe del IPCC)		RPC 8.5	RCP 4.5 RCP 8.5
CLIMA ACTUAL	Intervalo del periodo de control	1971-2010	1951-2005 o 1971-2005 (según el modelo)
	Fuente de información	Spain02	12 simulaciones del proyecto EURO-CORDEX en control
CLIMA FUTURO	Horizonte futuro sobre el que situar las proyecciones	2041-2070	
	Número de proyecciones regionales para simular la dinámica del clima (RCMs)	2	12 simulaciones del proyecto EURO-CORDEX en futuro (incorporar incertidumbre)

Tabla 1.- Comparativa de las hipótesis de partida utilizadas en la primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación (2017) y las seguidas para incorporar el cambio climático en la EPRI de segundo ciclo (2018)

Las consideraciones o hipótesis de partida de la primera aproximación metodológica que se han continuado o mantenido en estos trabajos son las referentes al periodo de retorno y el horizonte temporal de clima futuro.

De todos los escenarios de distinta probabilidad de ocurrencia considerados por la Directiva de Inundaciones como obligatorios (periodos de retorno 10, 100 y 500 años), se ha seleccionado el **periodo de retorno** de 100 años como base para realizar la comparativa.

Se trata de una avenida extraordinaria que, por lo general, presenta un elevado impacto en las zonas establecidas como ARPSIs (Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación). Por tanto, se ha desestimado considerar tanto el periodo de retorno inferior (10 años) por los limitados impactos esperables en este extremo de la ley de frecuencias, como el superior (500 años) por el elevado grado de incertidumbre de los valores.

Del mismo modo, se ha seleccionado el **horizonte temporal futuro** 2041-2070 por tratarse de un intervalo en el que la influencia del cambio climático puede evidenciarse de forma clara. El intervalo para los datos observados (1971-2010) se seleccionó por la importante cantidad de datos observacionales registrados a través de distintos medios.

Con respecto a las modificaciones adoptadas en esta nueva metodología, en relación con el anterior enfoque, son las siguientes:

- Para la simulación de la dinámica del clima en el futuro no solo se van a incorporar dos Modelos Climáticos Regionales (RCMs, en sus siglas en inglés), sino los 12 modelos disponibles en el proyecto EURO-CORDEX en el momento de realizar estos trabajos.
- Aparte del escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 8.5, también se van a analizar los resultados obtenidos tras la incorporación del RCP 4.5. Se tendrán en cuenta los resultados de ambos escenarios ya que se considera que son igualmente posibles.
- Incorporación del estudio de la incertidumbre asociada a la estimación de la variable estadística (cuantil de 100 años de periodo de retorno). Es importante no confundir con la incertidumbre inherente a las predicciones de cambio climático, cuyo estudio no es el objetivo de estos trabajos.
- Cambio del intervalo temporal del periodo de control. Durante la aplicación de la primera aproximación metodológica, la fuente de información de precipitaciones diarias era Spain02, donde los datos para el periodo de control se hallaban comprendidos entre 1971 y 2010. Dado que en esta metodología los datos a usar son los procedentes de EURO-CORDEX, el periodo de control debe ceñirse a la disponibilidad de sus datos de control: 1951-2005 o 1971-2005, según el modelo.

Con respecto a EURO-CORDEX, es la rama europea de la iniciativa internacional CORDEX, un programa dependiente del Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP en sus siglas en inglés). Su objetivo es coordinar internacionalmente un espacio de trabajo que permita obtener proyecciones de cambio climático a escala regional para todas las zonas del mundo. Como se ha mencionado, son un total de **12 proyecciones climáticas (RCMs)** en el momento del inicio de estos trabajos.

Estas combinaciones se incluyen en la tabla a continuación:

Nº	Acrónimo	GCM	RCM
1	ICH-CCL	ICHEC-EC-EARTH	CCLM4-8-17
2	MPI-CCL	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17
3	MOH-RAC	MOHC-HadGEM2-ES	RACMO22E
4	CNR-CCL	CNRM-CM5	CCLM4-8-17
5	ICH-RAC	ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E
6	MOH-CCL	MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17
7	IPS-WRF	IPSL-CM5A-MR	WRF331F
8	IPS-RCA	IPSL-CM5A-MR	RCA4
9	MOH-RCA	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4
10	ICH-RCA	ICHEC-EC-EARTH	RCA4
11	CNR-RCA	CNRM-CM5	RCA4
12	MPI-RCA	MPI-ESM-LR	RCA4

Tabla 2.- Combinaciones de modelos climáticos globales y regionales presentes en el proyecto EURO-CORDEX

Los resultados de EURO-CORDEX son el punto de partida de múltiples estudios de impactos y adaptación al cambio climático, dentro del calendario del Quinto Informe del IPCC. Estas proyecciones o combinaciones de modelos climáticos globales (GCM) y regionales (RCM) están disponibles para varios escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, distintos horizontes temporales y a lo largo de una malla de resolución de 12.5 km para toda Europa.

De la forma en que se ha planteado la metodología para la inclusión del cambio climático en la EPRI, al considerar las 12 combinaciones de RCMs, se representa todo el espectro posible de cambio. Es decir, se considera el máximo número de hipótesis climáticas al ser todas ellas equiprobables y se establece un rango de probabilidad de cambio razonable, ya que un modelo no tiene por qué representar mejor que otro el comportamiento climático en el futuro.

Por otra parte, en relación con los **escenarios de emisión de gases de efecto invernadero**, aunque el RCP 8.5 es el escenario en teoría más desfavorable al suponer un nivel muy alto de emisiones (el único considerado en la primera aproximación metodológica), no se puede asegurar que el comportamiento de una determinada variable climática (como es el caso de la precipitación) sea peor en este escenario que en otro. Por ello, incorporando también el RCP 4.5 (escenario de emisiones tendente a la estabilización), se pueden comprobar los resultados de ambos escenarios y utilizarlos de forma complementaria.

Para analizar la influencia del cambio climático en las precipitaciones máximas diarias (PMD), principal condicionante del riesgo de inundación, esta metodología ha tomado como datos de partida los obtenidos por un estudio realizado por el Grupo de Investigación de

Hidroinformática y Gestión del Agua de la Universidad Politécnica de Madrid en base a las proyecciones climáticas de EURO-CORDEX.

Para tratar con la **incertidumbre de la variable estadística** (cuantil de 100 años de periodo de retorno) se ha utilizado la técnica de simulaciones de Monte Carlo aplicada sobre las series de precipitación (en este caso, sobre las series de precipitaciones máximas diarias anuales). De esta forma, se puede determinar el rango de oscilación posible de la variable estudiada.

En relación con el cambio del **intervalo temporal del periodo de control**, como se ha mencionado, esta modificación es consecuencia de haber sustituido la fuente de información previa por otra, no de una recomendación específica realizada en la primera aproximación metodológica. Cada fuente de información tiene un periodo de control distinto.

Finalmente, se ha convertido esta precipitación en escorrentía para analizar el posible impacto del cambio climático sobre la ley de frecuencia de caudales (periodo de retorno de 100 años), utilizando el método racional modificado según se especifica en la norma 5.2 – IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.

Se ha elegido este método ya que la utilización de modelos hidrológicos más complejos, como los de simulación continua (que permiten valorar, por ejemplo, las modificaciones en la humedad antecedente del suelo) requieren de procesos largos de calibración y tiempos elevados de simulación. Este método permite, de forma rápida y teórica, adquirir una idea aproximada de los posibles cambios en los caudales de periodo de retorno de 100 años.

En definitiva, el esquema general de la metodología que se va a seguir es el siguiente:

- Estudio de la influencia del cambio climático en las precipitaciones máximas diarias de periodo de retorno de 100 años a partir de la comparativa entre los valores obtenidos para la situación de clima actual y de clima futuro (según cada escenario RCP), a partir del estudio del Grupo de Investigación de Hidroinformática y Gestión del Agua de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Estudio de la incertidumbre asociada a estos cambios mediante la comprobación de su significancia estadística.
- Obtención de las zonas con cambio relevante en la precipitación máxima diaria de periodo de retorno de 100 años y selección de puntos de la red hídrica para valorar los posibles cambios en la ley de frecuencia de caudales.
- Evaluación cualitativa del cambio en la ley de frecuencia de caudales, en los puntos seleccionados, a partir del método racional modificado, según se recoge en la norma 5.2 – IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.

4. Influencia del cambio climático sobre las precipitaciones máximas diarias

Como se ha mencionado, para analizar la influencia del cambio climático en las precipitaciones diarias máximas anuales, esta metodología ha tomado como datos de partida los obtenidos por un estudio realizado por el Grupo de Investigación de Hidroinformática y Gestión del Agua de la Universidad Politécnica de Madrid.

La base de datos (titulada “Tasas de cambio en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual esperables en situación de cambio climático a escala nacional”), consiste en el análisis estadístico de las simulaciones de 12 combinaciones de modelos climáticos globales y regionales (GCM-RCM) del proyecto EURO-CORDEX.

La decisión de utilizar datos del proyecto EURO-CORDEX fue tomada como consecuencia de los resultados obtenidos en un estudio previo (Garijo et al., 2018), el cual descartó el empleo de las proyecciones climáticas regionalizadas estadísticamente que son suministradas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), para estudios de máximos. Además, como se pudo comprobar en otro estudio donde se comparaban ambas bases de datos (Garijo y Mediero, 2018), los datos de máximos de EURO-CORDEX se comportaban mucho mejor que los de AEMET en la zona estudiada.

El proyecto EURO-CORDEX ofrece proyecciones de precipitación diaria a lo largo de una malla con resolución de 0.11° para toda Europa (un ancho de celda de 12.5 km aproximadamente). Los límites de la malla se pueden observar en la Figura 3. Dado que estos límites no alcanzan las islas Canarias, no puede realizarse el análisis climático de las Demarcaciones Hidrográficas de estas islas.

