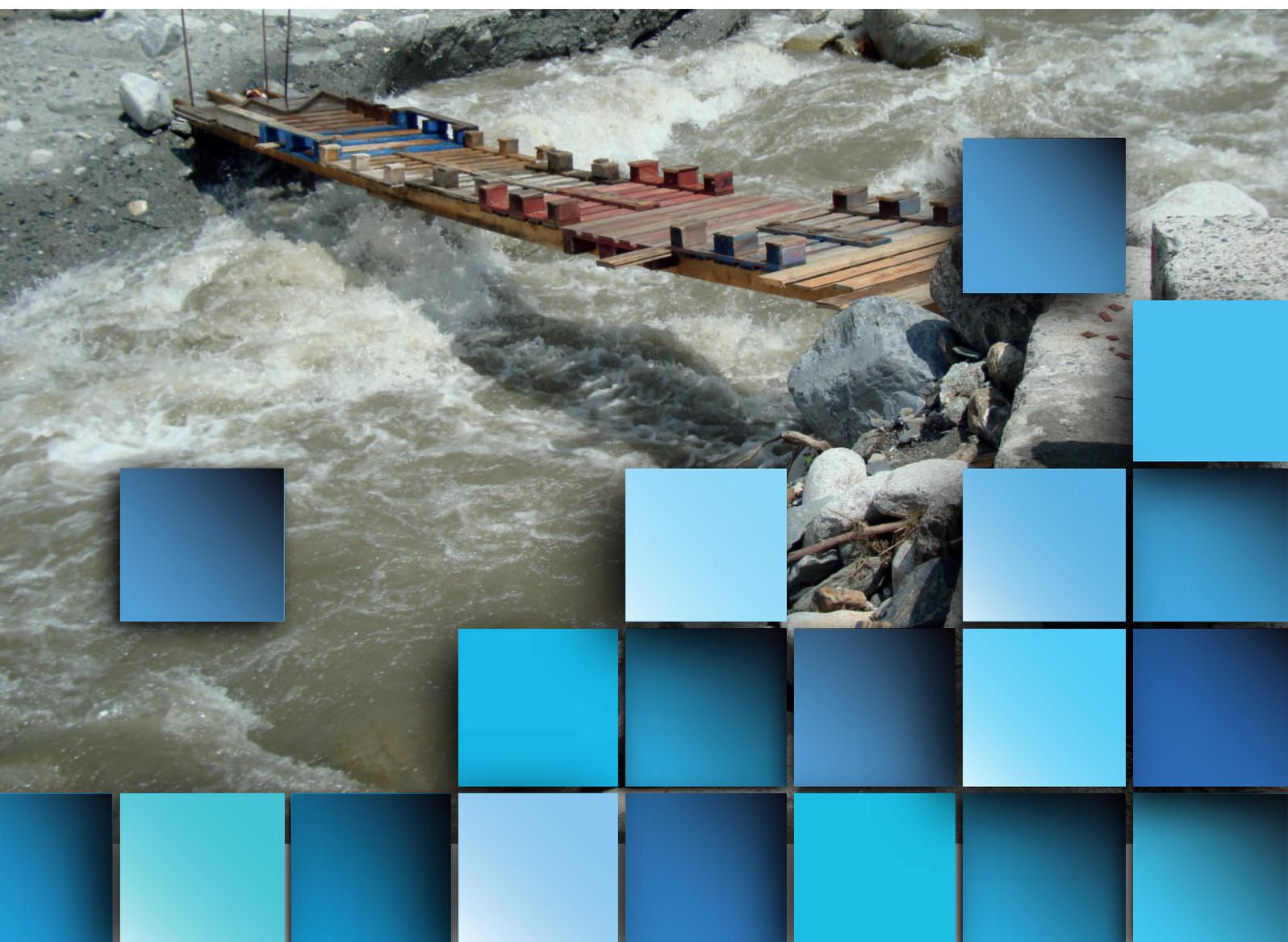


CARACTERIZACIÓN DE LA NIEVE EN ESPAÑA Y SU INCIDENCIA EN LAS INUNDACIONES



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CARACTERIZACIÓN DE LA NIEVE EN ESPAÑA Y SU INCIDENCIA EN LAS INUNDACIONES





MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO

Caracterización de la nieve en España y su incidencia en las inundaciones

Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico
Dirección General del Agua
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
2021

Elaboración y redacción: Spesa Ingeniería S.A., 2019.

Diseño y maquetación: Tragsatec. Grupo Tragsa

PRESENTACIÓN

Las inundaciones constituyen uno de los peligros naturales que más daños ocasiona actualmente a nivel mundial, estimándose de aproximadamente un tercio de las pérdidas económicas originadas por los riesgos naturales en Europa; junto con las tormentas de viento, constituyen los desastres naturales acontecidos con mayor frecuencia en el continente.

Este motivo ha propiciado que, en los últimos tiempos, se haya profundizado en el estudio de todas las variables de origen natural y antrópico que favorecen el desarrollo de los episodios de inundación, especialmente en el escenario de cambio climático al que actualmente está expuesto el planeta. En este contexto, la Comisión Europea en el artículo 14 de la Directiva 2007/60/CE de inundaciones y en el artículo 21 del Real Decreto 903/2010 que la transpone, indica que las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones indicadas en los apartados 1 (Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación) y 3 (Planes de Gestión del Riesgo de Inundación).

El primero de estos documentos (la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación- EPRI), recoge en el 2º ciclo de aplicación de la Directiva precisamente un estudio de la influencia del cambio climático en las inundaciones pluviales y fluviales, profundizando en aspectos como los cambios en las precipitaciones máximas diarias y su incertidumbre, o definiendo las zonas y tramos con cambio relevante en la precipitación. Los segundos (Planes de Gestión del Riesgo de Inundación - PGRI), a este respecto, incluyen medidas de aplicación como la "elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación: leyes de frecuencia de caudales, efecto del cambio climático, modelización de los riesgos de inundación y su evaluación, etc."

Entre las variables que se han venido analizando en los trabajos de cambio climático efectuados y que inciden especialmente en el riesgo de inundación, destaca el fenómeno nival: las precipitaciones de nieve, su acumulación y su fusión, con los consecuentes caudales de agua generados, cuya magnitud y momento de ocurrencia constituyen factores a tener en cuenta en la estimación de este riesgo.

El objeto principal de estos estudios es analizar las posibles repercusiones del cambio climático en el fenómeno nival, y cuál es su incidencia final en el riesgo de inundación. Algunos aspectos que se desarrollan son: cómo la influencia del C.C. en la nieve debe considerarse en la EPRI y plantearse en la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación; la definición de zonas de afección según los efectos en la hidrología; y la estimación cualitativa de la repercusión en los caudales máximos diarios de la cuenca.

Por estas razones y, enmarcado en el pliego de prescripciones técnicas encomendado a Tragsatec para la contratación del "Estudio de los efectos del cambio climático en la nieve, su incidencia en el riesgo de inundación y su incorporación a la EPRI de 2º ciclo", la empresa Spesa Ingeniería S.A ha elaborado el presente trabajo, que pone de manifiesto la influencia del clima futuro en el comportamiento nival de nuestro territorio, mostrando cuáles pueden ser los nuevos escenarios a los que el mismo se enfrentará.

El presente documento se desarrolla en tres bloques temáticos diferenciados:

- En el **PRIMER BLOQUE: CARACTERIZACIÓN DE LA NIEVE EN ESPAÑA Y SU INCIDENCIA EN LAS INUNDACIONES**, se hace un recorrido por los aspectos que relacionan el fenómeno nival con nuestro país, mencionando las condiciones meteorológicas que lo propician, la distribución territorial de las cuencas nivales y la notable importancia que tiene como recurso hídrico condicionante de los episodios de inundación.
- En el **SEGUNDO BLOQUE: EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL FENÓMINO NIVAL (CLIMA FUTURO)**, se muestran los patrones condicionantes del fenómeno nival en la actualidad que definirán la forma y cuantía de la aportación nival a los flujos de caudales en un contexto de cambio climático. Además, se analizan las variables que intervienen en este fenómeno para un año medio en el sistema del Pirineo.
- En el **TERCER BLOQUE: CONCLUSIONES Y TERRITORIALIZACIÓN DEL EFECTO EN LAS INUNDACIONES DE LA NIEVE POR EL CAMBIO CLIMÁTICO**, se extraen las conclusiones alcanzadas sobre la influencia estimada del fenómeno nival en el comportamiento hidrológico futuro y en la contribución que puede tener en los eventos de crecidas originadas por la fusión de las reservas nivales acumuladas, concretamente en los sistemas nivales del Cantábrico, Pirineo, Sierra Nevada y Sistema Central.

ÍNDICE

1. CARACTERIZACIÓN DE LA NIEVE EN ESPAÑA Y SU INCIDENCIA EN LAS INUNDACIONES	7
2. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL FENÓMENO NIVAL (CLIMA FUTURO).....	11
3. CONCLUSIONES Y TERRITORIALIZACIÓN DEL EFECTO EN LAS INUNDACIONES DE LA NIEVE POR EL CAMBIO CLIMÁTICO.	14
 PIRINEO.....	14
 SIERRA NEVADA.....	26
 SISTEMA CENTRAL	39
 CORDILLERA CANTÁBRICA	51
 CUADRO RESUMEN	64

1. CARACTERIZACIÓN DE LA NIEVE EN ESPAÑA Y SU INCIDENCIA EN LAS INUNDACIONES

La cuantificación de los recursos hídricos en forma de nieve tiene un indudable interés al corresponder a un sistema natural de regulación del flujo de agua; por ello en muchos países se vienen realizando en las últimas décadas estudios encaminados al análisis del comportamiento dinámico de estos recursos.

En España este fenómeno alcanza especial relevancia en las cuencas de cabecera de los Pirineos, la Cordillera Cantábrica, los Sistemas Central e Ibérico y Sierra Nevada, dominios que en general coinciden con áreas que estuvieron ocupadas por los hielos durante la última glaciación.

Los cambios en el régimen nival en los sistemas montañosos, son sin duda, uno de los más claros indicadores de que pudiera estar produciéndose un cambio climático en nuestro planeta, puesto que es extremadamente sensible al cambio en las condiciones meteorológicas globales, y de ahí que desde hace más de 30 años se esté estudiando de forma exhaustiva por parte de los organismos competentes.

En la época actual, donde la sociedad demanda un desarrollo sostenible unido a un tratamiento respetuoso con el medio ambiente, en materia de agua es primordial conocer los recursos hídricos disponibles cualitativa y cuantitativamente.

Dentro del conjunto de los recursos hídricos en las zonas de alta montaña, se encuentran los derivados de la fusión nival. El control de estos recursos cada día cobra mayor importancia y se emplean cada vez más esfuerzos en aras de poder determinar la cuantificación del equivalente de agua en forma de nieve, así como la aportación de agua a los ríos procedente de su fusión y también la previsión de estas dos variables. Hay que tener en cuenta que poder cuantificar dichos recursos no sólo es importante a la hora de la gestión ordinaria que cada uno de los Organismos de Cuenca realiza, también adquiere gran relevancia para poder gestionar los fenómenos hidrológicos extremos, tanto sequías como avenidas, con el fin de intentar paliar los daños que producen.

Las condiciones meteorológicas de las áreas montañosas españolas, así como sus características geográficas y geomorfológicas, hacen que el fenómeno nival se presente con cierta importancia durante períodos muy concretos del año hidrológico, principalmente entre diciembre y mayo, dependiendo de la zona, y que presente una gran variabilidad espacio-temporal.

Estas precipitaciones acumuladas en forma de nieve se ajustan a un modelo lineal entre noviembre y abril, mientras las fusiones se centran en el período marzo-junio, lo que implica un importante efecto regulador de los recursos hídricos, retardando la incorporación de la escorrentía a los cauces fluviales, puesto que las precipitaciones caídas en forma de nieve durante el invierno quedan acumuladas en las montañas. Posteriormente, se inicia la fusión de modo lento, acelerándose el proceso entre finales de marzo y abril y prolongándose hasta el mes de julio en las zonas más altas del macizo pirenaico. Esta circunstancia asegura un caudal base en los ríos durante el inicio del período estival que se caracteriza por bajas precipitaciones, elevada evapotranspiración e importantes demandas. Por todo ello, el estudio de la evolución de las futuras aportaciones en forma de nieve, es decisivo para cuantificar este fenómeno de regulación tan importante.

La incorporación a la red fluvial de estos recursos hídricos se produce de dos modos fundamentales:

En determinadas cuencas la precipitación nival alcanza valores significativos durante el invierno, que conducen a espesores de nieve persistentes y a la fusión de esta nieve en primavera, que se va incorporando paulatinamente a los embalses a modo de escorrentía (situación ordinaria de regulación). Es la situación propia de casi todas las áreas montañosas españolas y la característica más significativa del Pirineo y Sierra Nevada.

En algunos casos (situaciones climatológicas muy concretas con aumento rápido de la temperatura, combinado con lluvias), puede producirse una fusión importante de la nieve en períodos cortos de tiempo, dando lugar a elevados caudales en los cauces fluviales (avenidas).

Con todos estos comentarios, se pone en valor la necesidad de estudiar los posibles cambios que se pueden producir en las acumulaciones nivales en nuestro país con el paso de los años, llevando a la elaboración de un registro anual sobre el estado de la nieve en las cordilleras españolas y a la generación de información en

tiempo casi-real de la evolución de la cubierta nival y los caudales fluyentes procedentes de su fusión para conseguir una gestión óptima de los recursos disponibles. Ello conllevó la implantación progresiva de la actual red de medición nival compuesta por pértigas y a la que se van incorporando progresivamente otros elementos más eficientes como los telenivómetros.

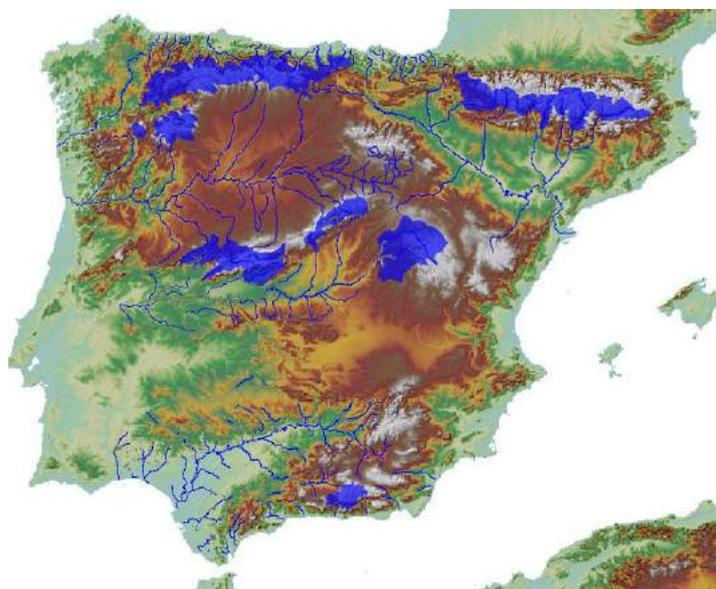
Ha quedado patente la importancia de la nieve en el conjunto de variables que conforman los recursos hídricos y que condicionan las situaciones de crecida importante de caudales en determinadas circunstancias, y tanto es así, que dentro del territorio español, se han definido las áreas con marcado comportamiento nival. En ellas se han ido realizando de modo sistemático las campañas de medición invernal y se han tomado datos de los espesores en la red de pértigas y se realizan ensayos para determinar la densidad de la nieve, valores que alimentan la base de datos histórica, tan importante para analizar la tendencia en su evolución temporal.

Como complemento a este método de trabajo, se vienen realizando en cada campaña, análisis de las imágenes satélite en las zonas y fechas adecuadas para contrastar los resultados obtenidos por ambos métodos y proceder al ajuste y calibración de estos métodos de trabajo.