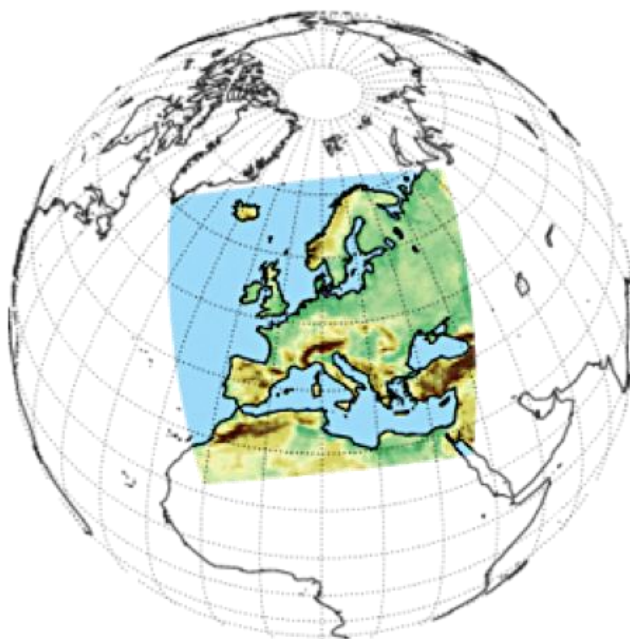


Figura 3.- Límites del dominio Europa del proyecto CORDEX (EURO-CORDEX) utilizado en el estudio. Fuente: EURO-CORDEX

Las celdas de la malla espacial consideradas para el estudio han sido todas las incluidas dentro de un radio de 10 km alrededor de la costa de la Península Ibérica y de las Islas Baleares. Esta selección ha reunido un total de 4293 celdas.

Los intervalos temporales que se han considerado en el trabajo de la UPM han sido los siguientes. Periodo control: 1951-2005 o 1971-2005 (según el modelo), y los siguientes periodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Entre ellos se encuentra el que es el intervalo escogido para estos trabajos. También considera los dos escenarios RCP, el RCP 4.5 y el RCP 8.5.

En dicho estudio, tras adecuar las series temporales de la precipitación diaria de todos los modelos climáticos, se obtuvieron las series de máximos anuales (por año hidrológico), tanto para el periodo de control como para los periodos futuros.

Para cada uno de los modelos climáticos y cada una de las celdas seleccionadas, se ajustó una función de distribución de Valores Extremos Generalizados (GEV, en sus siglas en inglés), mediante el método de los L-momentos, a las series de máximos anuales. De esta forma, se pudieron obtener los cuantiles de precipitación asociados a distintos periodos de retorno.

Las tasas de cambio se obtuvieron comparando los cuantiles de precipitación en cada periodo futuro con los cuantiles de precipitación en el periodo de control. Es decir, el objeto del estudio de la UPM consistía en evaluar el cambio que proyectaban los modelos climáticos, considerando las previsiones de cambio esperadas en las concentraciones de gases de efecto invernadero en el futuro.

Aunque el estudio realizado por la UPM suministra los resultados para los periodos de retorno 2, 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 años (obteniendo para cada uno de ellos los cambios relativos en los tres periodos futuros considerados), tal y como indican las hipótesis de partida de esta metodología, únicamente se van a utilizar los datos del periodo de retorno de 100 años y el intervalo futuro 2041-2070.

Es importante mencionar que las series de precipitación que se han utilizado tanto en el estudio de la UPM como en la aplicación de esta metodología se corresponden únicamente con las realizaciones de los modelos climáticos. Es decir, la precipitación atribuida al periodo de control no procede de pluviómetros o estaciones meteorológicas (no es precipitación observada) sino que son simulaciones obtenidas mediante los modelos climáticos para ese periodo concreto.

Esta precipitación simulada en el periodo de control no tiene por qué ser igual a la precipitación observada, ya que como se ha explicado, los modelos son representaciones de la realidad que puede contener errores o sesgos.

De esta forma, realizando una comparativa entre la precipitación simulada para el periodo futuro y la precipitación simulada para el periodo de control, ambas obtenidas por el mismo modelo, se eliminan los sesgos sistemáticos.

También es importante destacar que los resultados de la UPM únicamente han tenido en cuenta la incertidumbre asociada a la variable a estudiar (la precipitación máxima diaria

anual), suministrando las tasas de cambio como umbrales superados por un porcentaje determinado de modelos climáticos (50 %, 68 % y 90 %).

Sin embargo, el propio concepto de “variabilidad climática” supone que en caso de existir diferencias entre la precipitación en clima actual o presente y la calculada a partir de las proyecciones de clima futuro, no deben atribuirse necesariamente a la acción del cambio climático. Por ello, es necesario estudiar dicha variabilidad, para establecer si los cambios en el futuro son significativos, estadísticamente hablando, o no. Es decir, si se encuentran dentro de la propia variabilidad natural asociada al clima o son consecuencia del cambio climático.

Dado que la incertidumbre a incorporar es la asociada a las proyecciones de futuro, con el objetivo de poder mostrar solo los cambios significativos estadísticamente hablando, no ha sido necesario utilizar todos los resultados de la UPM. Únicamente han sido imprescindibles los parámetros obtenidos del ajuste de la ley de frecuencia en cada celda y modelo.

5. Evaluación y cuantificación del nivel de cambio significativo

Una de las recomendaciones establecidas en la primera aproximación metodológica para la incorporación del cambio climático en el riesgo de inundación, fue la de valorar la incertidumbre asociada a la estimación de la variable estadística en estudio (cuantil de 100 años de periodo de retorno). Esta recomendación no solo viene avalada por el anterior enfoque sino que es una práctica habitual en los estudios y trabajos sobre cambio climático.

El clima terrestre es muy variable ya que intervienen en él muchos factores, tanto internos (vegetación, emisiones de gases de efecto invernadero, etc.) como externos (manchas solares, rotación y traslación de la tierra, etc.), por lo que reproducir con exactitud el sistema climático actual es muy complejo.

Dado que los posibles cambios de la precipitación en el futuro (valores máximos y medios, número de días con ausencia de precipitación, etc.) son proyecciones realizadas por los modelos climáticos en base al conocimiento y modelización actuales sobre el clima terrestre, no se puede asegurar que sean cambios que efectivamente vayan a ocurrir en el futuro o comprobar su exactitud de forma directa. Por ello, es completamente necesario no solo dar valores del posible cambio, sino también asignar un intervalo de oscilación entre el que se pueden mover estos valores.

Con el estudio de la incertidumbre de la variable estadística (en este caso la precipitación), se pueden determinar los límites entre los cuales dicha variable puede tomar valores y también observar si los cambios proyectados a futuro por los modelos climáticos pueden ser atribuibles a la variabilidad natural propia del clima o si, por el contrario, pueden ser atribuibles al efecto de las emisiones de GEI sobre el clima, es decir, al cambio climático.

5.1. Generación de series nuevas de precipitación para el estudio de la incertidumbre

Para estudiar la incertidumbre asociada a la estimación de la variable estadística (intervalo de oscilación entre el que pueden moverse los valores de precipitación máxima de 100 años de periodo de retorno) existen diferentes técnicas, como pueden ser la determinación de intervalos de confianza asociados a una distribución de frecuencia estudiada, el método de *bootstrapping* o el método de Montecarlo. De entre todas las opciones, ha sido la técnica de las simulaciones de Montecarlo la utilizada en estos trabajos.

El método de Montecarlo es un método estadístico numérico que permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatoriamente. El método consiste en ejecutar varias veces los distintos sucesos variando aleatoriamente su valor en función de la función estadística que los define, dando como resultado un conjunto de valores finales. En este caso, el método ha generado series de precipitación aleatorias (gráfico izquierdo de la Figura 5).

El proceso seguido se describe a continuación:

- En primer lugar, se han recopilado las series de precipitaciones máximas diarias simuladas para el periodo control de la base de datos de la UPM (es decir, datos en todas las celdas y de los 12 modelos climáticos considerados).
- Con las series de PMD, se han calculado las leyes de frecuencia GEV ajustadas mediante el método de los L-momentos, asociadas a las mismas.
- Mediante las simulaciones de Monte Carlo se han generado un total de 10.000 series aleatorias de probabilidad de precipitación para cada celda y modelo.
- Utilizando la ley de frecuencia ajustada con los datos en periodo de control (en cada celda y modelo) e introduciendo los valores de probabilidad de precipitación generados mediante las simulaciones de Monte Carlo, se han obtenido nuevas series de PMD (10.000 en cada celda y modelo).
- Con las nuevas series de PMD generadas aleatoriamente, se ha seguido el mismo procedimiento, consiguiendo 10.000 leyes de frecuencia GEV con las que se pueden establecer un rango de variabilidad (o incertidumbre) asociado a la precipitación en el periodo de control.

En resumen, este proceso ha sido implementado para cada una de las 12 combinaciones de modelos climáticos, para cada una de las celdas de la malla y para los dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5).

Como resultado, se han generado nuevas series de precipitación basadas en la serie de datos del periodo control para determinar el rango de incertidumbre de la variable.

De esta forma, se ha estimado el rango de valores entre los que se puede encontrar la precipitación de un periodo de retorno de 100 años con los datos disponibles en el periodo de control (1951/1971-2005).

5.2. Número mínimo de modelos necesario para confirmar el cambio climático asociado a una celda

Tras la estimación del rango de valores entre los que puede encontrarse la precipitación, se ha estudiado cuál debe ser el número mínimo de modelos que deben coincidir en señalar ese cambio en una celda para darlo como válido o confirmado. Esto debe ser así ya que los modelos climáticos son equiprobables, es decir, ninguno de ellos tiene una mayor probabilidad de ocurrencia.

Tras analizar distintas opciones, se decidió que para determinar si una celda muestra una señal de cambio climático (según las hipótesis de partida fijadas), es necesario que esté apoyada por al menos la mitad de los modelos climáticos.

Es decir, que al menos 6 de los 12 modelos climáticos deben presentar un cambio significativo para considerar que en esa celda existe un cambio en las precipitaciones máximas diarias como consecuencia del cambio climático.

El cálculo del umbral que determina si el cambio es significativo o no, se explica en el apartado siguiente. En realidad, es un proceso paralelo y complementario al cálculo del número de modelos que se ha abordado en este apartado.