En la siguiente tabla, aparecen reflejadas las zonas nivales definidas y que son objeto de un estudio permanente por parte de la Dirección General del Agua, dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

SISTEMA	ADMINISTRACIÓN HIDRÁULICA	ÁREA NIVAL CONTROLADA (KM ²)	TOTAL ÁREA NIVAL CONTROLADA POR SISTEMA (KM ²)
CANTÁBRICO	CH Duero	5.030,4	15.703,5
	CH Ebro	681,5	
	CH Cantábrico	9.991,6	
PIRINEO	CH Ebro	10.559,7	10.990,2
	Agencia Catalana del Agua (ACA)	430,5	
SIERRA NEVADA	CH Guadalquivir	177	1.253,0
	Cuencas Mediterráneas Andaluzas (CMA)	1.076	
SISTEMA CENTRAL	CH Duero	1.851,7	16.791,3
	CH Tajo	14.939,6	
GALAICO-LEONÉS	CH Miño-Sil	4.912,6	4.912,6
TOTAL		49.650	49.650

Superficie modelizada diferenciada por macizos montañosos.



Mapa de la distribución geográfica de las zonas modelizadas (en color azul).

La influencia de la nieve en el total de aportaciones es muy variable según se trate de cada uno de los diferentes sistemas. Así, mientras en que el Sistema Central la nieve llegar a representar en su punto más alto (primavera) un total del 10% de las precipitaciones recibidas, este valor queda finalmente reducido a un 5% para el conjunto del año hidrológico.

Sin embargo, en sistemas con un comportamiento nival mucho más acentuado, como Sierra Nevada o el Pirineo, estos pueden subir hasta valores máximos de un 55% y 40% respectivamente, quedando para el conjunto del año hidrológico en valores de 45% y 28% respectivamente.

Si se cuantifican algunos de estos números, se observa que en sistemas como el Pirineo, se almacenan en un año medio unas reservas nivales de no menos de 1.500 hm³, llegando en algunos años a valores cercanos a los 2.500 hm³.

Estas importantes cantidades de agua almacenada en las montañas puede ocasionar importantes problemas de avenidas, con graves inundaciones que originan cuantiosas pérdidas materiales e incluso humanas, como las ocurridas por el río Garona, en el Vall D'Aran, en junio de 2013 producidas por un fuerte deshielo de los importantes espesores nivales acumulados tras un invierno generoso, agravado por un aumento en las temperaturas y precipitaciones líquidas en la zona. Todo ello provocó que el río Garona circulase por las poblaciones del valle, con un caudal muy crecido ocasionando graves inundaciones, tal y como se aprecian en las siguientes imágenes.

Esta zona del Pirineo es recurrente en este tipo de fenómenos, así en mayo de 2009 se produjeron importantes fusiones debidas al considerable aumento de temperatura en la zona, lo que provocó la rápida fusión de la nieve almacenada ocasionando nuevamente problemas de inundación en la zona.



Efectos de las inundaciones en las poblaciones del valle de Arán. Mayo de 2009



Garona en Bossost, mayo 2009

Este fenómeno se ha repetido en numerosas ocasiones y en distintos sistemas, ocasionando daños de mayor o menor consideración, pero qué duda cabe que la alteración del futuro régimen pluvial y de temperaturas, puede favorecer la ocurrencia de estos fenómenos con efectos destructivos aún mayores que los registrados en la actualidad.

Se hace por tanto muy necesario hacer un estudio de cuál será la influencia del clima futuro en el comportamiento nival y cuáles pueden ser los nuevos escenarios a los que deberemos enfrentarnos debidos a ello.

2. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL FENÓMINO NIVAL (CLIMA FUTURO).

Como se ha comentado en el punto anterior, la nieve es quizás uno de los fenómenos que depende en mayor grado de los cambios en las condiciones climatológicas que se produzcan en una zona, puesto que desde el primer momento depende de que el fenómeno pueda darse o no (precipitación en forma de nieve o precipitación líquida). Pero qué duda cabe de que también es función de su duración en las montañas y de la rapidez con que se produce el fenómeno de la fusión, que no sólo hará que desaparezca como recurso hídrico almacenado, sino que lo pondrá en circulación a través de los cauces fluviales. Estas aportaciones extras pueden ser de cierta consideración, según las condiciones de cada cuenca, que al sumarse a las ya existentes debidas a los flujos superficiales y subterráneos, contribuyen a las rápidas crecidas de caudales en los ríos de alta montaña, pudiendo ocasionar graves inundaciones en poblaciones, polígonos industriales, campos de cultivo, etc. como ha quedado patente en los ejemplos expuestos anteriormente.

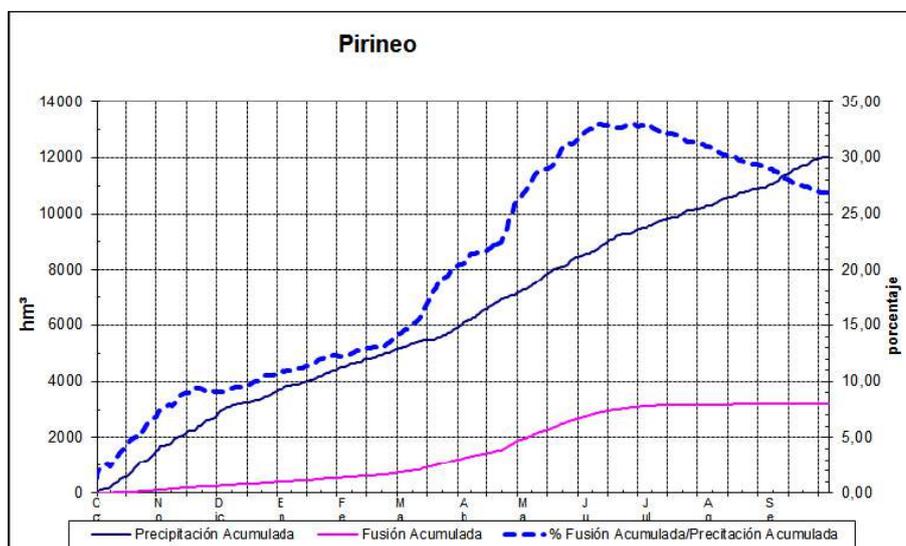
Para la evaluación de los efectos que los cambios en la climatología pueden ocasionar en el fenómeno nival, habrá que empezar determinando cuál es el patrón actual medio respecto de las precipitaciones en forma de nieve, de la duración temporal media en las cabeceras de los ríos y la rapidez con que se produce la fusión, puesto que todo este conjunto de comportamientos definirán la forma y cuantía en que se incorporan las aportaciones nivales a los flujos de caudales en estos ríos.

Así pues, se van a definir estos comportamientos en los cuatro sistemas analizados para, en el siguiente punto de esta memoria, analizar cuál será el nuevo comportamiento esperado, atendiendo a las previsiones establecidas por los diversos modelos climáticos, y poder así concluir cuáles pueden ser los escenarios futuros provocados por el fenómeno nival,

Para cubrir este objetivo se ha procedido a simular el conjunto de sistemas montañosos, con el modelo hidrológico Aster, y se han definido comportamientos medios tanto en las temperaturas, como en las acumulaciones nivales.

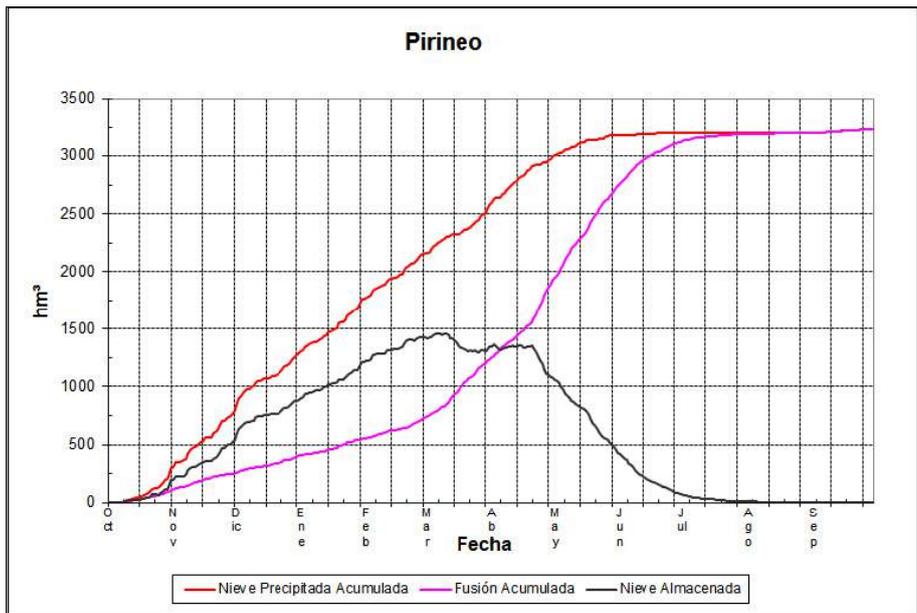
A continuación, se adjuntan las gráficas representativas correspondientes a las variables de interés, para un año medio en el entorno temporal actual y para el sistema del Pirineo.

En una primera gráfica se analizan tanto la precipitación acumulada como la evolución temporal de la fusión nival, y como resultado de ella el porcentaje de las aportaciones debidas a la fusión nival en relación al conjunto de aportaciones observadas. Esta gráfica aporta una información muy valiosa porque no sólo nos indica la importancia de la nieve en cada sistema, sino que además indica para qué periodos temporales estas aportaciones son más importantes y, por tanto, pueden contribuir en mayor medida a provocar situaciones de riesgo.



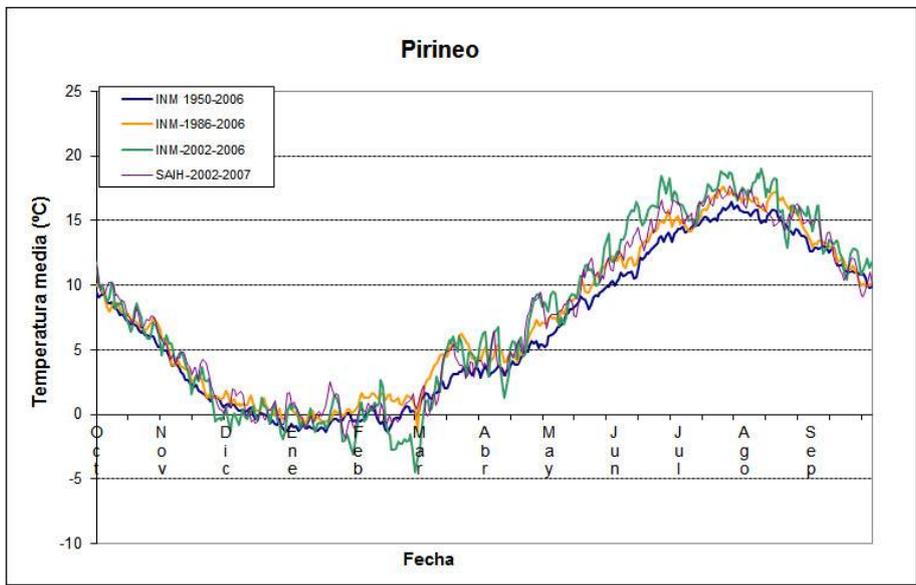
Evolución de la precipitación y fusión acumuladas en el Pirineo

En la segunda gráfica se trata exclusivamente la nieve, y se muestra cómo va evolucionando la precipitación en forma de nieve, y su acumulación en la cuenca. También se representa la evolución de la fusión nival, que comienza prácticamente al tiempo que se inician las primeras nevadas, pero que durante los primeros meses se produce especialmente en zonas bajas de la cuenca y por tanto no es significativa en cuanto a valores numéricos hasta que a finales de primavera, con el aumento de las temperaturas, se inicia la fusión en las zonas más altas donde se ha ido acumulando durante todo el invierno y primavera, produciéndose una rápido incremento en las aportaciones debidas a este fenómeno. Es importante resaltar cómo la alteración en el régimen de temperaturas podría hacer que la fusión en la cuenca se adelantase haciéndola coincidir con las lluvias primaverales aumentando así los flujos de agua líquida en los ríos, aumentando el riesgo de avenidas alimentadas en gran medida por la fusión de la nieve almacenada.



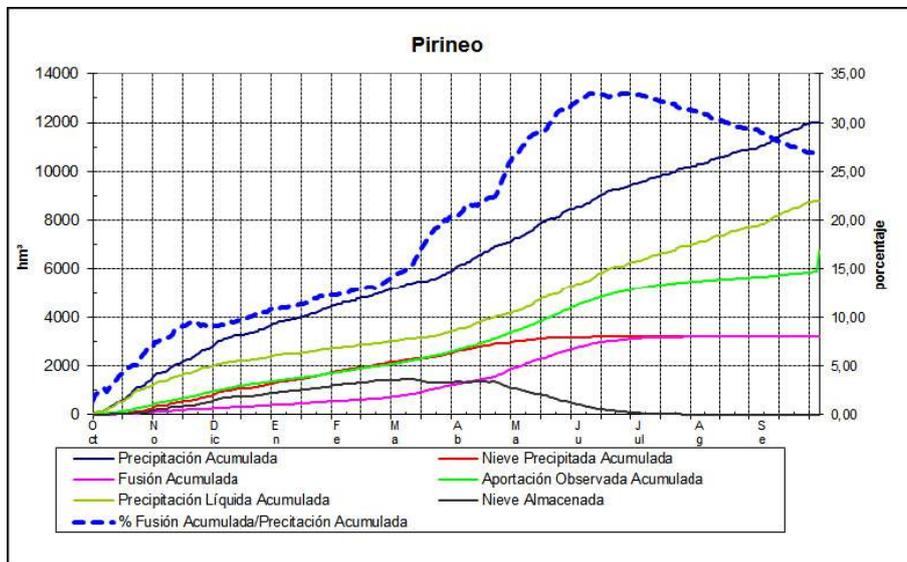
Evolución de la nieve precipitada, de la fusión acumulada y de la nieve almacenada en el Pirineo.

En la siguiente gráfica, se ha estudiado la evolución de la temperatura media en el sistema para diferentes periodos temporales, utilizando para ello diferentes fuentes de datos para las estaciones termométricas utilizadas, en función de la disponibilidad de datos que cada fuente ofrecía. Sin duda, tal y como se ha repetido en varias ocasiones, la evolución de esta variable será de vital importancia para determinar cuál será el cambio en la importancia de la nieve en cada sistema y cuál será el cambio en la forma en que este recurso pasa a formar parte de los flujos en los ríos (fusión).



Evolución de las temperaturas medias por intervalos de fechas en el Pirineo.

Por último, se ha recopilado en un único gráfico, buena parte de las variables anteriores y se ha añadido la serie correspondiente a las aportaciones observadas, que son las que de alguna forma dependen del comportamiento del resto. También se han desglosado las precipitaciones en lluvia líquida y nieve para determinar la importancia de la lluvia y de la fusión a las aportaciones totales de la cuenca.



Evolución de todas las magnitudes de interés para un año medio en el Pirineo.

Con el estudio de estas magnitudes, utilizando las series meteorológicas proporcionadas por los modelos climáticos con proyección futura, se puede evaluar cuáles son las modificaciones en el comportamiento nival de los diversos sistemas montañosos debidos al clima futuro, y las repercusiones que estos cambios pueden acarrear en cuanto a mayores o menores situaciones de riesgo de avenidas, debidas principalmente a la presencia de la nieve.

3. CONCLUSIONES Y TERRITORIALIZACIÓN DEL EFECTO EN LAS INUNDACIONES DE LA NIEVE POR EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Como consecuencia de la aplicación de las previsiones climáticas establecidas por el conjunto de modelos climáticos del proyecto Euro-Cordex, propuestos por el ICP y enmarcados dentro del escenario de emisión de gases de efecto invernadero (RCP 8.5), se pretende extraer las oportunas conclusiones sobre la influencia del fenómeno nival en el comportamiento hidrológico futuro, y en particular en la contribución que puede tener en los eventos de crecidas debidas a las aportaciones directas provenientes de la fusión de las reservas nivales acumuladas.

Para realizar esta comparativa, se ha procedido en primer lugar a simular con el modelo hidrológico Aster el intervalo de tiempo actual, que comprende el periodo 2006-2018, utilizando para ello los datos climatológicos de los modelos, en lugar de los datos observados por las estaciones meteorológicas de control.

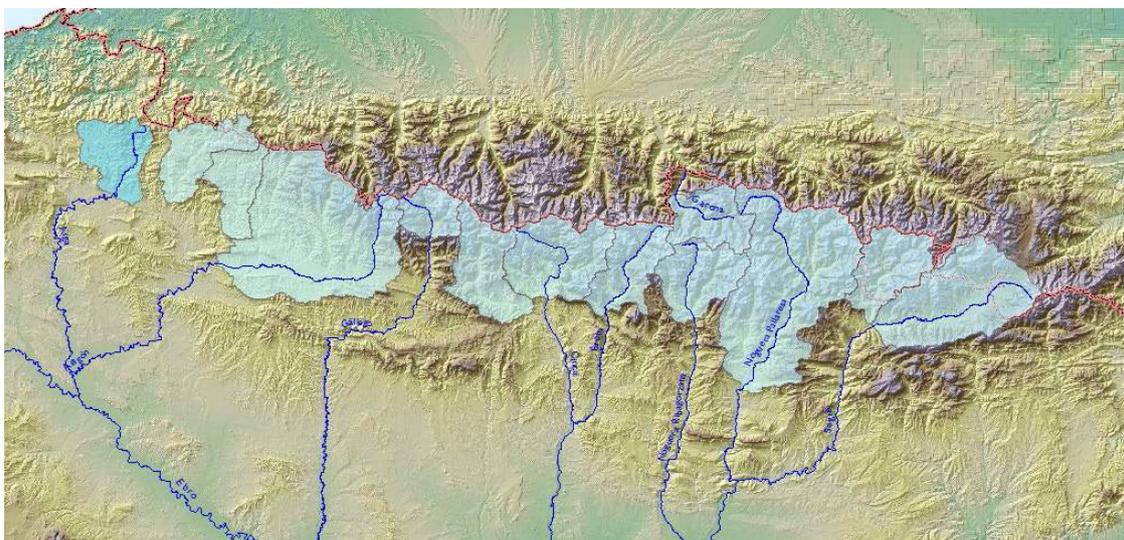
El análisis de los resultados obtenidos, irá encaminado principalmente a desglosar los cambios en todos aquellos aspectos más importantes relacionados con el fenómeno nival, a saber, cambios en los periodos de innivación, en los valores máximos previstos, duración del grueso de las reservas nivales e intensidad y duración del proceso de fusión.

Todos estos cambios son decisivos para determinar su influencia y contribución en los eventos de crecidas en los caudales fluyentes, así como para la óptima gestión de los recursos hídricos, puesto que la nieve es uno más de ellos, pero con la particularidad de que su contribución efectiva está retrasada en el tiempo (de ahí el efecto regulador que se comentó en el primer apartado de esta memoria).

Los valores de las temperaturas máxima y media, las precipitaciones máxima y media, así como la nieve precipitada máxima y media, recogidos en este documento, son valores ponderados atendiendo a las características fisiográficas de cada cuenca.

PIRINEO

En este sistema montañoso se han simulado el conjunto de cuencas de cabecera de los principales ríos del Pirineo español, en las cuales la nieve constituye un recurso importante en el conjunto de las aportaciones anuales totales. La superficie total estudiada alcanza los 10.300 km² y la cota media ronda los 1.400 m, y el conjunto de cuencas queda representado en la siguiente imagen.



Conjunto de cuencas modelizadas en el Pirineo.

Tras la simulación con el modelo Aster de los dos escenarios temporales antes descritos (actual y futuro), se han obtenido los siguientes resultados numéricos comparativos:

Escenario	Temperatura máxima diaria (°C) (*)	Temperatura media diaria (°C) (*)	Precipitación máxima diaria (mm) (*)	Precipitación media diaria (mm) (*)
Actual	23,2	5,8	32,5	3,1
Futuro	25,9	7,3	37,0	3,2
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+11,7 %	+25,1%	+13,9%	+3,6%

Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en el Pirineo.

() Valor medio, desde el punto de vista fisiográfico, de las cuencas con influencia nival vertientes al Ebro.*

En estos primeros resultados se puede apreciar claramente un aumento en las temperaturas máximas y medias, en consonancia con la práctica totalidad de los informes existentes sobre la evolución del clima futuro. En cuanto a la precipitación, se observa un fuerte incremento en las precipitaciones máximas, lo que probablemente influirá decisivamente en los caudales máximos registrados en los episodios de avenidas.

Escenario	Nieve precipitada máxima diaria (mm) (*)	Nieve precipitada media diaria (mm) (*)	Nieve acumulada máxima anual (mm) (*)	Nieve acumulada media anual (mm) (*)
Actual	27,4	1,3	4.037	858
Futuro	31,1	1,2	3.581	621
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+13,3 %	-7,1%	-11,3%	-27,6%

Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en el Pirineo.

() Valor medio, desde el punto de vista fisiográfico, de las cuencas con influencia nival vertientes al Ebro.*

En este caso se observa como la nieve precipitada máxima aumenta considerablemente, en consonancia con el aumento de las precipitaciones, aunque la nieve precipitada media, la nieve acumulada máxima y la nieve media acumulada disminuyen, probablemente debido al incremento en las temperaturas máxima y media. Del análisis de estos datos cabe esperar que el aumento de las máximas acumulaciones nivales y de las temperaturas, lleven asociado un incremento en las fusiones máximas, contribuyendo de forma puntual a incrementar los caudales de manera significativa.

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)	Caudal promedio en el sistema (m ³ /s)
Actual	190,8	845,6	205
Futuro	194,9	1.18,5	200
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+2,1%	+20,5	-2,4%

Comparativa actual y futura de las máximas fusiones, caudales máximos y caudales medios en el Pirineo.

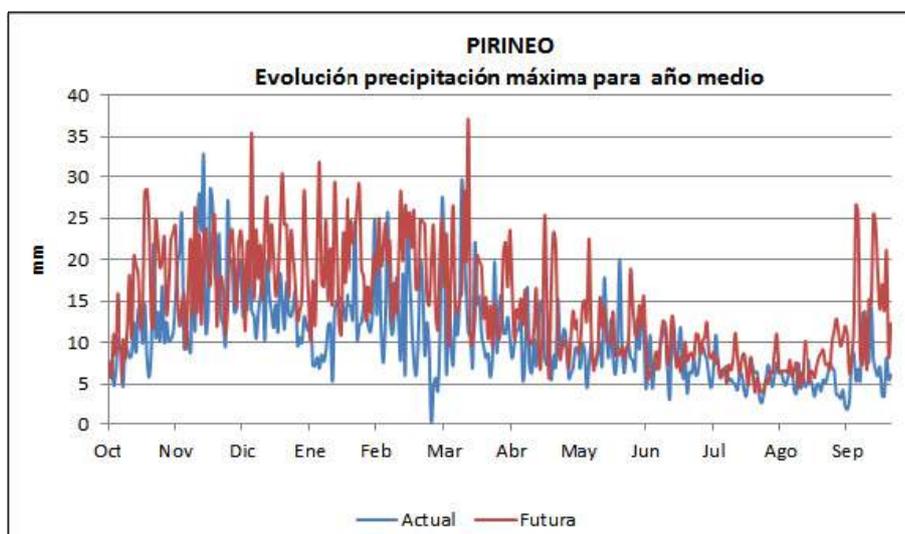
Para el estudio de la fusión y caudales, únicamente durante el periodo donde la nieve tiene especial importancia (diciembre-mayo), se han calculado estas magnitudes durante este periodo y se ha tomado para el caso del escenario futuro, la media de los tres máximos de cada serie, puesto que el periodo futuro es aproximadamente tres veces más extenso que el periodo actual. Además, se ha calculado la importancia que tendrá la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media. Con ello, los resultados obtenidos son los siguientes:

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)
Actual	166,0	845,6
Futuro	187,3	936,0
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+12,6%	+10,7%

Comparativa actual y futura de las máximas fusiones y caudales máximos durante el periodo diciembre-mayo en el Pirineo.

Escenario	Nieve precipitada media (mm)	Precipitación media (mm)	%Nieve Precipitada / Precipitación
Futuro	1,97	3,59	54,8%

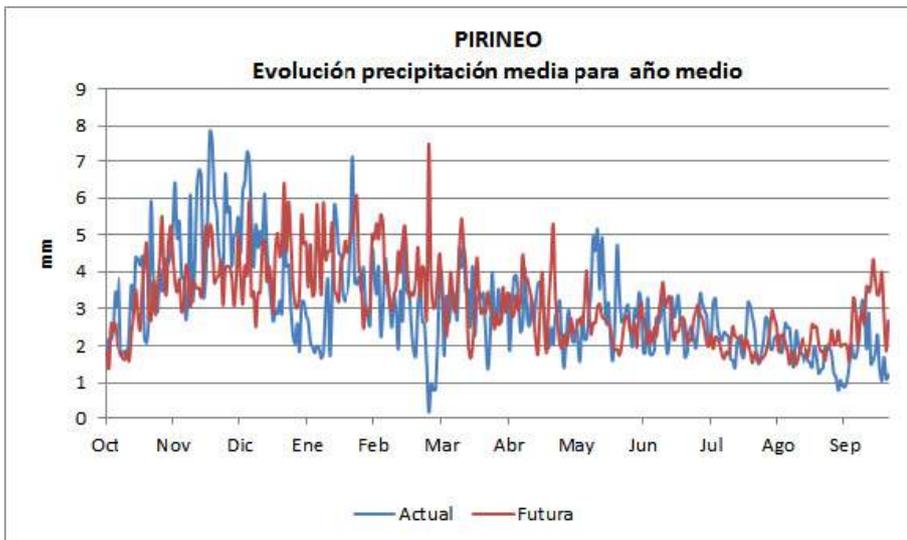
Importancia de la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media para el escenario futuro, durante el periodo diciembre-mayo en el Pirineo.



Evolución mensual de las máximas precipitaciones en el Pirineo

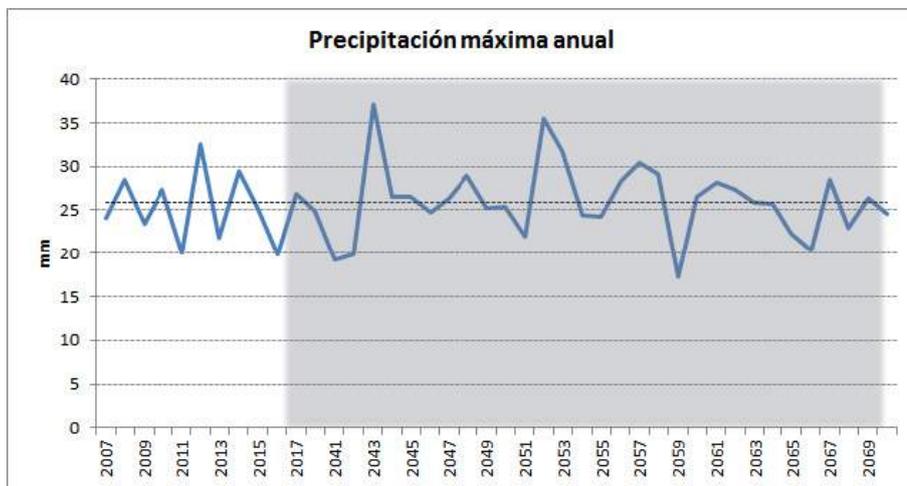
Tal y como se esperaba, se observa un claro incremento tanto en la fusión máxima como en el caudal máximo, lo que pone de manifiesto que el fenómeno nival puede favorecer el aumento de episodios de crecidas de caudales al verse alimentados por la fusión de la nieve acumulada en las cuencas de este sistema montañoso.

Posteriormente se adjuntarán los gráficos de evolución de estas magnitudes para un año medio, y se podrá apreciar si estos picos máximos en la fusión de la nieve coinciden con los picos en los caudales máximos, confirmando o no esta afirmación.

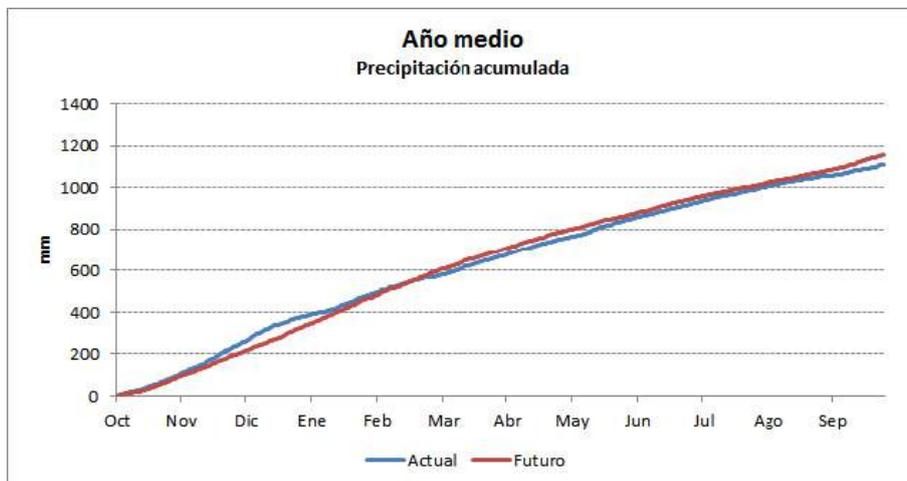


Evolución de la precipitación media mensual en el Pirineo

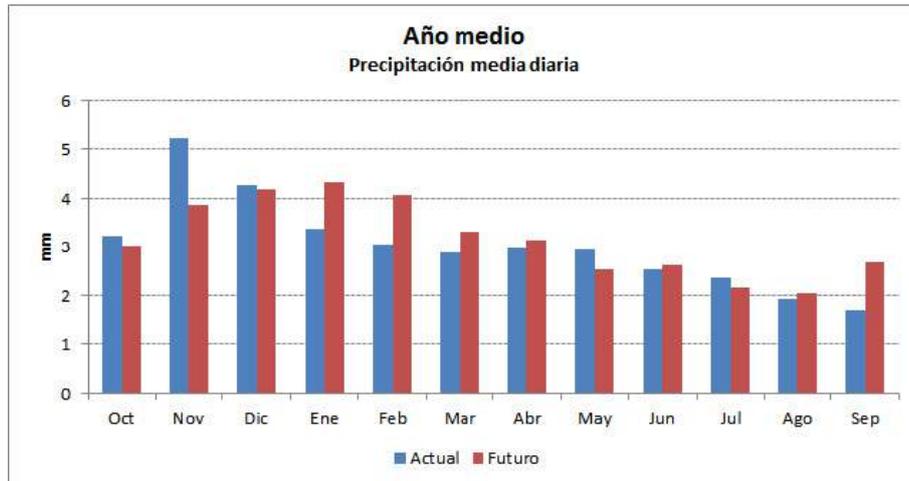
Se observa cómo existe un claro aumento en las precipitaciones máximas a lo largo de prácticamente todo el año, que junto con el hecho de que la precipitación media aumenta sólo ligeramente, pone de manifiesto un cambio en el patrón de precipitaciones hacia un modelo más extremal, con más episodios de fuertes lluvias seguidos de periodos con escasa precipitación, siendo especialmente visible en el periodo otoñal y durante el verano.