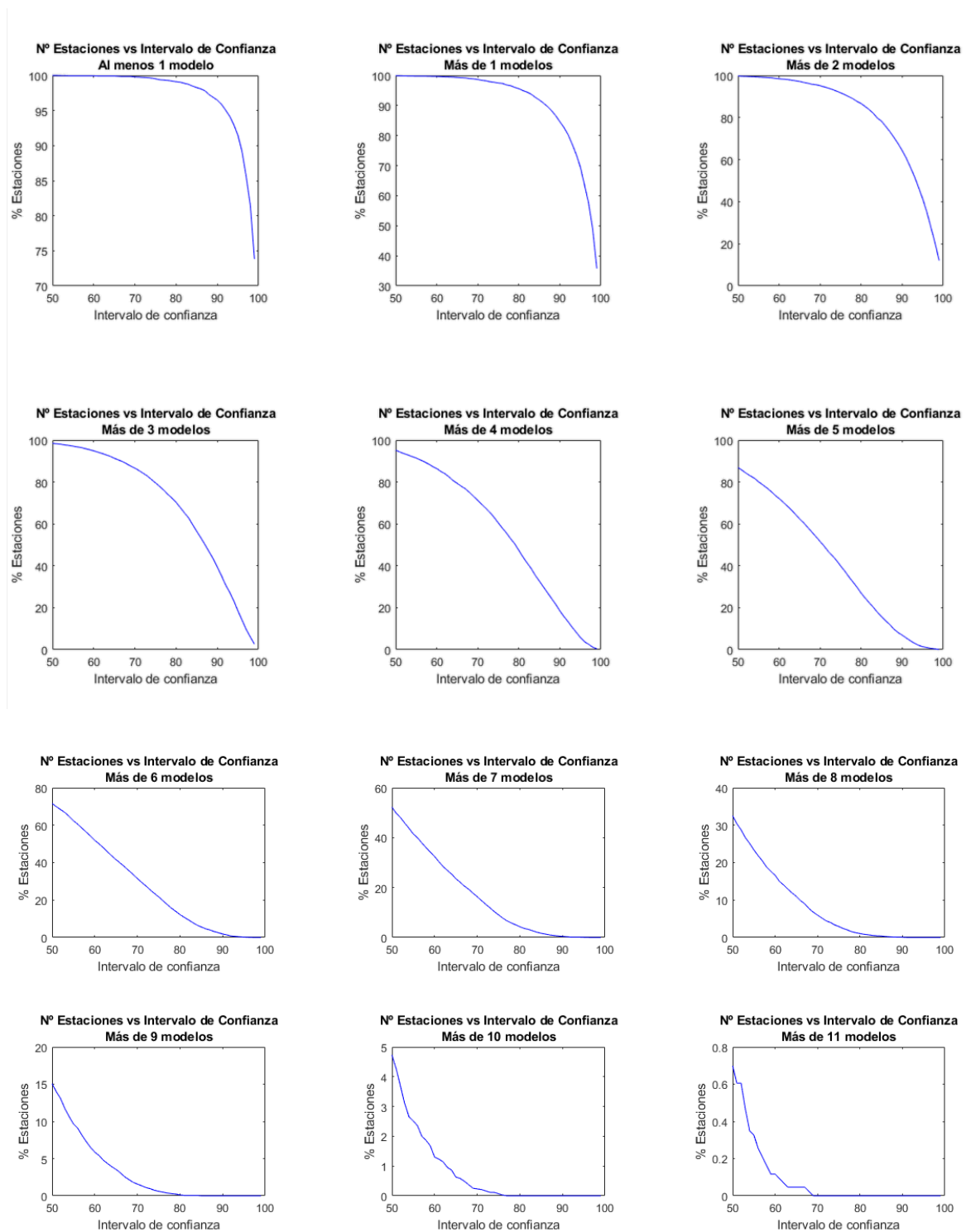


Figura 4.- Ejemplo de los análisis realizados para la selección del número mínimo de modelos que deben coincidir para considerar cambio climático en una celda, para el RCP 8.5

5.3. Cálculo del umbral de cambio significativo

A continuación, se determinó un umbral para delimitar lo que se ha considerado como “variabilidad natural” de la precipitación. De esta forma, si el valor de la proyección de clima futuro queda fuera de este umbral se considera que el cambio es debido realmente a un cambio climático, mientras que si queda dentro se considera que el cambio queda embebido en la variabilidad natural y, por lo tanto, se descarta a la hora de estudiar los eventos extremos.

Dado que una de las hipótesis de partida especificaba que el periodo de retorno objetivo para el estudio era el de 100 años, los resultados procedentes de las simulaciones de Montecarlo (es decir, las 10.000 leyes de frecuencia) se clasificaron en función de su ubicación respecto a todo el rango de valores obtenido en el periodo de retorno de 100 años, en percentiles. Así, el valor más alto corresponde al percentil 100, y la mediana de todos los valores corresponde al percentil 50 tal y como puede verse en la Figura 5.

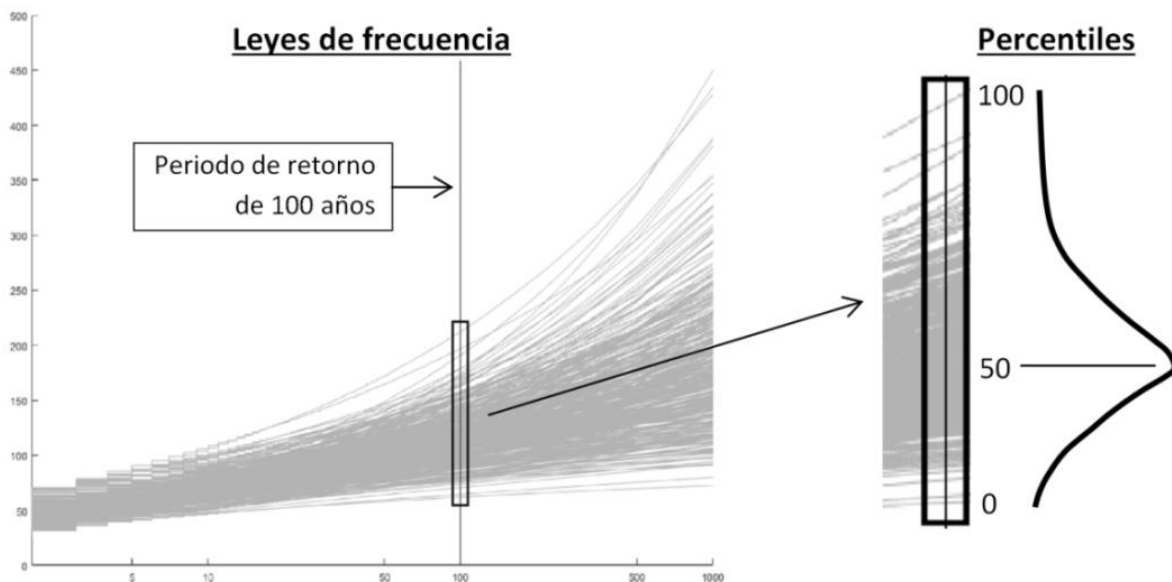


Figura 5.- Proceso de elección del umbral en las precipitaciones máximas diarias para el periodo de retorno de 100 años a partir de las 10.000 leyes de frecuencia obtenidas mediante el enfoque de simulaciones de Monte Carlo

Para la selección de este umbral se realizaron varios análisis con la colaboración de expertos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Por ejemplo, en una primera aproximación se analizó cómo se distribuía el número de celdas que presentaban cambio en función del percentil, y su porcentaje medio por modelo, utilizando únicamente la mitad superior de los percentiles (del 50 al 100).

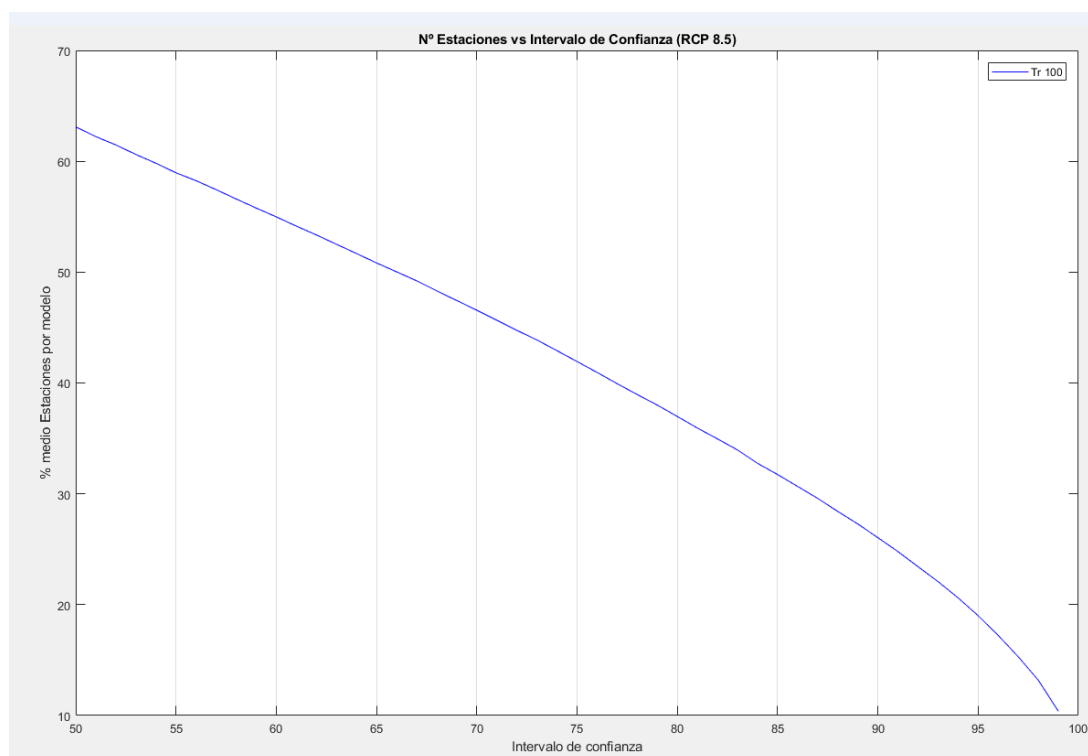


Figura 6.- Número de celdas que presentan cambio por modelo según el intervalo de confianza, utilizando la mitad superior de los percentiles

La Figura 7 es otro ejemplo de los análisis realizados para la determinación del umbral. Pueden observarse cómo el número de celdas que señalan cambio serían prácticamente las de toda la Península y Baleares si se selecciona un umbral de cambio bajo, y cómo, por el contrario, a medida que se aumenta el umbral, el número de celdas que indican cambio se reduce. El código de colores ubicado a la derecha de cada gráfica indica el porcentaje de cambio.