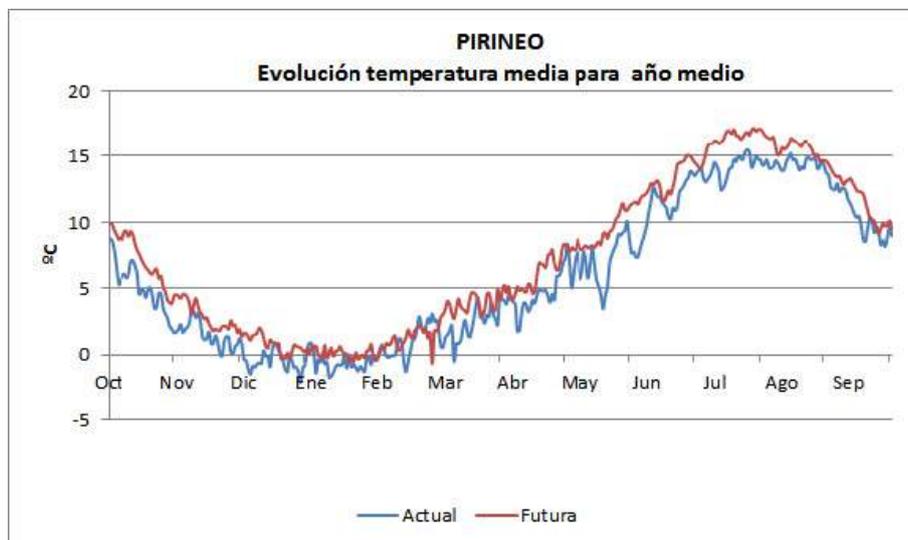
Comparativa actual y futura de las máximas precipitaciones anuales en el Pirineo



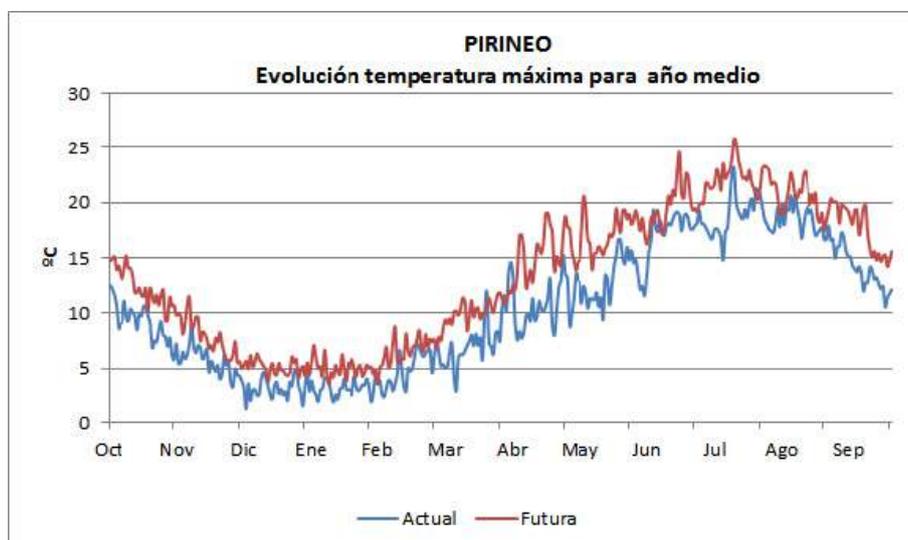
Comparativa actual y futura en la evolución de la precipitación acumulada en el Pirineo para un año medio



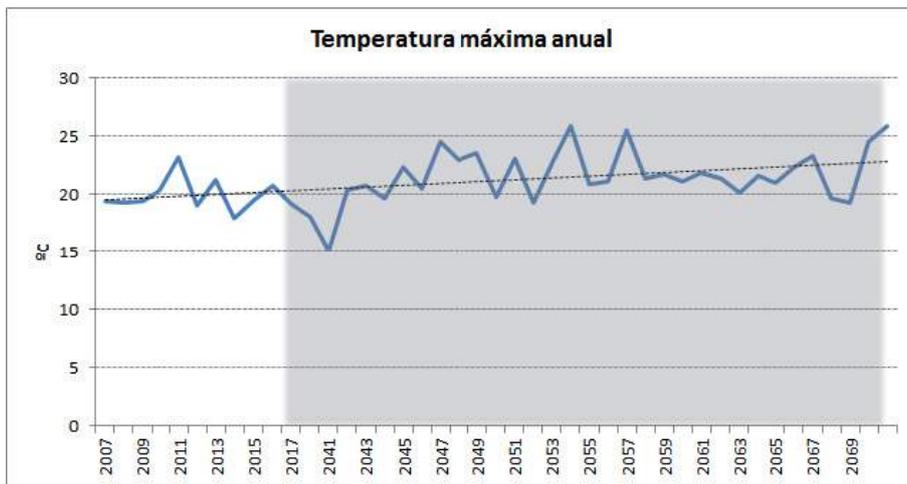
Comparativa actual y futura de la precipitación media diaria en el Pirineo



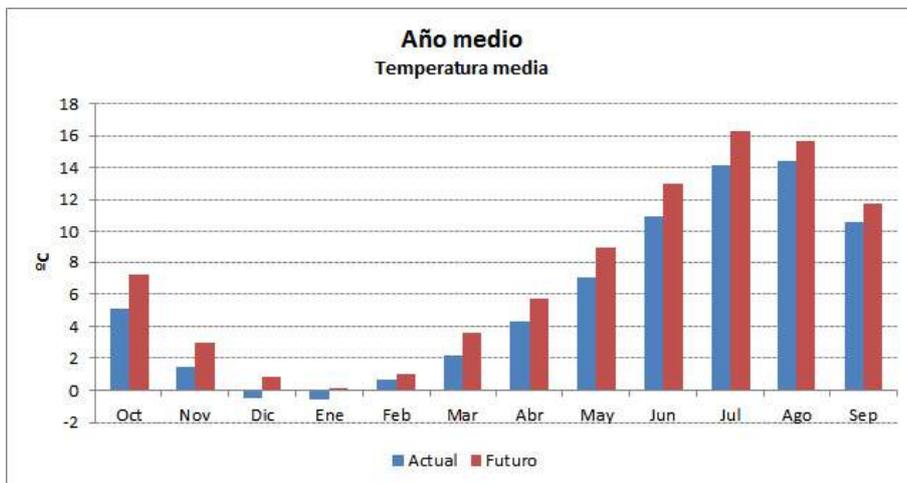
Comparativa actual y futura de la temperatura media en el Pirineo para un año medio.



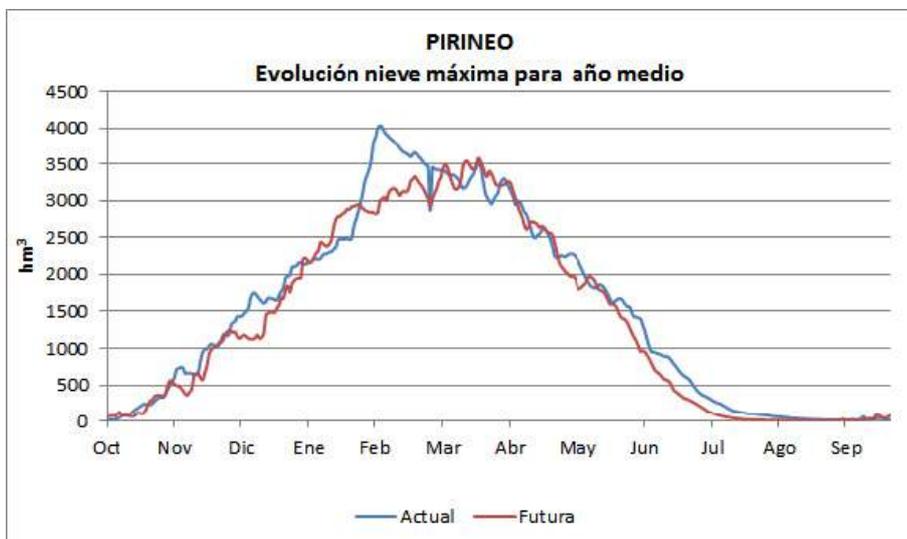
Comparativa actual y futura de la temperatura máxima en el Pirineo para un año medio



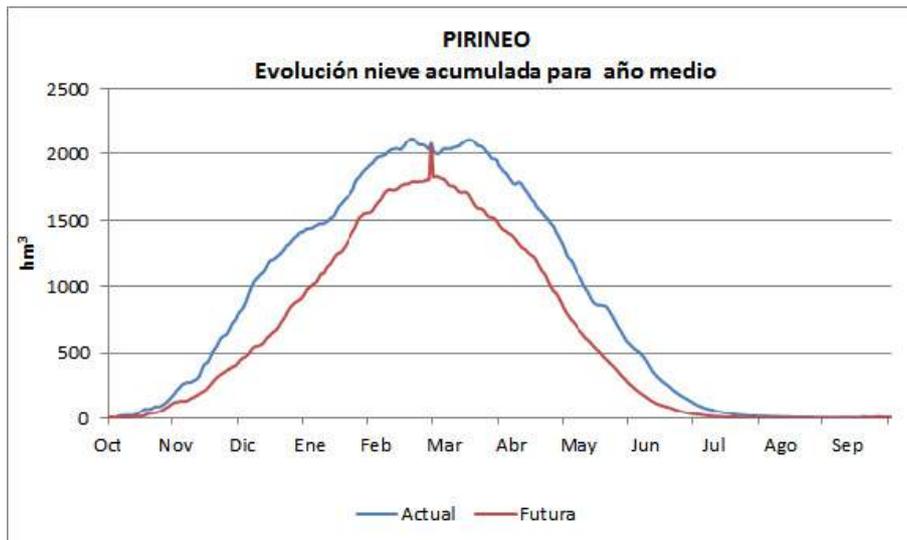
Evolución de las temperaturas máximas anuales para un año medio en el Pirineo



Comparativa actual y futura de la temperatura media mensual en el Pirineo para un año medio.

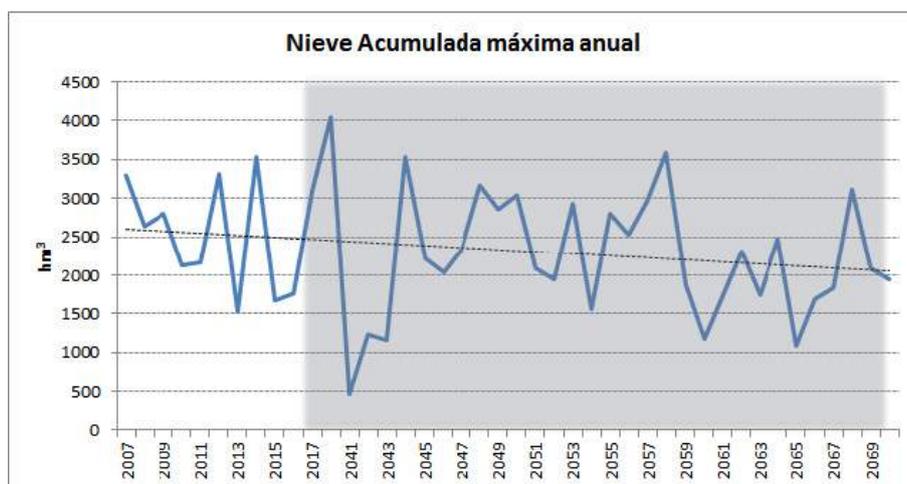


Comparativa actual y futura de la nieve máxima acumulada en el Pirineo para un año medio

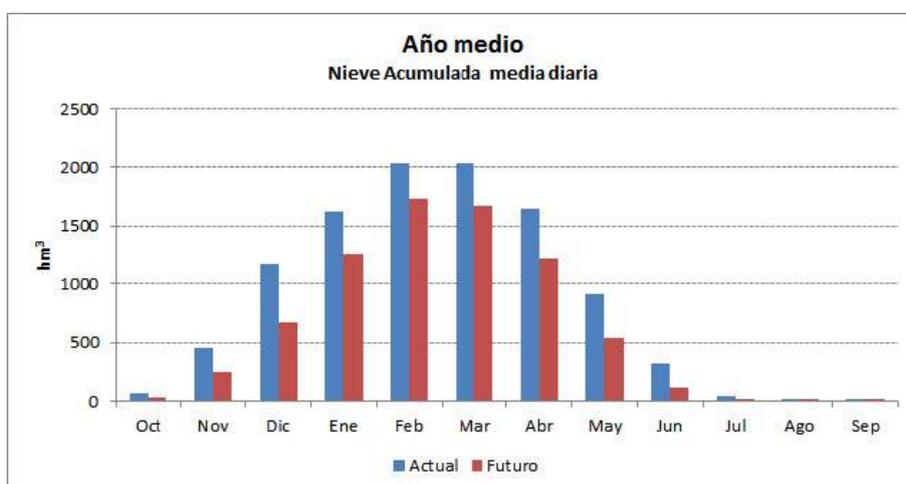


Comparativa actual y futura de la nieve acumulada en el Pirineo para un año medio.

Claramente se aprecia un aumento de las temperaturas medias y máximas, lo que permite una mayor evaporación durante todos los meses del año, haciendo que mientras los caudales máximos aumentan de forma importante, los caudales medios disminuyen ligeramente.

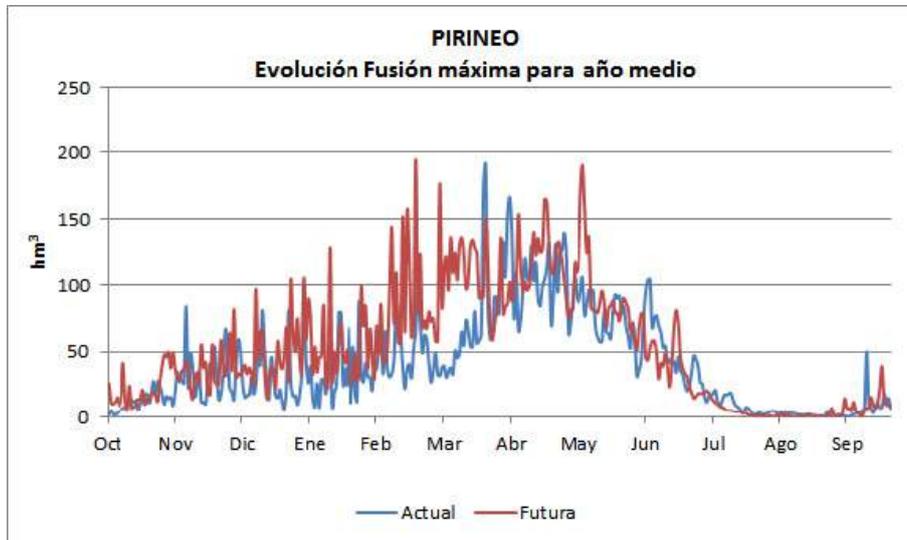


Evolución anual de la máxima nieve acumulada en el Pirineo.

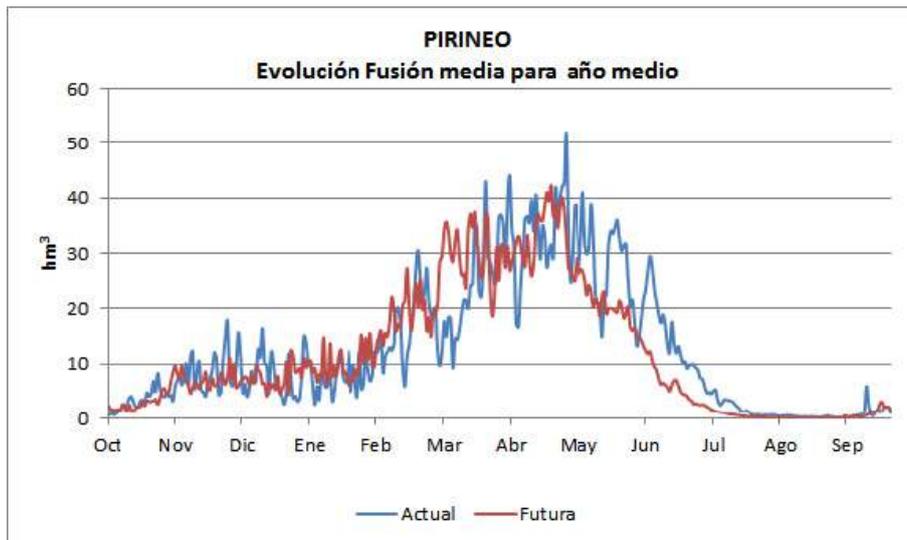


Comparativa actual y futura a nivel mensual de la nieve media diaria acumulada en el Pirineo para un año medio

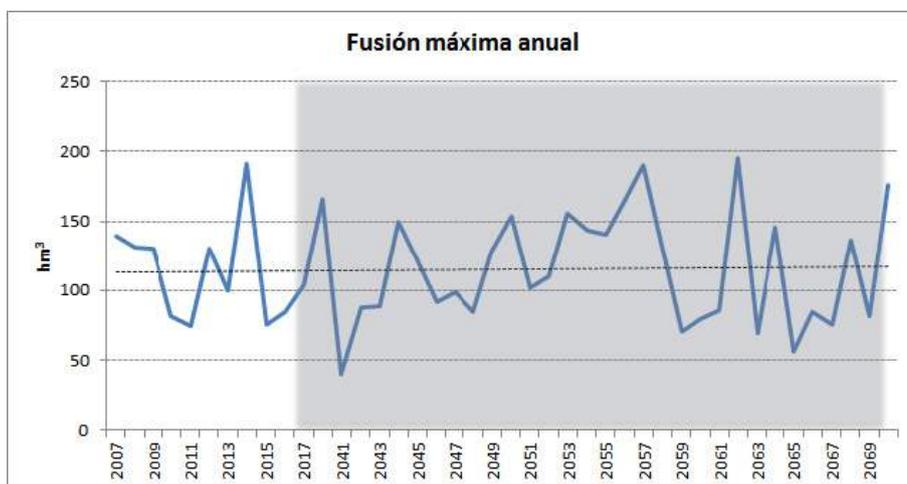
Se aprecia una disminución en la nieve acumulada media durante todo el año, pero un aumento en la máxima nieve acumulada entre los meses de marzo y mayo lo que indica que esos meses se deben producir fusiones de cierta consideración, que influirán en el aumento de los caudales fluyentes por los ríos.



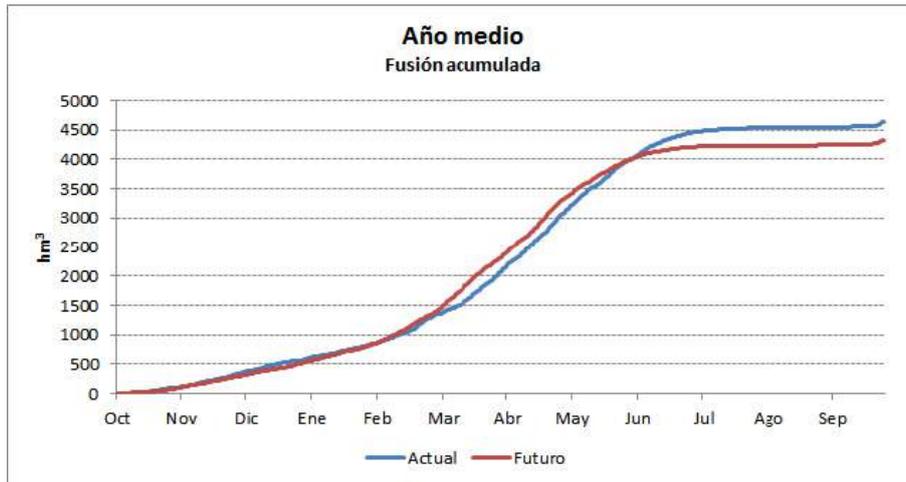
Comparativa entre la fusión máxima diaria actual y en el escenario futuro a lo largo del año en el Pirineo.



Comparativa actual y futura de la fusión media en el Pirineo para un año medio.

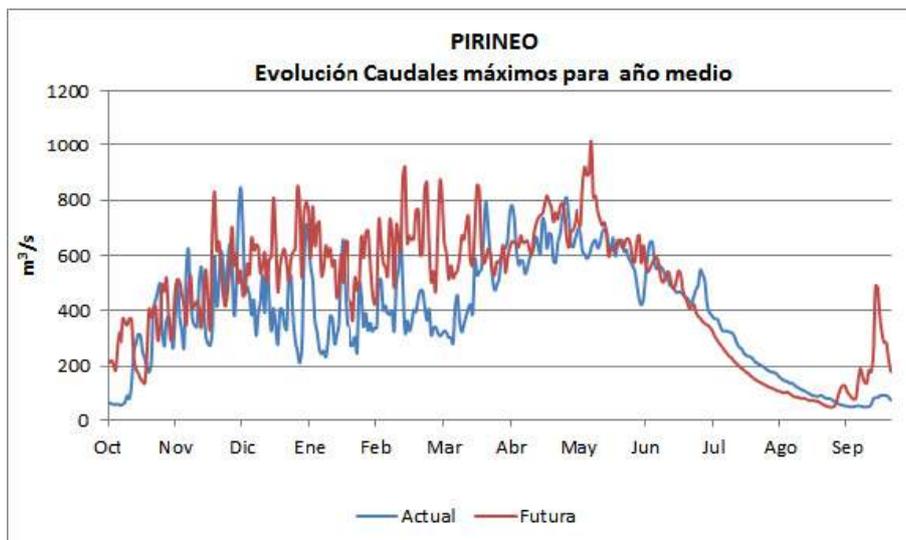


Evolución de la máxima fusión anual en el Pirineo.

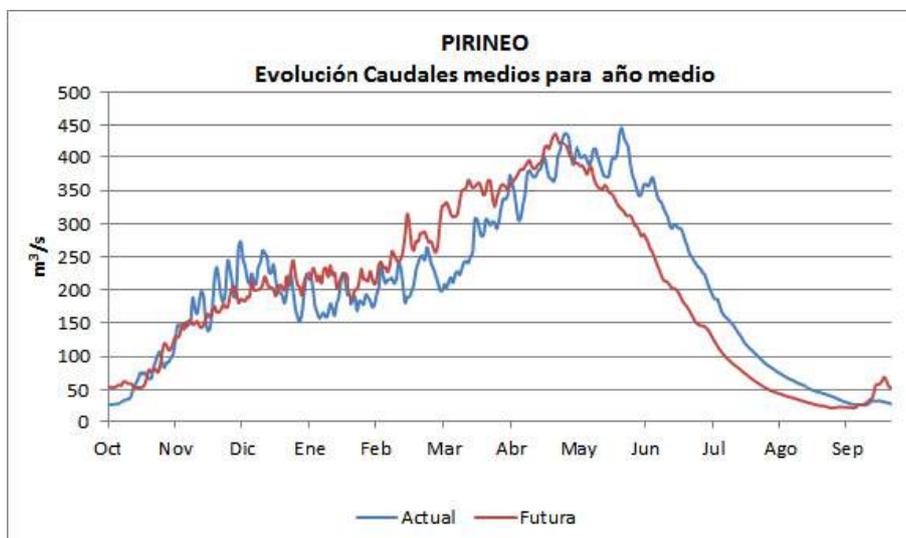


Comparativa actual y futura de la fusión acumulada en el Pirineo para un año medio.

Tal y como se esperaba, se observa un fuerte aumento de la fusión nival entre los meses de febrero y abril que, además de contribuir al aumento de caudales en esas fechas, cambian el actual patrón de fusión, adelantándose más de un mes y haciendo que disminuya en los meses en los que actualmente se produce.

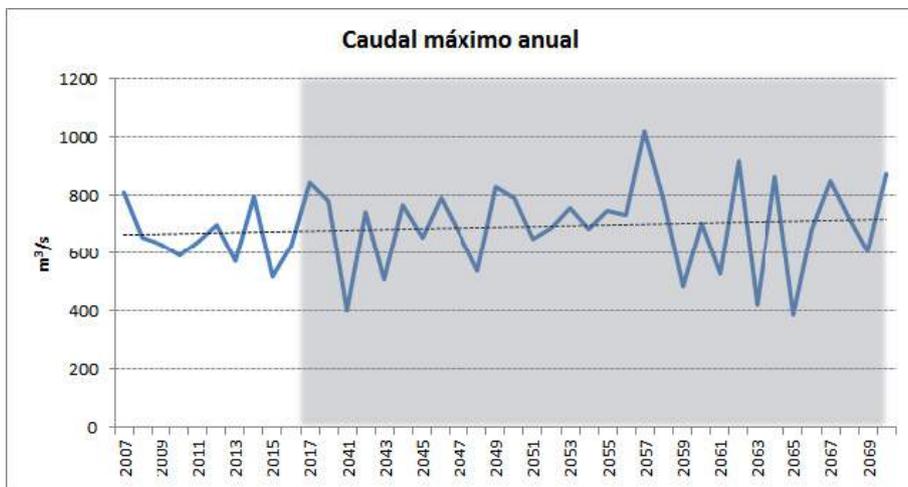


Comparativa actual y futura de los caudales máximos en el Pirineo para un año medio.

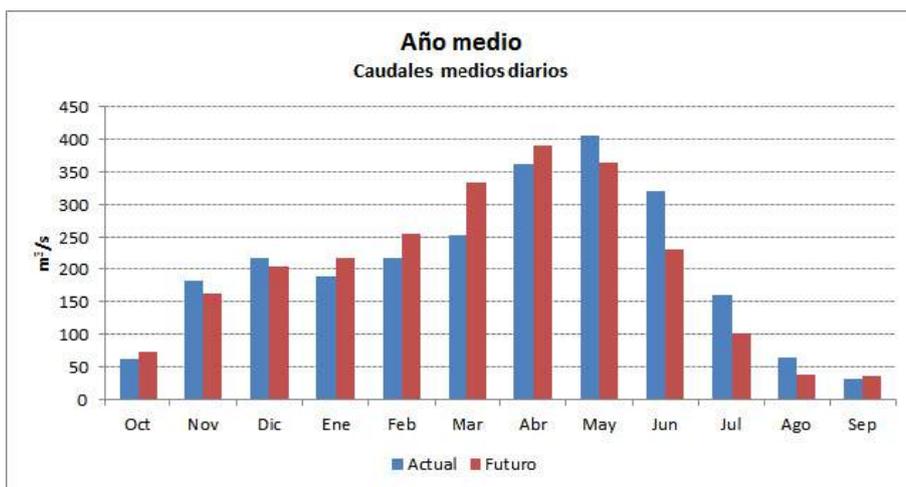


Comparativa actual y futura de los caudales medios en el Pirineo para un año medio

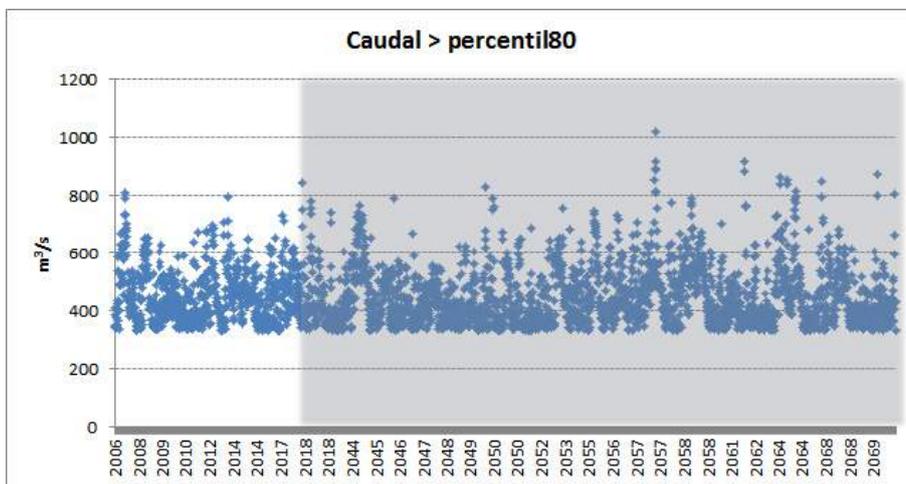
En los siguientes gráficos se muestra la evolución de los caudales máximos anuales, la evolución de los caudales medios mensuales para un año medio patrón y la frecuencia en que los caudales superan unos umbrales definidos por varios percentiles de interés.



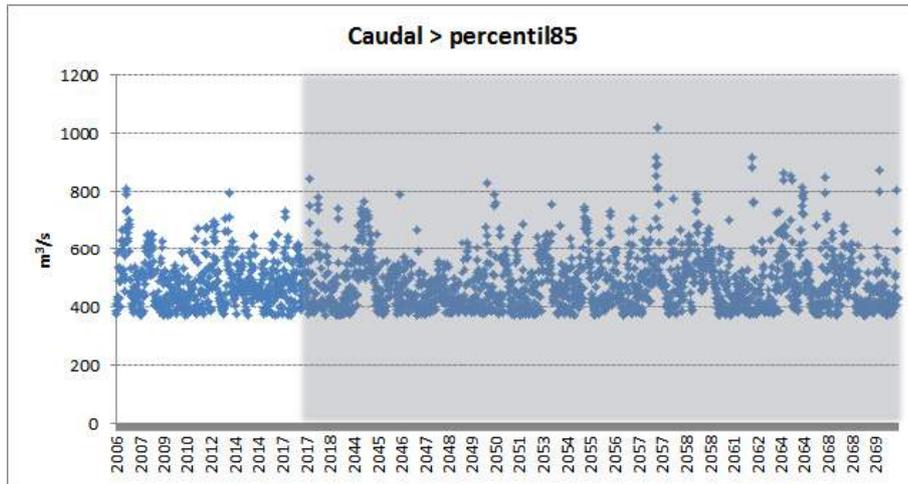
Evolución del caudal máximo anual en el Pirineo



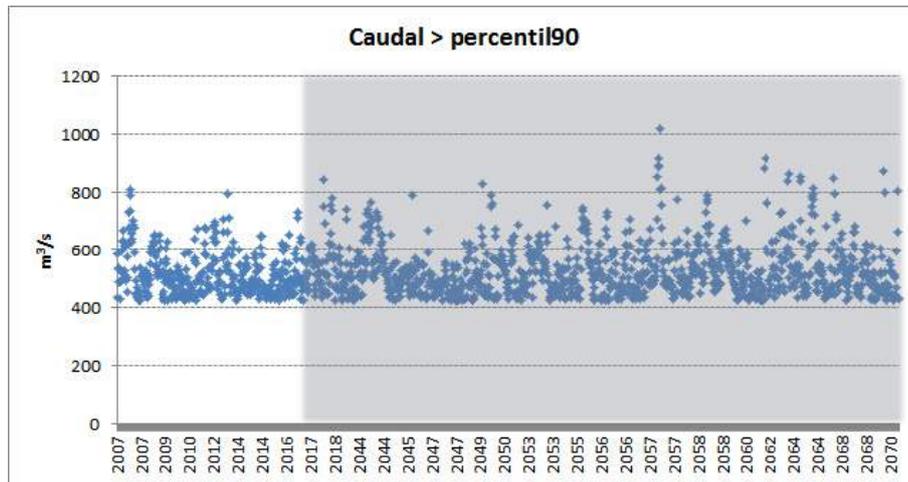
Comparativa actual y futura a nivel mensual de los caudales medios diarios en el Pirineo.