Hay que destacar que solo se han analizado los cambios positivos en la ley de frecuencia, ya que la aplicación de esta metodología se centra en valorar los aumentos de la precipitación máxima que puedan provocar inundaciones y, en consecuencia, facilitar la identificación de nuevas posibles ARPSIs. Por ello, a pesar de que en un análisis más exhaustivo sería conveniente evaluar tanto los cambios positivos como los negativos, a la hora de abordar este análisis se han analizado solo los cambios positivos.

Finalmente se adoptó un criterio puramente estadístico para establecer el umbral, que implica considerar el percentil 83 como el corte para definir la variabilidad natural. Este percentil es el correspondiente al valor de la media más una desviación típica (siguiendo una distribución normal) de los cambios por encima de la mediana del rango.

Este planteamiento se ha considerado adecuado para comprobar si la precipitación simulada para el clima futuro es significativamente diferente de la precipitación simulada en el periodo de control.

Es importante entender que el umbral no establece el cambio proyectado en la ley de frecuencia, es decir, que el umbral correspondiente al percentil 83 no supone un cambio del

83%, sino que es un umbral ajeno al cambio en la ley definido únicamente por la distribución de las series aleatorias de leyes de frecuencia obtenidas.

Por ello, otro aspecto que se debe valorar (una vez definido el umbral que considera la variabilidad natural), es si se deben tener en cuenta todos los cambios, por pequeños que sean, o es necesario definir otro umbral que determine el cambio mínimo en la ley de frecuencia. Por poner un ejemplo, un cambio en la ley que se encuentre fuera del umbral del percentil 83 puede suponer un cambio tan pequeño (por ejemplo, inferior al 10%), que puede llegar a decidirse no evaluarlo.

En definitiva, aunque el valor de precipitación correspondiente al umbral sea distinto en función del modelo climático (distintos RCMs) y de la celda (hay 4293 celdas en la base de datos de trabajo), el umbral (percentil 83) no variará al depender del conjunto de valores de precipitación, adoptándose para todos los modelos y celdas el mismo.

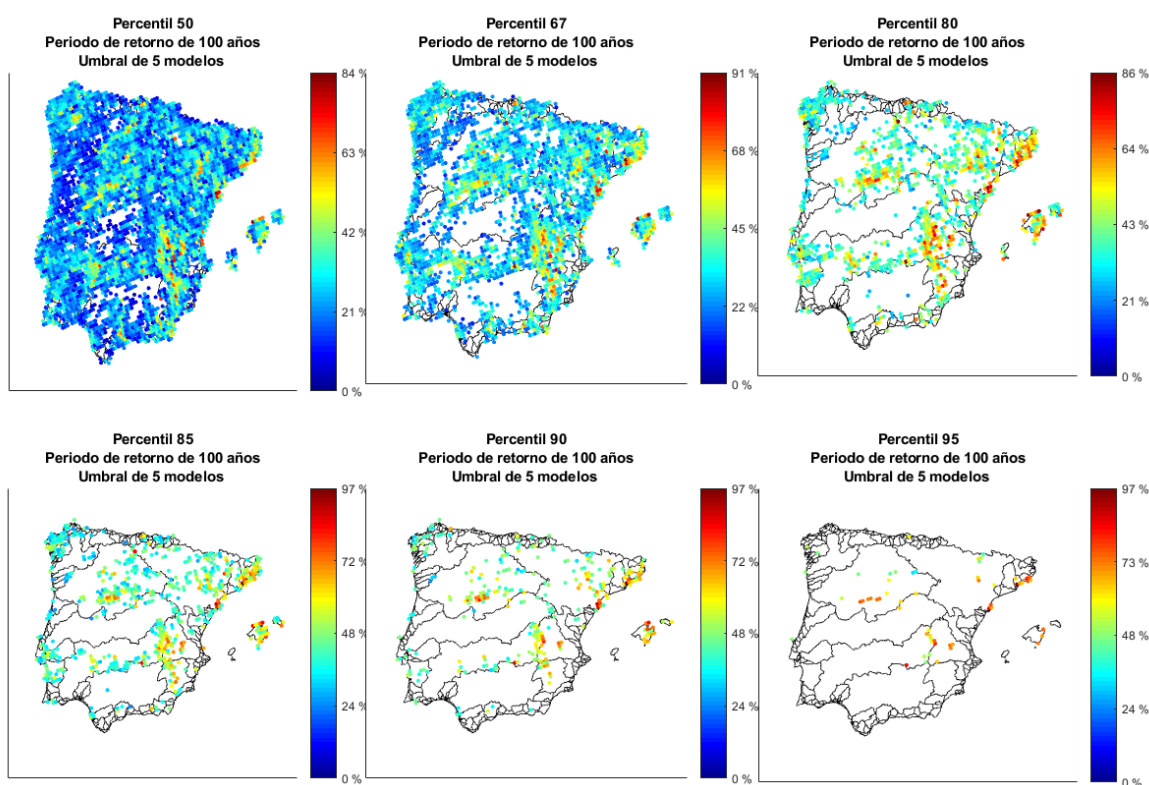


Figura 7.- Distribución espacial de las celdas con cambio significativo positivo para distintos percentiles con al menos 6 modelos que indiquen cambio

6. Estimación de cambios en la precipitación máxima

6.1. Zonas con cambio en la precipitación máxima diaria

Tras la aplicación de los pasos mencionados, se obtienen las celdas de la Península Ibérica e Islas Baleares donde las proyecciones a futuro de los modelos climáticos muestran un cambio significativo en las precipitaciones máximas diarias, para un periodo de retorno de 100 años.

Los valores que señalan el cambio como significativo positivo son el resultado de considerar que cumplen las condiciones y umbrales establecidos a lo largo de los puntos anteriores. Su valor es el de todos los modelos disponibles y no solo de los modelos que señalan cambio significativo, ya que debido a la equiprobabilidad de los modelos antes mencionada, no se puede despreciar ninguno de ellos en favor de otro. Es decir, a pesar de que no ofrezcan un cambio significativo, no implica que no sea posible.

Para calcular el cambio que proyecta concretamente cada modelo en el futuro, se ha realizado la diferencia relativa entre la precipitación proyectada en el futuro y la precipitación en el periodo de control en cada uno de los modelos. Como se ha comentado en el apartado anterior, se realiza la diferencia entre valores del propio modelo ya que de esta forma se eliminan los posibles sesgos sistemáticos que tienen los modelos en relación a la realidad. Finalmente, el cambio en cada celda se calcula como la media de los cambios de todos los modelos climáticos en dicha celda.

De esta forma, el análisis de la incertidumbre sirve para distinguir las celdas con cambio significativo, mientras que el propio valor de cambio es el cambio medio procedente de todos los modelos utilizados.

En la Figura 8 y Figura 9 se pueden observar las celdas donde el cambio es significativo positivo así como su valor de cambio medido en porcentaje, para los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.

Aunque en ambos escenarios de emisión se observan zonas comunes de cambio, el porcentaje de éste no es homogéneo.

Estos valores puntuales se corresponden con el centroide de las celdas en las que los modelos climáticos simulan el clima, y se asume el posible cambio de manera uniforme en toda la celda.

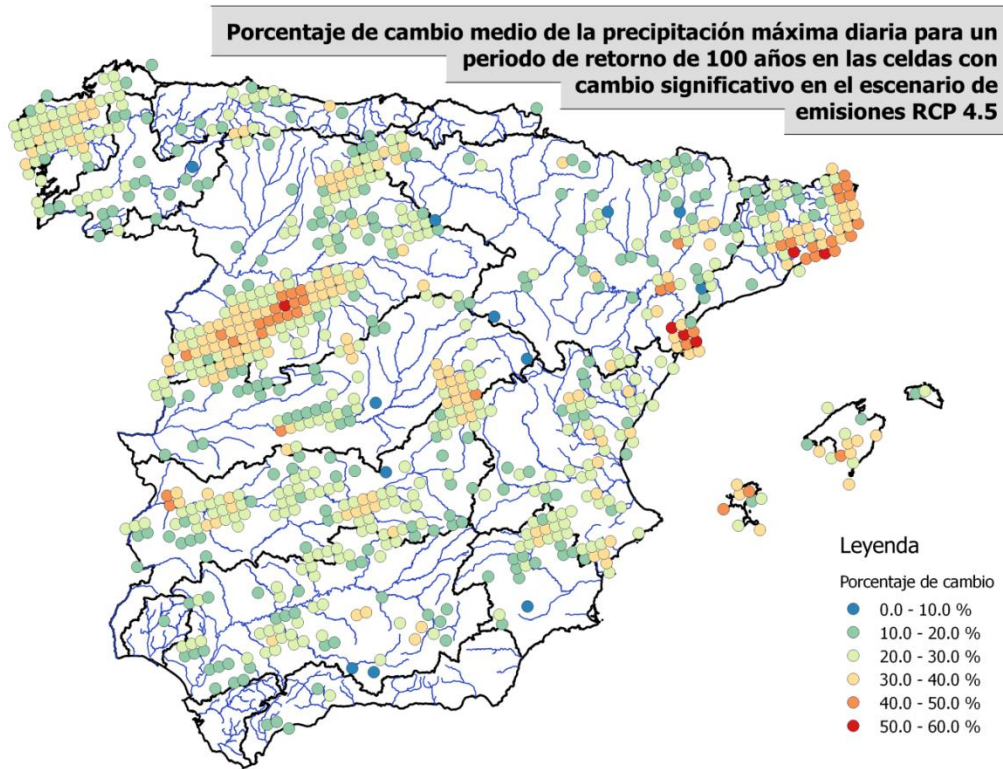


Figura 8.- Cambios porcentuales de la precipitación en las celdas que cumplen los umbrales de significancia, para la España peninsular e islas Baleares y según el escenario de emisiones RCP 4.5