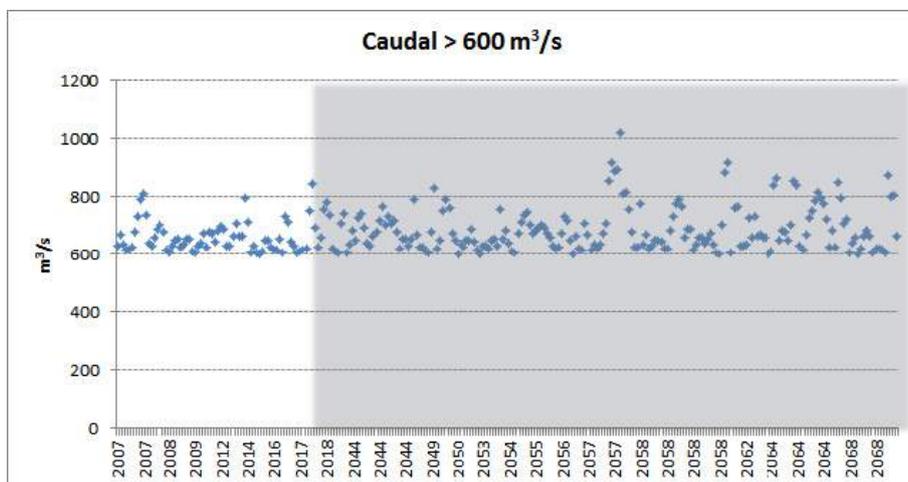
Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 80 en el Pirineo.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 85 en el Pirineo.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 90 en el Pirineo



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima de 600 m³/s en el Pirineo.

En el primer gráfico se aprecia cómo aumentan los caudales máximos durante la primera mitad del año, tanto por el aumento en las precipitaciones máximas como por el aumento en las fusiones máximas, lo que pone de manifiesto nuevamente, la importancia que la nieve tendrá en los episodios futuros de avenida que se produzcan durante este periodo, que además, serán los de mayor importancia en cuanto a caudales circulantes por los ríos.

También se observa cómo los caudales medios disminuirán claramente desde los meses de junio hasta octubre, debidos tanto al adelanto en la fusión nival como a la disminución de las precipitaciones en los meses de verano.

Como resumen de todo lo expuesto anteriormente se puede afirmar que en el Pirineo, la nieve sí va a ser un fenómeno importante en los futuros episodios de avenidas, puesto que las considerables acumulaciones nivales que en él se producen, van a ser muy sensibles a los aumentos generalizados en las temperaturas, propiciando rápidas e importantes fusiones, que aportarán notables recursos hídricos que se sumarán a los ya circulantes, aumentando los caudales máximos causantes de las situaciones de avenidas y sus nefastas consecuencias.

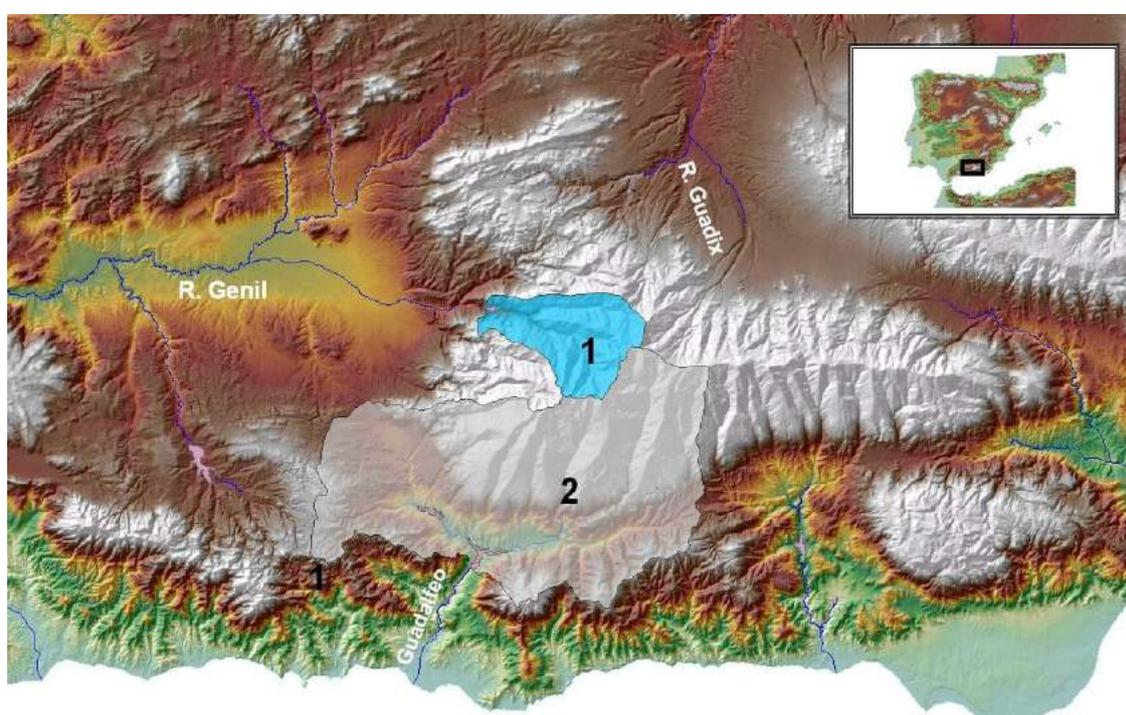
Es importante comentar, asimismo, cómo se está notando ya el impacto en ciertas cuencas como la del Arga, uno de los principales afluentes del Ebro, que está poco regulado y permite analizar la evolución de los caudales sin el efecto regulador de los embalses. Según los datos de aforos en cuencas poco o nada reguladas (sin embalses), como la del Arga, se ha detectado un aumento de la frecuencia e intensidad de inundaciones por el deshielo (Ebro Resilience, 2020) con el aumento de la temperatura media y máxima. Visualizando los caudales superiores a la media de los máximos anuales ($540 \text{ m}^3/\text{s}$) medidos en la estación de aforos situada en la localidad de Funes (Navarra), se concluye que entre 2002 y 2018 se ha superado este valor en 21 ocasiones (16 años de datos), mientras que desde 1979 hasta 2002 solo se superó en 9 ocasiones (23 años de datos).

SIERRA NEVADA

Este sistema está formado por dos zonas claramente delimitadas, una en la cuenca vertiente del río Guadalquivir y otra en la parte mediterránea, abarcando entre las dos el macizo de Sierra Nevada, con una superficie de 1.253 km² y una cota media alrededor de 1.500 m.

Nº	Cuenca	Superficie (km ²)	Cota Media (m)
1	Genil en Canales	177	1.970
2	Guadalfeo en Rules	1.076	1.405

Características de las cuencas modelizadas en el sistema de Sierra Nevada



Localización de las cuencas modelizadas en Sierra Nevada

Tras la simulación con el modelo hidrológico Aster para los escenarios actual y futuro, se obtienen los siguientes resultados numéricos comparativos:

Escenario	Temperatura máxima diaria (°C)	Temperatura media diaria (°C)	Precipitación máxima diaria (mm)	Precipitación media diaria (mm)
Actual	23,81	8,48	46,46	1,53
Futuro	25,88	9,82	58,90	1,61
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+8,6%	+15,5	+26,8%	+5,1%

Escenarios temporales actual y futuro para las temperaturas y precipitaciones en Sierra Nevada.

Se observa cómo la tendencia al aumento de las temperaturas, tanto las máximas como las medias, vuelve a ser el patrón esperado, lo cual afectará, con toda seguridad, en el modo en el que se van a producir las acumulaciones/fusiones nivales. También se observa un ligero aumento en las precipitaciones medias, pero un importante aumento en las precipitaciones máximas, por lo que también es de esperar que las acumulaciones nivales máximas y los picos de caudales máximos sufran importantes cambios tanto en magnitud como ubicación temporal.

Escenario	Nieve precipitada máxima diaria (mm)	Nieve precipitada media diaria (mm)	Nieve acumulada máxima anual (mm)	Nieve acumulada media anual (mm)
Actual	23,22	0,46	216,7	49,4
Futuro	26,91	0,43	332,0	35,1
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+15,6 %	-6,6%	+53,2%	-28,9%

Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en Sierra Nevada.

Del análisis de estos resultados se aprecian varios importantes cambios en el comportamiento nival. Se observan cuantiosos aumentos en las precipitaciones en forma de nieves máximas y en las acumulaciones nivales máximas, pero un descenso tanto en el promedio de la nieve precipitada como en el promedio de la nieve acumulada.

La explicación radica en el aumento de las precipitaciones esperadas, como se ha visto antes, que incrementan las precipitaciones en forma de nieve que no se ven afectadas por el aumento de las temperaturas (de forma puntual) dada la elevada cota media de la zona. Sin embargo, este aumento en la temperatura de forma continuada en el tiempo, sí influye de forma decisiva en las zonas más bajas, lo que hace que las acumulaciones nivales disminuyan rápidamente, por lo que es de esperar que, de la combinación de estos dos fenómenos, se produzca una antelación en la fusión nival en estas zonas.

Escenario	Fusión máxima en la cuenca (hm ³)	Caudal máximo en la cuenca (m ³ /s)	Caudal promedio en la cuenca (m ³ /s)
Actual	8,8	76,1	9,9
Futuro	10,5	107	9,5
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+15,9%	+41,4%	-3,2%

Comparativa actual y futura de las máximas fusiones, caudales máximos y caudales medios en S. Nevada.

Para el estudio de la fusión y caudales, únicamente durante el periodo donde la nieve tiene especial importancia (diciembre-mayo), se han calculado estas magnitudes durante este periodo y se han tomado para el caso del escenario futuro, la media de los tres máximos de cada serie, puesto que el periodo futuro es aproximadamente tres veces más extenso que el periodo actual. También se ha calculado la importancia que tendrá la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media. Con ello, los resultados obtenidos son los siguientes:

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)
Actual	8,8	62,6
Futuro	10,5	107,5

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+18,9%	+71,7%

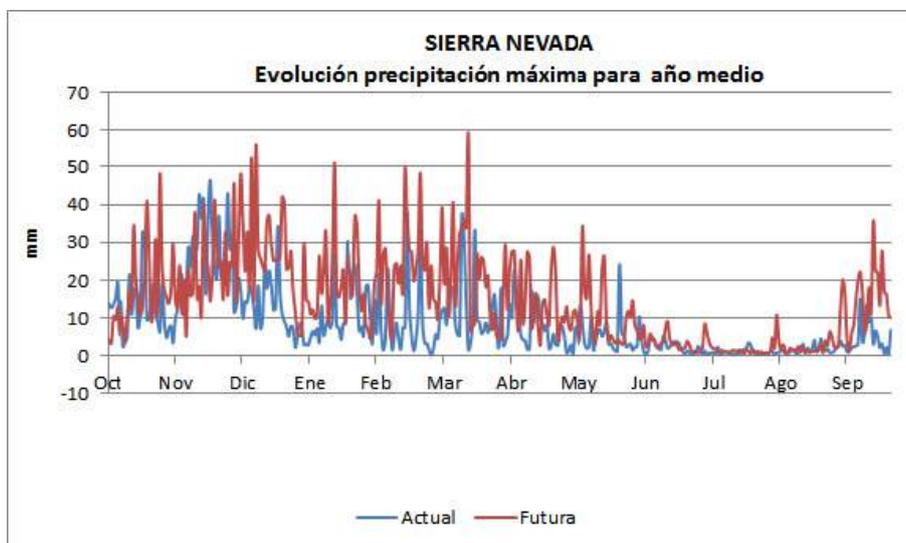
Comparativa actual y futura de las máximas fusiones y caudales máximos durante el periodo diciembre-mayo en el S. Nevada.

Escenario	Nieve precipitada media (mm)	Precipitación media (mm)	%Nieve Precipitada / Precipitación
Futuro	0,71	2,12	33,46%

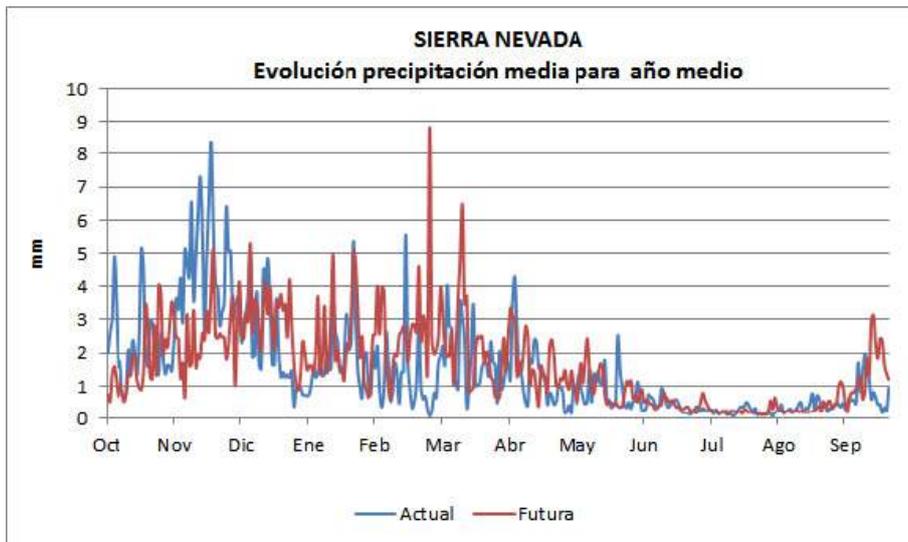
Importancia de la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media para el escenario futuro, durante el periodo diciembre-mayo en S. Nevada.

La fusión máxima no experimenta grandes variaciones pero los caudales máximos sí aumentan de forma importante, poniendo de manifiesto el mayor riesgo existente en los episodios futuros de avenidas.

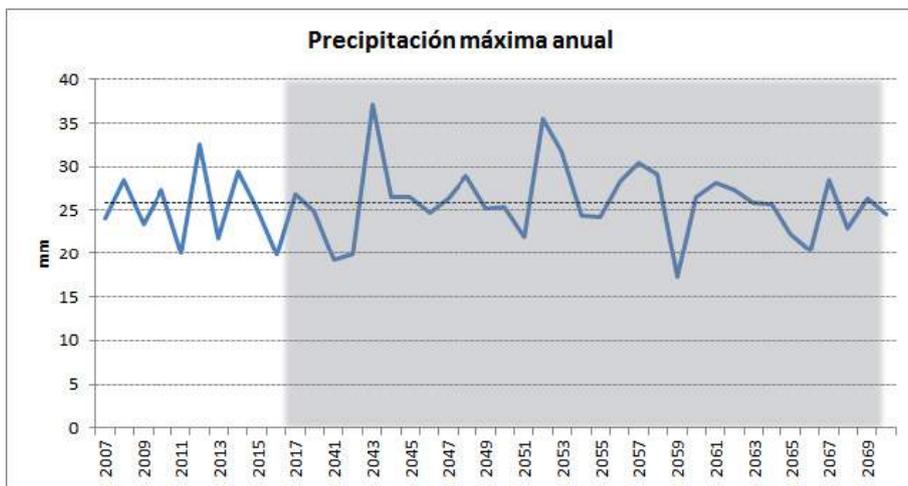
A continuación, se adjuntan los gráficos correspondientes a un año medio para ambos escenarios, actual y futuro, en los que se han representado las magnitudes comentadas en las tablas anteriores.