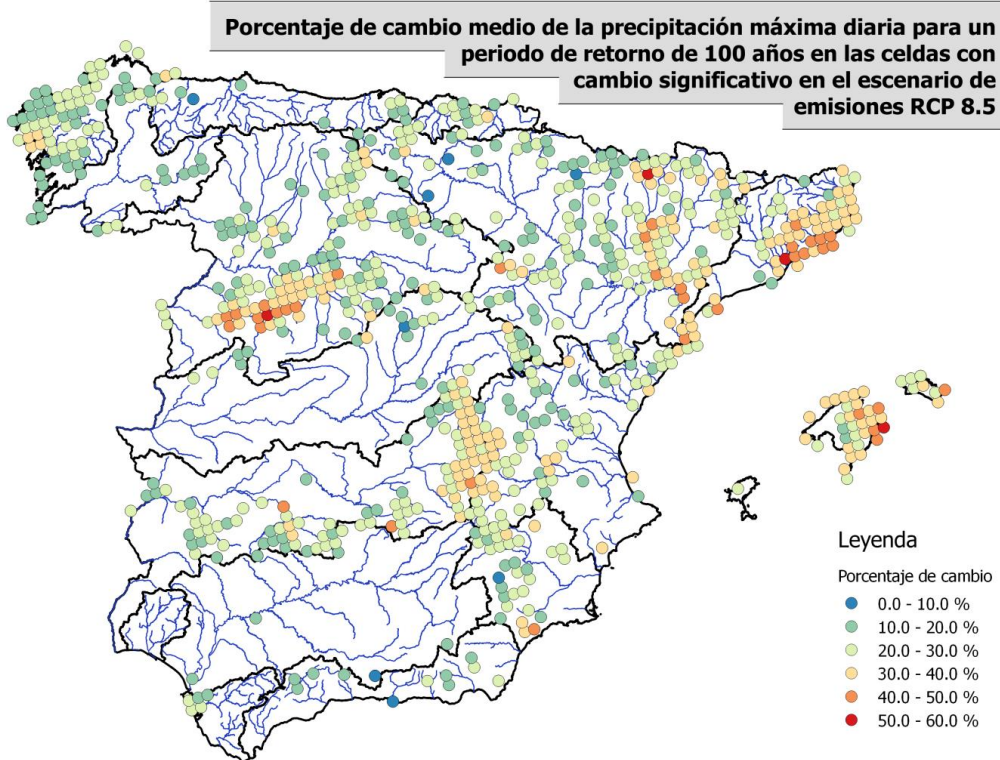


Figura 9.- Cambios porcentuales de la precipitación en las celdas que cumplen los umbrales de significancia, para la España peninsular e islas Baleares y según el escenario de emisiones RCP 8.5

6.2. Cambios en la precipitación máxima acumulada

Posteriormente, con el objetivo de obtener las zonas susceptibles de sufrir cambios en el régimen de avenidas, estos cambios significativos en las celdas han sido aplicados sobre un ráster de precipitación máxima diaria, para obtener un ráster de precipitaciones modificado por las tasas de cambio.

Como se ha mencionado, el análisis de la incertidumbre realizado ofrece como resultado el valor medio de los cambios significativos positivos, para conocer las zonas donde se prevé un aumento de precipitación asociado al cambio climático. Sin embargo, calcular la precipitación acumulada y transformar esta información en caudal de avenida, significa que cada vez que se calcule el caudal en un punto, dependerá de la precipitación de la totalidad de la cuenca que tiene en ese punto su punto de cierre.

Puede ocurrir que, al igual que se han establecido unas celdas con cambio positivo significativo (las que interesan de cara a la evaluación de avenidas), existan otras con cambio negativo significativo que pueden influir en el valor de la precipitación circulante, como por ejemplo reduciendo su valor, o contrarrestando el aumento que pudiera suponer el efecto del cambio climático. En consecuencia, de no incluir esta información, se estaría sobrevalorando la precipitación acumulada.

Por ello, también se han calculado las celdas con cambio significativo negativo y su valor, siguiendo el mismo procedimiento que se explicó para obtener los cambios significativos positivos. En este caso, continuando el mismo planteamiento estadístico, el umbral escogido para delimitar la significancia ha sido el percentil 17. Este percentil es el correspondiente a la media menos una desviación típica (siguiendo una distribución normal) de los cambios por debajo de la mediana del rango.

Estos resultados de porcentaje de cambio obtenidos, considerando tanto los datos significativos positivos como los negativos, se han multiplicado por el mapa de precipitaciones máximas diarias de periodo de retorno de 100 años, del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular”, realizado por el CEDEX para la Dirección General de Carreteras en 1999. Su resolución es de 500 metros, aunque partiendo inicialmente de un mapa con resolución de 1000 metros.

Es importante destacar que, al multiplicar las proyecciones futuras por el mapa de precipitación actual, se está presuponiendo que la distribución de las precipitaciones en el futuro será igual que en la actualidad. Esto no tiene por qué ser así, ya que como consecuencia del cambio climático los patrones de precipitación pueden variar. Sin embargo, debido a la falta de estudios sobre la materia y a que un estudio específico sobre este tema queda fuera del alcance de este trabajo, se ha adoptado esta simplificación.

A continuación se presentan 3 figuras en las que se muestra la precipitación máxima diaria de periodo de retorno de 100 años en clima actual (la procedente de los trabajos previos del CEDEX) y las precipitaciones máximas diarias calculadas para los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5, es decir, con la influencia del cambio climático.

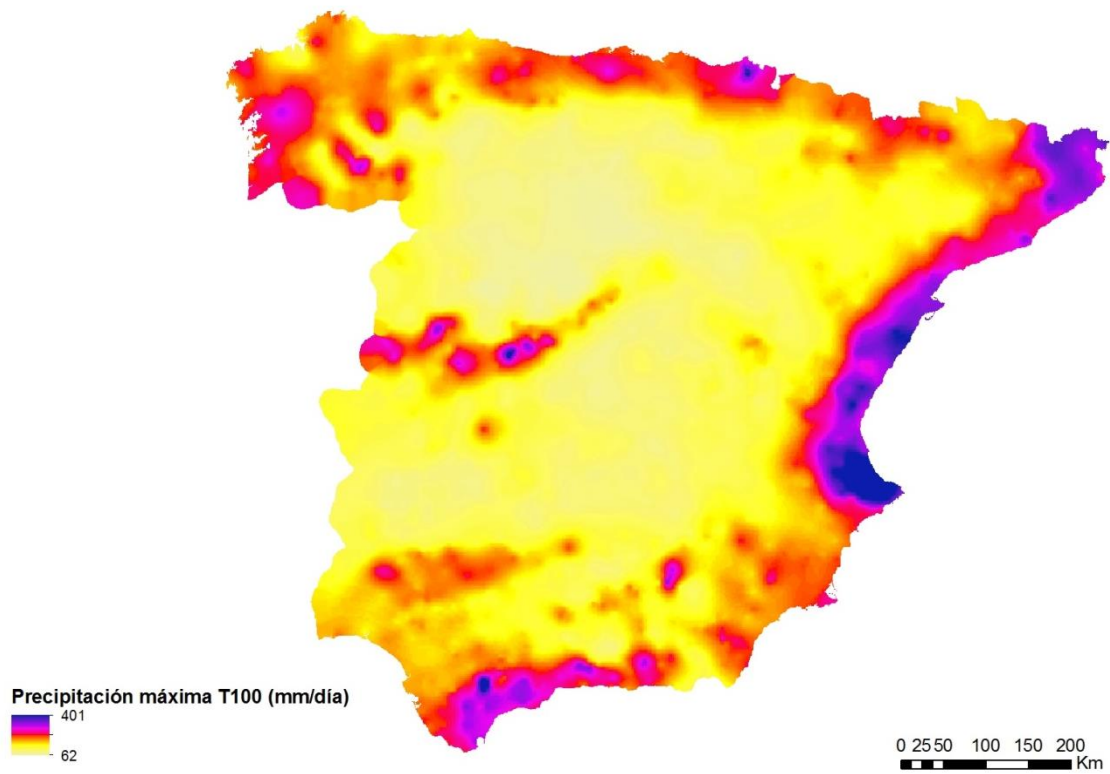


Figura 10.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima actual. Fuente: CauMax

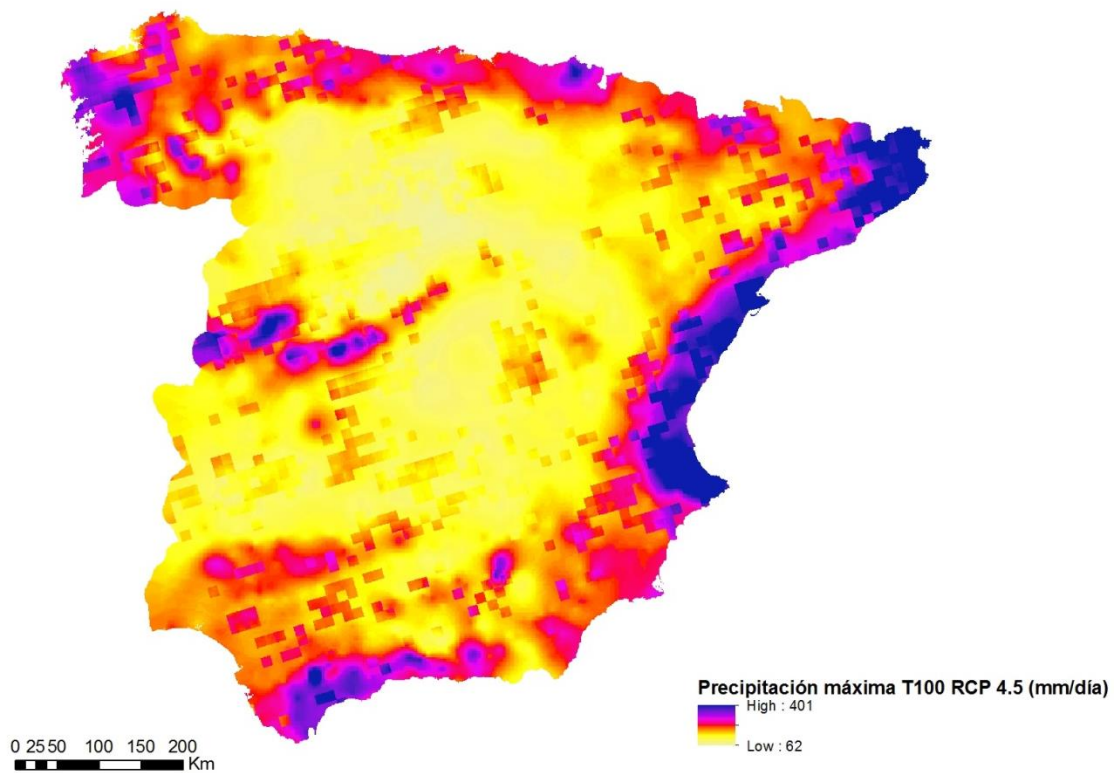


Figura 11.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima futuro según el escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 4.5

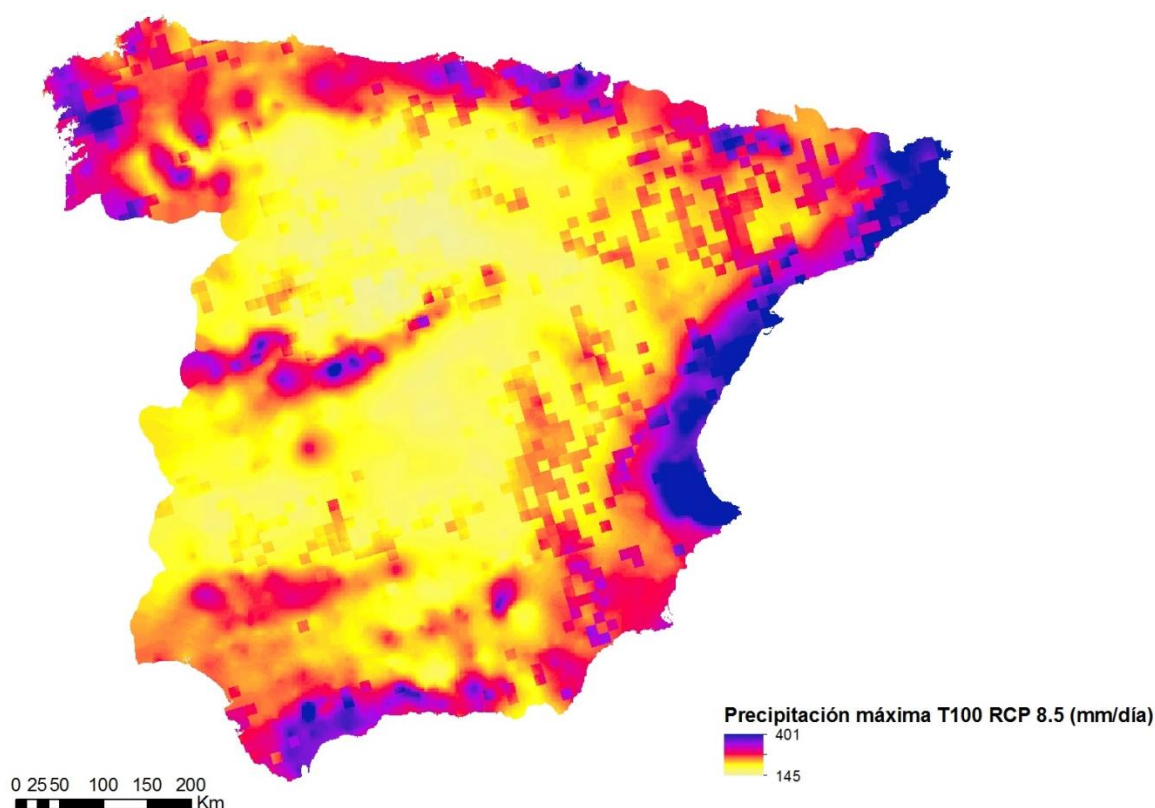


Figura 12.- Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años en clima futuro según el escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 8.5

Todas las celdas (de 500 m de ancho) incluidas dentro de la celda con cambio significativo (de 12.5 km de ancho) fueron multiplicadas por el cambio proyectado de la celda, mientras que aquellas incluidas en celdas sin cambio significativo mantuvieron su valor. Por lo tanto, solo se observarán cambios en la precipitación para esas zonas de cambio, permaneciendo inalterada el resto de superficie.

Es decir, que la precipitación areal con cambio climático (Figura 11 y Figura 12) difiere de la precipitación en clima actual (Figura 10) solo en aquellas celdas donde se ha detectado cambio. El resto de las celdas permanecen iguales, con los mismos datos.

Es importante mencionar que esto solo ha podido realizarse en la España peninsular, ya que CauMax no incluye esta información de base para las islas Baleares, islas Canarias, Ceuta y Melilla.

Una vez se dispone de los cambios en la precipitación máxima diaria areal, es necesario conocer la posible estimación de su influencia en el régimen de avenidas y obtener los cauces en los que pueda preverse un aumento significativo de la transformación precipitación-escorrentía con respecto al clima actual. Para ello, se han calculado los cambios en la precipitación máxima diaria acumulada utilizando las direcciones de flujo, para cada uno de los dos escenarios de emisión.

Es decir, el cálculo de la precipitación acumulada se realiza a partir de los datos de precipitación areal obtenidos anteriormente, la precipitación influenciada por el cambio climático según los dos escenarios de emisión.

Es importante resaltar que los posibles cambios en la precipitación máxima diaria acumulada no siempre son debidos a aumentos en las precipitaciones máximas “in situ”, sino que pueden ocurrir como consecuencia de cambios en precipitación en zonas de cabecera que no son importantes en sí mismos pero que pueden traducirse en mayores cambios en tramos medios y bajos.

La acumulación de la precipitación en la red de drenaje (obtenida a partir del Modelo Digital del Terreno utilizado por el propio programa CauMax, con una resolución igualmente de 500 m de ancho de celda, Figura 13) se realizó mediante herramientas de geoprocésamiento incluidas en software SIG.

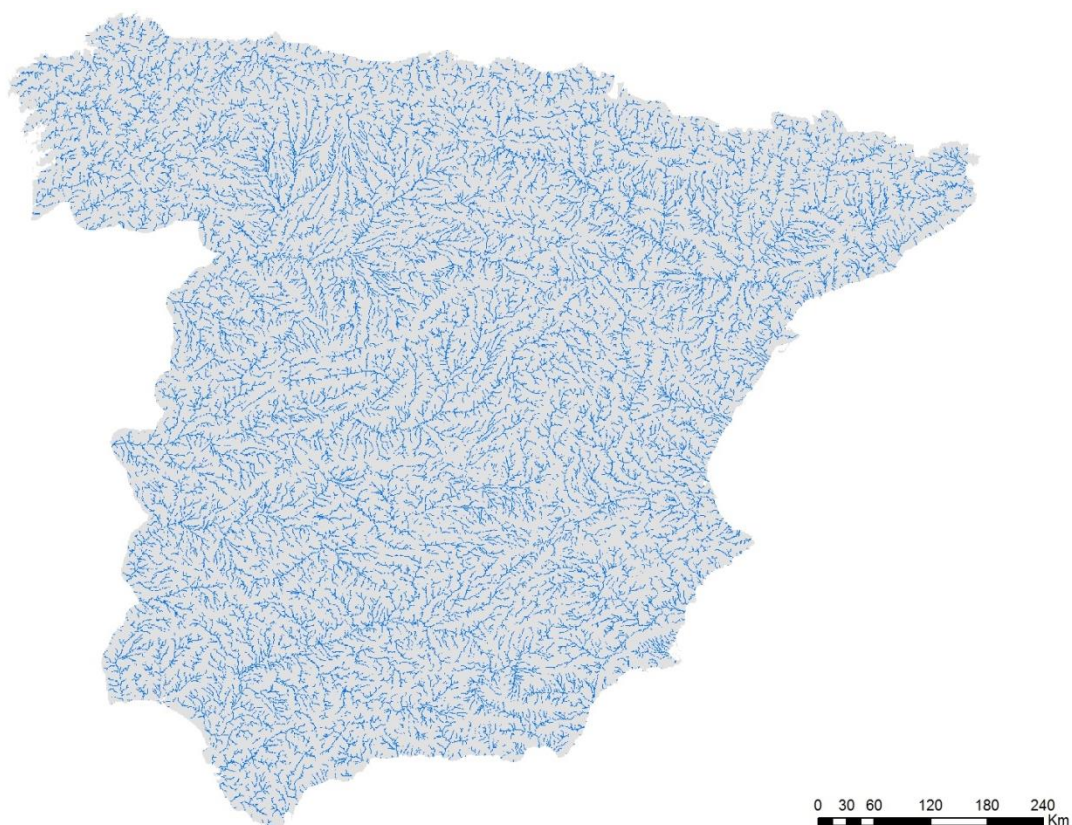


Figura 13.- Red hídrica creada a partir de las direcciones de drenaje

De esta manera, utilizando las direcciones de drenaje del terreno (dependientes de la cota del mismo) se obtiene un mapa en el que a medida que se avanza en las celdas de la red hídrica (empezando en las zonas de cabecera de cada río hasta la desembocadura), se va sumando la precipitación que llega a cada uno de los puntos de la red. Es un proceso acumulativo.

Es decir, se suma la precipitación de todas las celdas que confluyan en un mismo punto, aguas arriba de cada celda, por lo que el punto de desagüe de una cuenca tendrá la precipitación acumulada de todas las celdas incluidas en dicha cuenca.

Se han obtenido tres mapas de precipitación acumulada, uno por cada una de las opciones (clima actual y dos escenarios de emisión para las proyecciones de clima futuro). De esta forma, comparando las situaciones en clima futuro con respecto a la opción de clima actual,

pueden valorarse los posibles cambios en la precipitación acumulada a lo largo de los distintos cauces de la red hídrica (mapas de diferencias relativas).