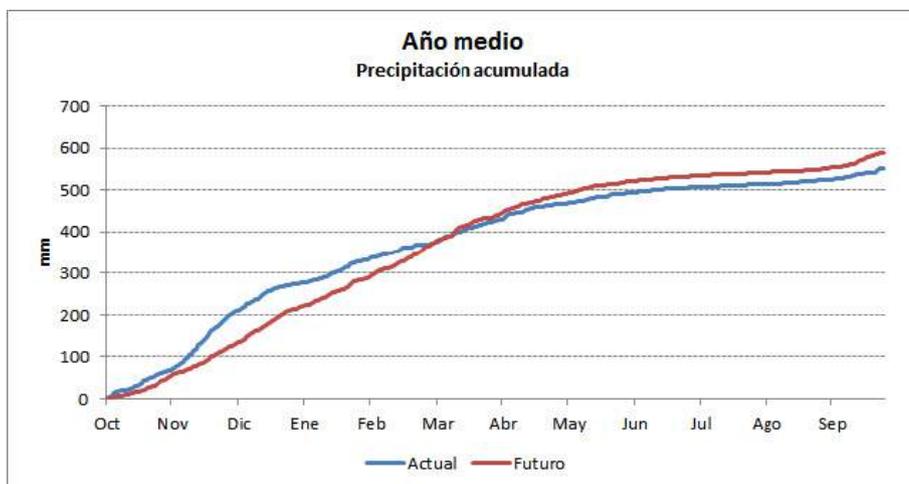
Evolución mensual de las máximas precipitaciones en S. Nevada



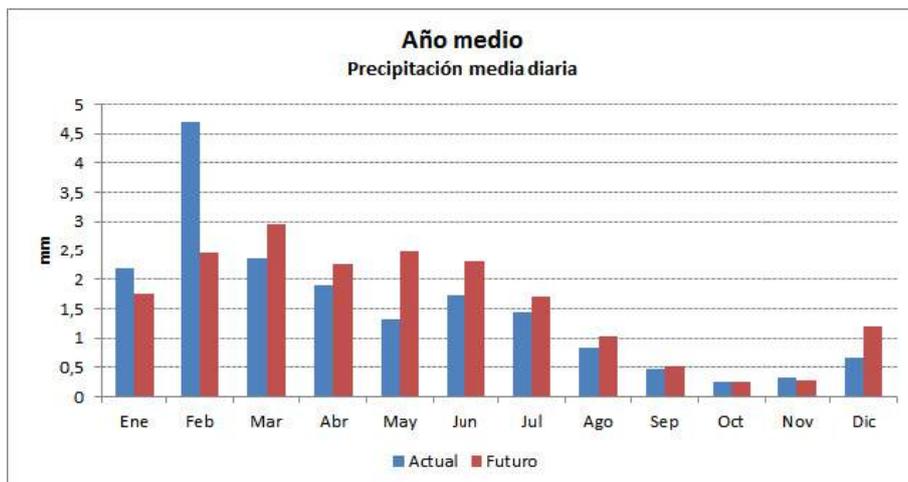
Evolución de la precipitación media mensual en S. Nevada.



Comparativa actual y futura de las máximas precipitaciones anuales en S. Nevada.

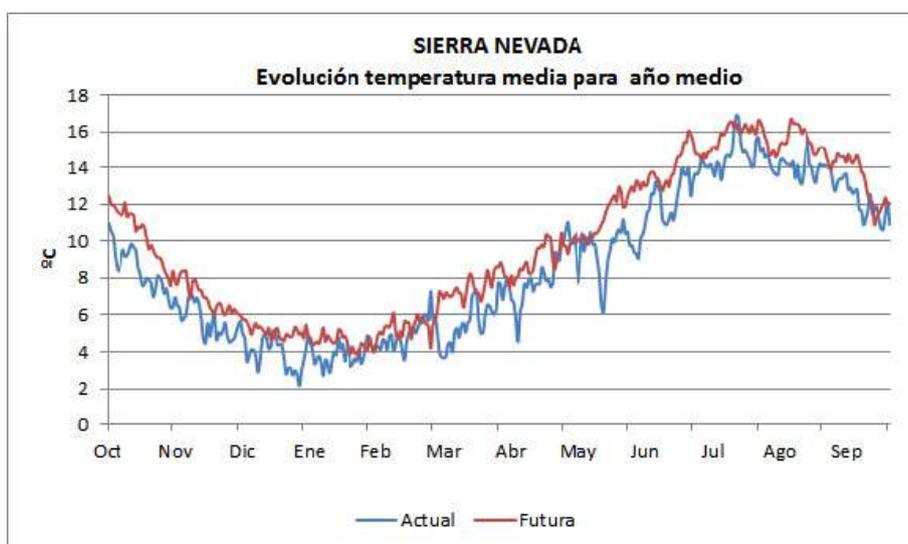


Comparativa actual y futura en la evolución de la precipitación acumulada en S. Nevada para un año medio.

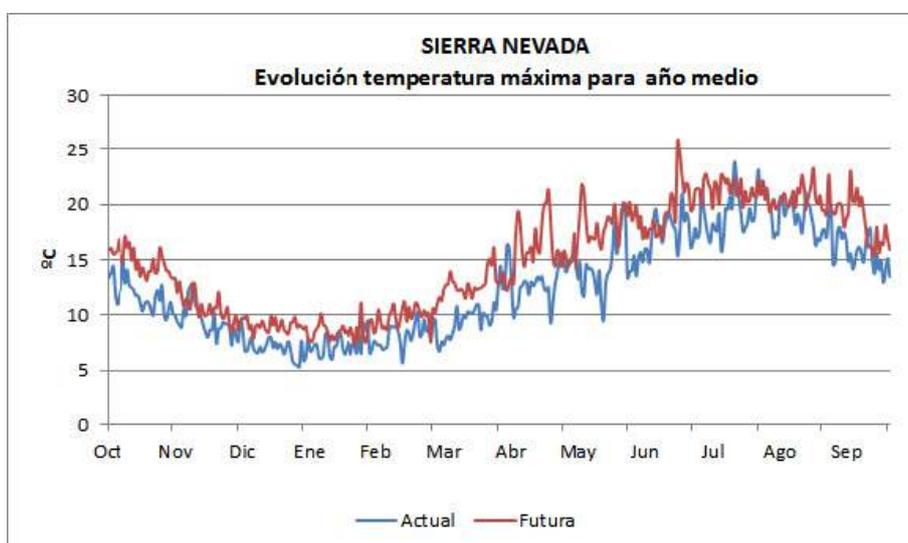


Comparativa actual y futura de la precipitación media diaria en S. Nevada.

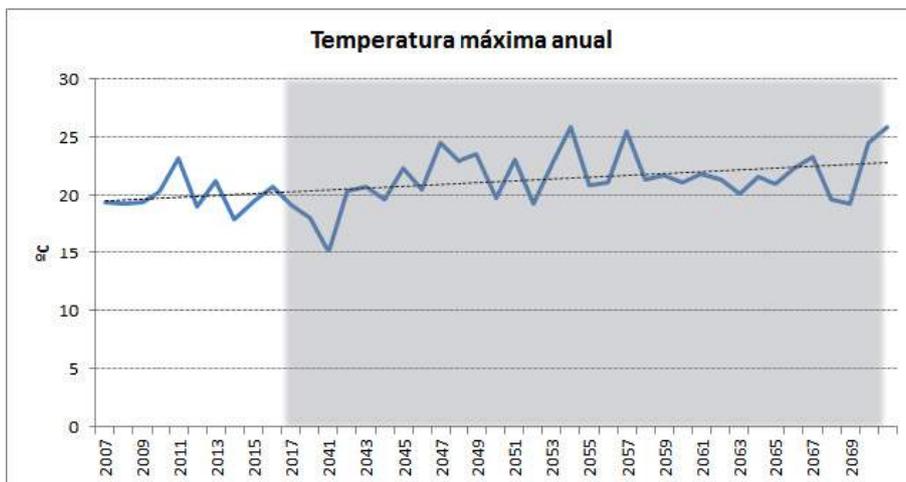
En estos gráficos se observa un claro aumento en las precipitaciones máximas prácticamente durante todo el año, pero una disminución en las precipitaciones acumuladas durante el verano y otoño.



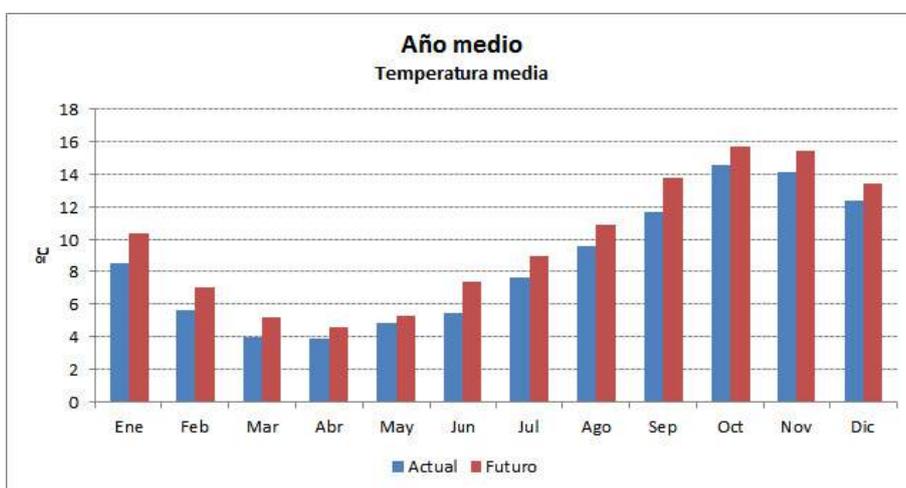
Comparativa actual y futura de la temperatura media en S. Nevada para un año medio.



Comparativa actual y futura de la temperatura máxima en S. Nevada para un año medio.



Evolución de las temperaturas máximas anuales para un año medio en S. Nevada.

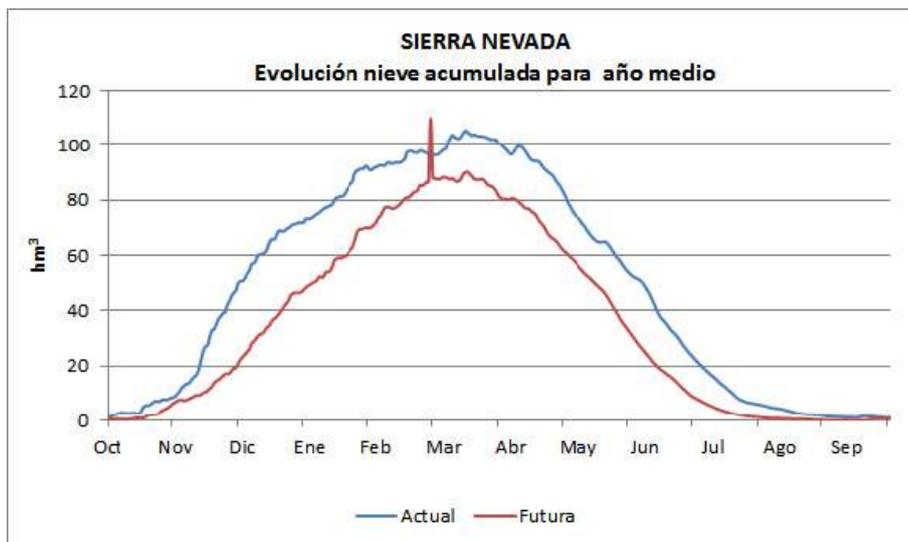


Comparativa actual y futura de la temperatura media mensual en S. Nevada para un año medio.

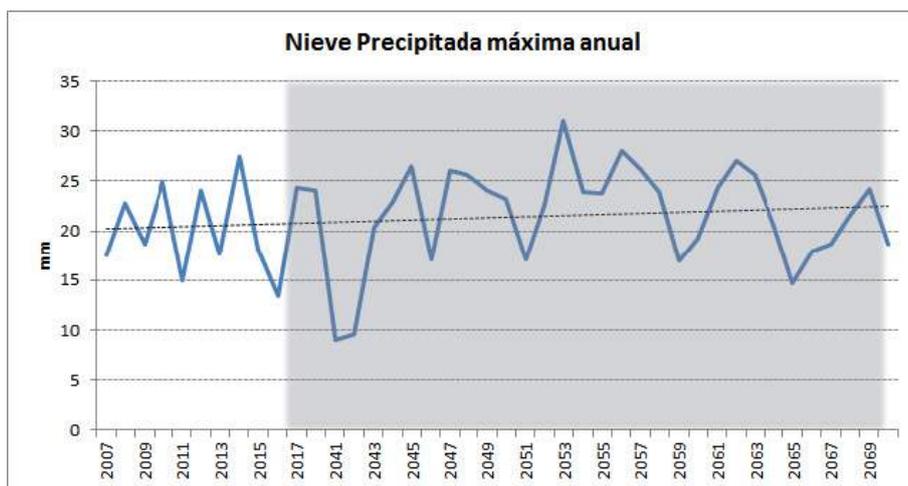
Nuevamente se observa una clara tendencia al alza tanto en las temperaturas medias como, sobre todo, en las temperaturas máximas.



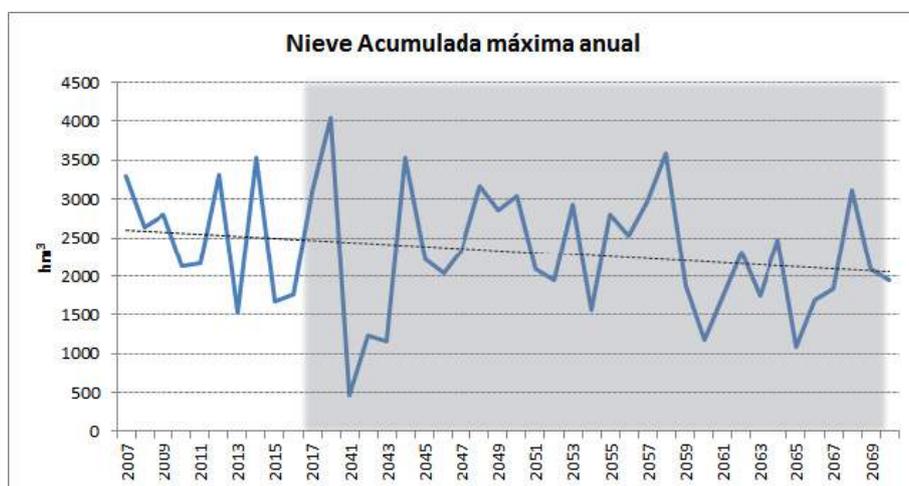
Comparativa actual y futura de la nieve acumulada en S. Nevada para un año medio.



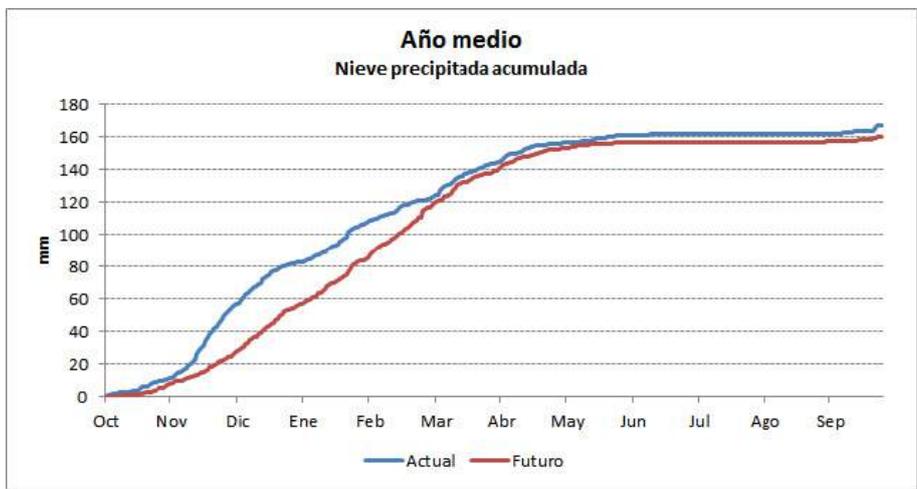
Comparativa actual y futura de la nieve acumulada en S. Nevada para un año medio.