Este mapa ha sido el utilizado para determinar los puntos de la red que pueden ser más propensos a sufrir cambios en el régimen de inundación como consecuencia del cambio climático.

6.3. Localización de tramos de la red hídrica con cambios relevantes en la precipitación máxima acumulada

Dado que el objetivo de esta metodología ha sido incorporar la influencia del cambio climático en el riesgo de avenidas, sólo se han considerado los resultados positivos de los cambios en la precipitación máxima acumulada por encima de un umbral, es decir, los tramos donde la precipitación máxima diaria acumulada es significativamente mayor en clima futuro que en clima actual, ya que no tiene sentido considerar resultados negativos en eventos de avenida, ni cambios mínimos en torno a 0%. Por ello, se ha establecido un umbral mínimo de cambio que determine los tramos relevantes.

Por ello, se calculó para cada Demarcación Hidrográfica el porcentaje de cambio medio que supone la precipitación asociada al percentil 83 respecto a la precipitación en periodo control, considerando todas las celdas y modelos dentro de cada ámbito territorial.

De esta manera, se obtiene el porcentaje de cambio (correspondiente a dicho percentil 83) por debajo del cual no se debería considerar ningún cambio como relevante. Estos umbrales obtenidos como resultado de este análisis difieren en función de la Demarcación, encontrándose entre el 18-23%.

No obstante, se ha comprobado que, dado que la relación precipitación-caudal no es lineal, es posible que algunos incrementos de precipitación por debajo de este umbral puedan llegar a traducirse en aumentos muy elevados de los caudales asociados, con el aumento del riesgo de inundación que implica. En consecuencia, para analizar los cambios en la ley de frecuencia de caudales, se ha reducido el umbral de cambio en los mapas de precipitación máxima diaria acumulada a un 10%.

A continuación se presenta un ejemplo de tramos con cambio relevante, donde la precipitación máxima diaria acumulada presenta cambios superiores al 10%. Se facilitan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5). El caso de ejemplo se corresponde con la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

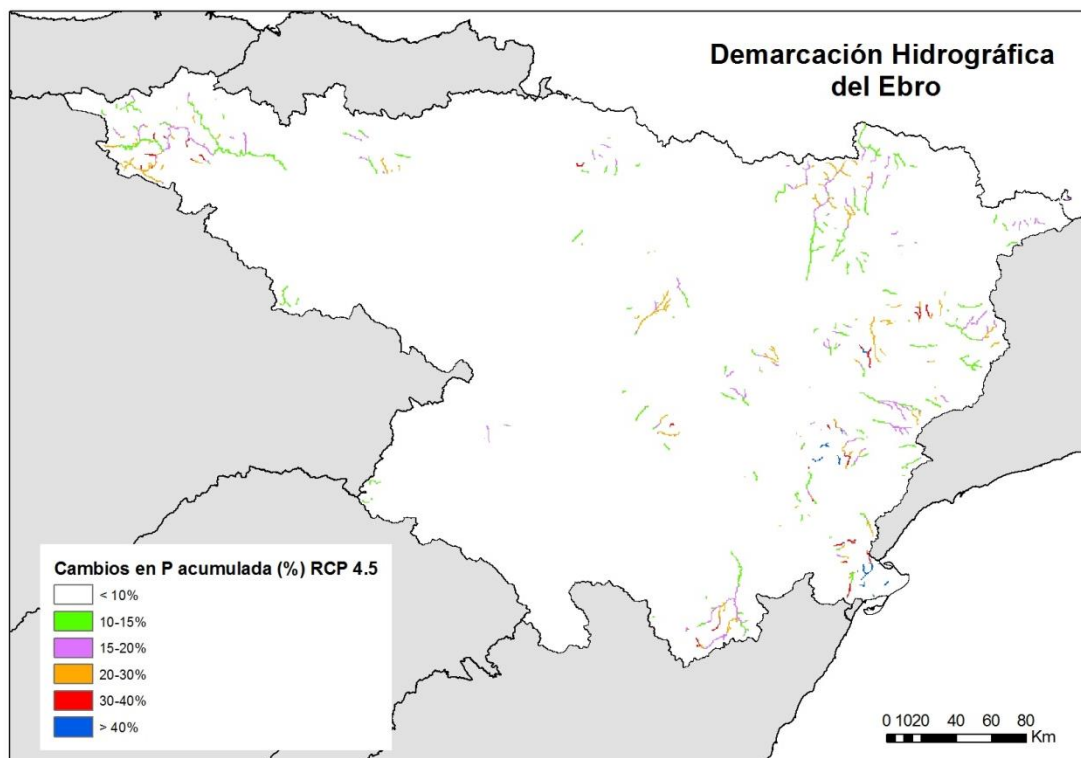


Figura 14.- Cambios por encima del umbral del 10% en la precipitación máxima diaria acumulada para la Demarcación Hidrográfica del Ebro, en el escenario de emisión RCP 4.5

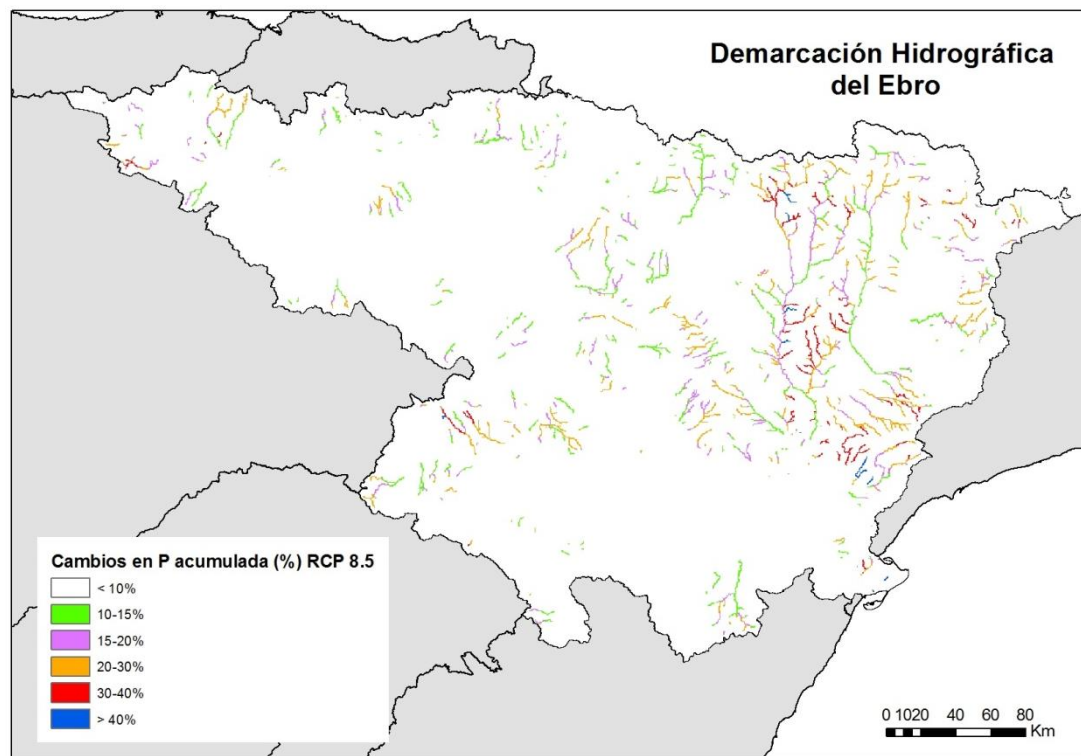


Figura 15.- Cambios por encima del umbral del 10% en la precipitación máxima diaria acumulada para la Demarcación Hidrográfica del Ebro, en el escenario de emisión RCP 8.5

7. Valoración cualitativa de los cambios en la ley de frecuencia de caudales

7.1. Método racional modificado para el cálculo del caudal de T100

Una vez se dispone de los cambios en la precipitación máxima diaria acumulada y según las premisas fijadas ya mencionadas, se ha comprobado cómo se traduce su influencia directamente en el régimen de caudales.

La evaluación de los cambios en la ley de frecuencia de caudales máximos diarios se ha realizado tras la aplicación del Método Racional modificado, según se recoge en la norma 5.2 – IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Este método permite calcular el caudal instantáneo máximo de descarga en un punto de desagüe en base a un periodo de retorno. Este método es de uso habitual en el cálculo de obras hidráulicas. A pesar de su simplicidad, sus resultados permiten una aproximación cualitativa acertada de los caudales que se pueden generar en el punto deseado.

Para dicha valoración, se han seleccionado diversos tramos de la red de drenaje de cada Demarcación Hidrográfica que presuponen al menos un cambio del 10% en la precipitación diaria máxima acumulada. Además, estos tramos estudiados se han escogido atendiendo a posibles zonas de riesgo urbano próximas (en función de la información cartográfica de la capa BCN200), ya se trate de ARPSIs de primer ciclo o zonas donde se prevea un cambio, pero no ARPSIs.

La comparativa entre los caudales obtenidos para clima actual y los resultantes de considerar el cambio climático se ha llevado a cabo utilizando el programa CauMax en aquellas Demarcaciones Hidrográficas donde el programa tiene habilitado el cálculo. En las que no es el caso, se ha realizado manualmente.

Dado que este programa únicamente permite el cálculo por el método racional de los caudales de avenida asociados a tramos cuya superficie de cuenca sea inferior a 50 km², se han seleccionado ejemplos que cumplan esta premisa al considerarse suficientes para mostrar una valoración cualitativa del cambio en la ley de frecuencia de caudales.

El método racional modificado (en su última versión) utiliza cuatro parámetros para el cálculo del caudal: el coeficiente de escorrentía, la intensidad de la precipitación, el área de la cuenca y un coeficiente de distribución temporal de la precipitación K_t , y sigue la siguiente formulación:

$$Q_T = \frac{I(T, t_c) \cdot C \cdot A \cdot K_t}{3,6}$$

donde:

PARÁMETRO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Q_T	m^3/s	Caudal máximo anual correspondiente al período de retorno T , en el punto de desagüe de la cuenca
$I(T, t_c)$	mm/h	Intensidad de precipitación correspondiente al período de retorno considerado T , para una duración del aguacero igual al tiempo de concentración (t_c) de la cuenca
C	<i>adimensional</i>	Coefficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie considerada
A	km^2	Área de la cuenca o superficie considerada
K_t	<i>adimensional</i>	Coefficiente de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación

Tabla 3.- Descripción de los parámetros de la fórmula para el cálculo del caudal según el método racional modificado

A continuación se describen brevemente los principales parámetros y la fuente de información que se ha utilizado para cada uno de ellos.

- Intensidad de precipitación (mm/h)

Es la razón de la altura que alcanza la lluvia respecto al tiempo. Se calcula para un periodo determinado de lluvia (en este caso, 100 años) y a una duración de aguacero, que será igual al tiempo de concentración de la cuenca. Su valor se encuentra en función de la intensidad media diaria de la precipitación corregida para el periodo de retorno de 100 años (I_d) y de un factor de intensidad adimensional (F_{int}).

$$I(T, t) = I_d \cdot F_{int}$$

A su vez, la intensidad media diaria de la precipitación corregida para T100 (I_d) depende de la propia precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno de T100 y de un factor reductor de la precipitación por el área de la cuenca, según la siguiente expresión:

$$I_d = \frac{P_d \cdot K_A}{24}$$

El valor de la precipitación diaria adoptado ha sido el obtenido a partir de la realización de estos trabajos. Es decir, la precipitación en clima actual ha sido la extraída directamente del ráster de precipitaciones máximas diarias disponible en el programa CauMax (Figura 10), pero la precipitación máxima diaria con cambio climático ha sido la calculada y mostrada en la Figura 11 y la Figura 12. Tal y como indica la norma, para la aplicación de este método se ha utilizado la media areal del valor de precipitación máxima en la cuenca.

Con respecto al factor de intensidad, es el factor que introduce la torrencialidad de la lluvia en el área de estudio. Depende de la duración del aguacero y el periodo de retorno. Aunque

en la norma de la Instrucción de Carreteras se especifica que debe escogerse el mayor valor del factor de intensidad obtenido tras la aplicación de dos formas de cálculo, para estos trabajos se ha escogido directamente una de ellas, la opción A. Esta forma utiliza el mapa del índice de torrencialidad en función de la zona geográfica y la duración del aguacero.

- Coeficiente de escorrentía (adimensional)

Es el coeficiente que define la parte de la precipitación de intensidad I (T , t_c) que genera el caudal de avenida en el punto de desagüe de la cuenca. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} - 1\right) \left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 11\right)^2}$$

donde:

PARÁMETRO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
P_d	<i>mm</i>	Precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno de 100 años
K_A	<i>adimensional</i>	Factor reductor de la precipitación por área de la cuenca
P_0	<i>mm</i>	Umbral de escorrentía

Tabla 4.- Descripción de los parámetros de la fórmula para el cálculo del coeficiente de escorrentía según el método racional modificado

El umbral de escorrentía, la precipitación mínima que debe caer sobre la cuenca para iniciar la generación de escorrentía, se ha calculado a partir de la información disponible dentro del programa CauMax.

El valor inicial del umbral de escorrentía ha sido también modificado según un coeficiente corrector, tal y como indica la norma y como permite el programa CauMax. Se trata del valor medio para la cuenca que se ha valorado en cada caso.

- Área de la cuenca (km^2)

Es la superficie medida en proyección horizontal que drena al punto de desagüe que se determina en cada caso, según el interés para la valoración del cambio climático. Se ha calculado a partir de herramientas GIS.

- Coeficiente de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación (K_t , adimensional)

Es el coeficiente que tiene en cuenta la falta de uniformidad en la distribución de la precipitación a lo largo del tiempo. Se encuentra en función del tiempo de concentración de la cuenca.

Este procedimiento se aplicará a todos los tramos de estudio seleccionados, obteniéndose para cada Demarcación una visión general de la posible modificación de los caudales de avenida como consecuencia de la influencia del cambio climático. Se ha cumplimentado para cada tramo una tabla resumen similar a la que se incluye a continuación.

◆ TRAMO ANALIZADO X

Municipio		
ARPSI		
Coordenadas		
Área (km ²)		
Tiempo de concentración (h)		
Factor de torrencialidad (I1/Id)		
Umbral de escorrentía (mm)		
Umbral de escorrentía aplicado el coeficiente corrector (mm)		
	CLIMA ACTUAL	RCP 4.5
T100 actual Precipitación (mm)		
T100 actual Precipitación corregida en función del área (mm)		
Intensidad (mm/h)		
Coefficiente de escorrentía (C)		
CAUDAL T100 (m³/s)		
Porcentaje de cambio de precipitación máxima diaria acumulada		
Porcentaje de cambio en caudal		

Imagen de la cuenca correspondiente al tramo analizado a partir de la aplicación CauMax

Tabla 5.- Tabla tipo facilitada a las Confederaciones Hidrográficas con el estudio de los cambios porcentuales en precipitación y caudales para cada tramo valorado

Todas las tablas cumplimentadas según los tramos o puntos de la red hídrica escogidos en cada caso, se han facilitado a las Confederaciones Hidrográficas para su valoración, como ejemplo de lo que se obtiene a partir de esta herramienta a la hora de calcular la posible influencia del cambio climático en el caudal de avenida y como ayuda en la delimitación de nuevas ARPSIs.

7.2. Valoración

En este último punto se aborda la valoración cualitativa de los cambios porcentuales observados en precipitación y caudal para cada tramo estudiado.

A cada Confederación se le ha ofrecido una tabla similar a la que se incluye a continuación a modo de ejemplo. Es necesario mencionar que la escala de valoración ofrecida, donde se indica si el cambio es bajo, medio o alto para caudal y precipitación, se ha particularizado para cada Demarcación, ya que la realidad climática de cada zona es muy variable y no se consideró adecuado homogeneizar dicha valoración.

	CAMBIOS PORCENTUALES		CAMBIOS CUALITATIVOS	
	% ΔP	% ΔQ	ΔP	ΔQ
	RCP 4.5			
Tramo 1 –	%	%	Medio	Bajo
Tramo 2 -	%	%	Medio	Medio
Tramo 3 -	%	%	Medio	Medio
Tramo ...	%	%	Medio	Medio
	RCP 8.5			
Tramo ...	%	%	Alto	Alto
Tramo ...	%	%	Alto	Medio
Tramo ...	%	%	Alto	Alto
Tramo ...	%	%	Alto	Muy Alto
	Cambio en la precipitación 10 – 20 % - Bajo 20 – 30 % - Medio > 30 % - Alto		Cambio en el caudal 25 – 50 % - Bajo 50 – 75 % - Medio 75 – 100 % - Alto > 100 % - Muy Alto	

Tabla 6.- Tabla tipo facilitada a las Confederaciones Hidrográficas con la valoración cualitativa de los cambios porcentuales observados en el estudio de sus tramos

8. Resumen

Como resultado de aplicar la metodología para la incorporación del cambio climático en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, se han obtenido distintas zonas de cambio para las precipitaciones máximas diarias en el futuro en el periodo de retorno T100 y para cada una de las Confederaciones Hidrográficas estudiadas.

El cambio en las precipitaciones máximas diarias está directamente relacionado con las proyecciones de modelos climáticos y con los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero considerados. Estos escenarios y proyecciones son las únicas herramientas vigentes para estudiar las alteraciones climáticas. Sin embargo, tanto la variabilidad natural del clima como las hipótesis asumidas hacen que se deba tener en cuenta la incertidumbre asociada a los cambios, y asumirla a la hora de considerar los resultados obtenidos.

La disparidad observada de las celdas de cambio en algunas zonas de cada Confederación, distintas según el escenario de emisiones considerado, es consecuencia de las hipótesis asumidas y de la posible evolución del clima según estas emisiones, por lo que no se puede descartar ninguno de los dos escenarios de emisión o considerar uno peor que otro. Ambos son igualmente posibles.

A la luz de los resultados obtenidos, la relación entre los incrementos de precipitación y de caudal no es equivalente, siendo esta relación por lo general exponencial. De hecho, como consecuencia de que la relación precipitación-escorrentía no depende únicamente de la precipitación sobre la cuenca, sino que se encuentra condicionada además por otros factores (humedad antecedente o intensidad de la precipitación), estos resultados no pueden ser extrapolados espacialmente ni a zonas próximas ni a zonas de características similares. Es conveniente realizar los cálculos particularizadamente para cada tramo.

De igual forma, con respecto a las variaciones en el riesgo de inundación, es necesario analizar las características particulares de cada tramo. Por lo general, en aquellas zonas donde el cauce presente suficiente profundidad para desaguar los aumentos de caudal, es de esperar un aumento en el calado y de las velocidades. Esto, además, implicaría aumentos en la erosión del cauce y posibles desbordamientos puntuales.

Por otro lado, en las zonas donde el cauce es difuso o de poca profundidad y calado, los aumentos de caudal pueden favorecer incrementos en la extensión de la zona inundable y un posible aumento del riesgo de inundación al alcanzar bienes antes no afectados, entre otras consecuencias.

En definitiva, la aplicación de esta metodología a la revisión de la EPRI de cada Demarcación Hidrográfica, ha permitido determinar las zonas con posible influencia del cambio climático. Se ha descubierto como un instrumento válido y suficientemente preciso que facilita la identificación de posibles nuevas ARPSIs a las Confederaciones Hidrográficas.

9. Bibliografía

Döll, P. Jiménez-Cisneros B. Oki T., Arnell N.W., Cogley J.G., Benito G., Kundzewicz Z.W., Mwakalila S., Jiang T. (2015). Integrating risks of climate change into water management. *Hydrological Sciences Journal*, 60 (1), 4-13.

Garijo, C., Mediero, L., Garrote, L. (2018). Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional. *Revista Ingeniería del Agua*, 22 (3), 153-166.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/ CBO9781107415324.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132.

Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakalila, 2014: *Freshwater resources*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.

MITECO, 2018. *Inundaciones y cambio climático*.

Radulescu, D., 2017: *Climate Change - methods and processes planned for the 2nd cycle and Adaptation strategy. Findings from the Questionnaire. Presentation at the European Working Group on Floods, Bucharest, 14-15 March, 2017. 17 pp.*