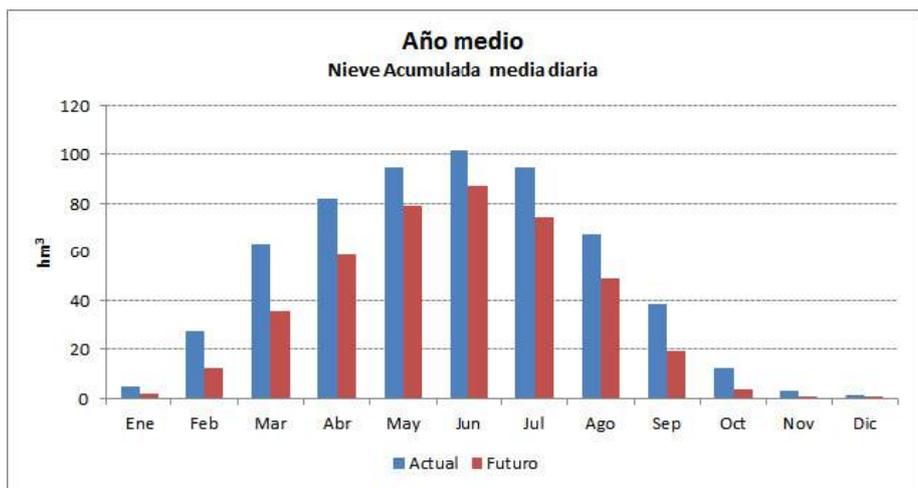
Evolución anual de la máxima nieve precipitada en S. Nevada.



Evolución anual de la máxima nieve acumulada en S. Nevada.



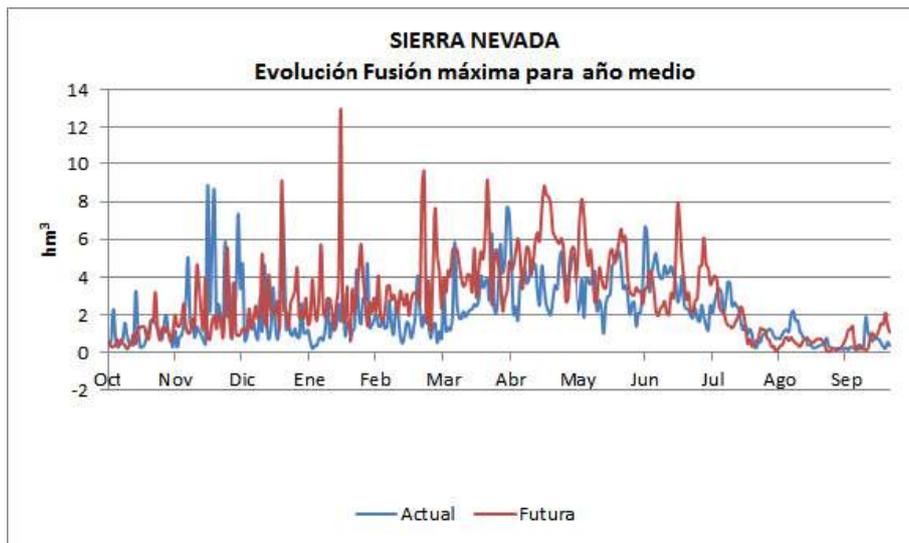
Evolución anual de la nieve precipitada para un año medio en S. Nevada.



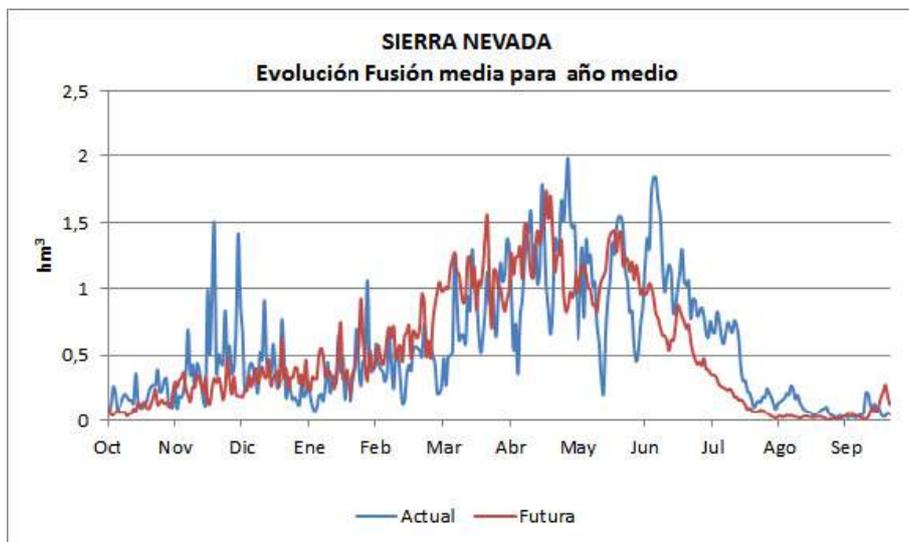
Comparativa actual y futura a nivel mensual de la nieve media diaria acumulada en S. Nevada para un año medio.

Estas dos gráficas aportan un claro cambio en el comportamiento en cuanto a la nieve acumulada en la cuenca, que disminuye en su valor medio, pero aumenta en sus valores máximos, lo cual sólo se explica si estas acumulaciones máximas tienen una menor duración en la cuenca, contribuyendo así a los numerosos episodios de caudales máximos crecientes que a continuación se expondrán. Nuevamente se aprecia un adelanto en las fusiones debido al aumento de las temperaturas.

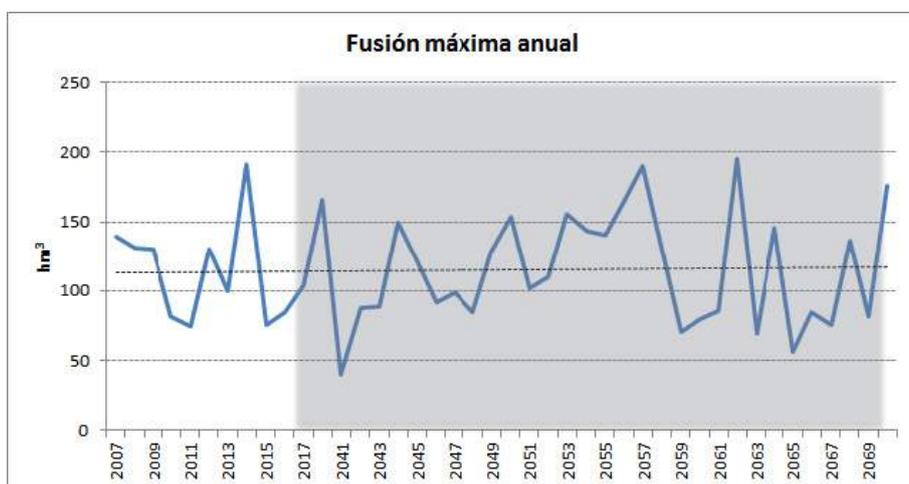
Los picos en estas dos gráficas están condicionados por la fecha 29 de febrero que presenta un menor número de datos y de ahí la distorsión en sus valores.



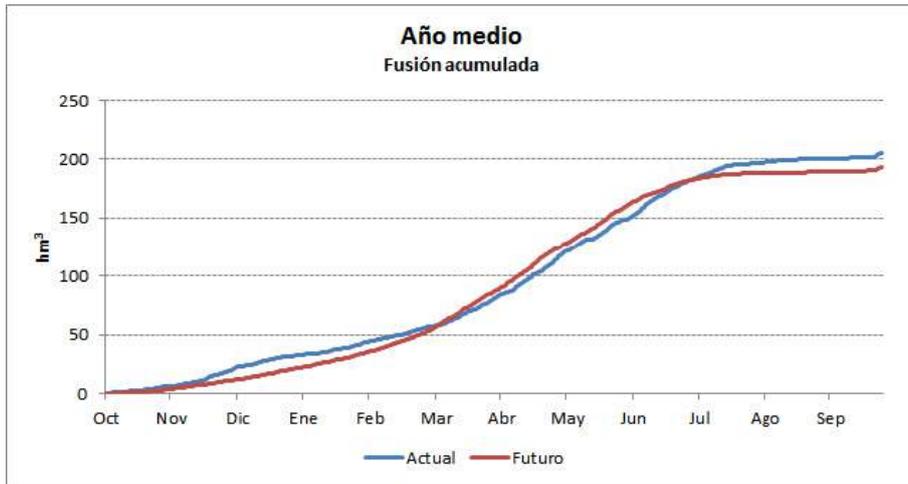
Comparativa entre la fusión máxima diaria actual y en el escenario futuro a lo largo del año en Sierra Nevada



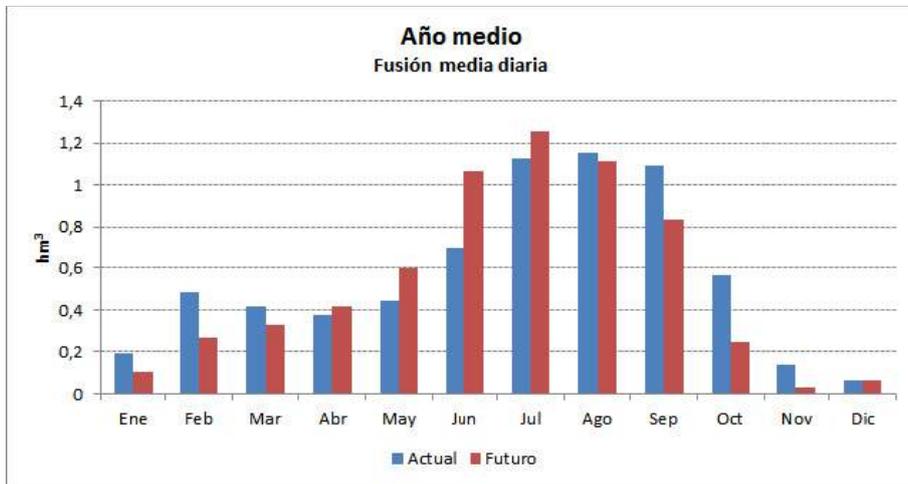
Comparativa actual y futura de la fusión media en S. Nevada para un año medio.



Evolución de la máxima fusión anual en S. Nevada.

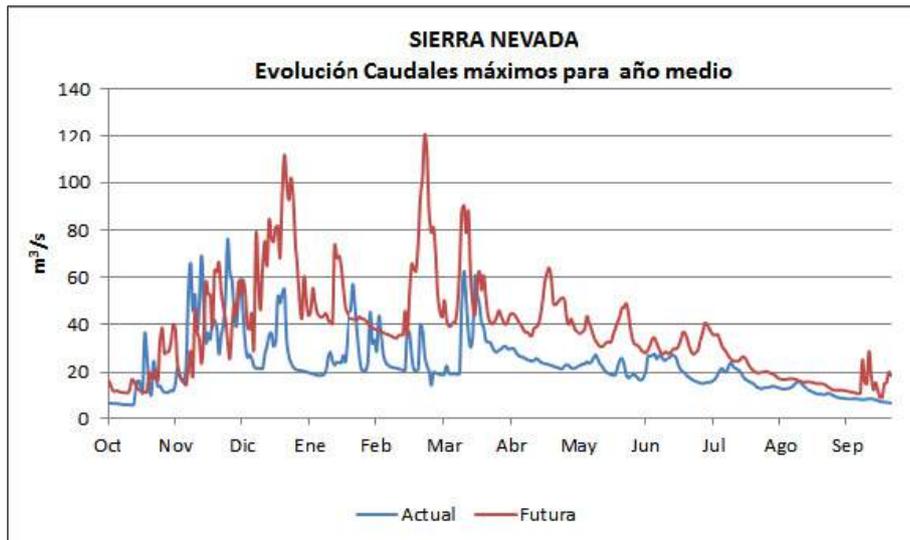


Comparativa actual y futura de la fusión acumulada en S. Nevada para un año medio.

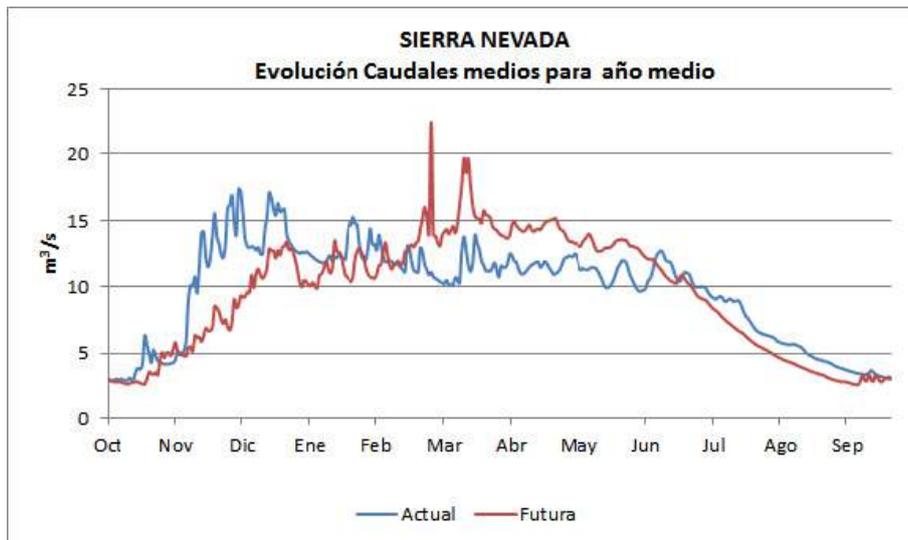


Comparativa actual y futura de la fusión media diaria en S. Nevada para un año medio.

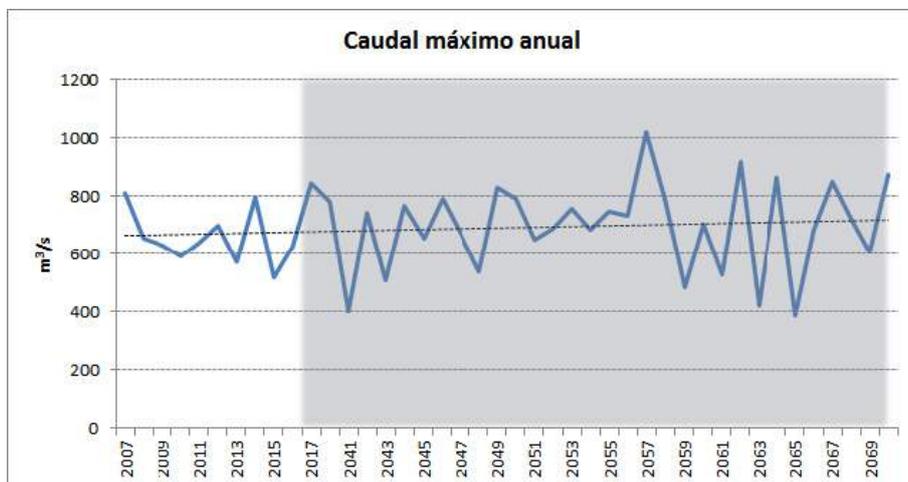
Tal y como se esperaba, a la luz de los gráficos anteriores, las fusiones máximas aumentan en pleno periodo invernal y la fusión media disminuye claramente en el final de la primavera, donde actualmente se producen las mayores aportaciones debidas a este fenómeno.



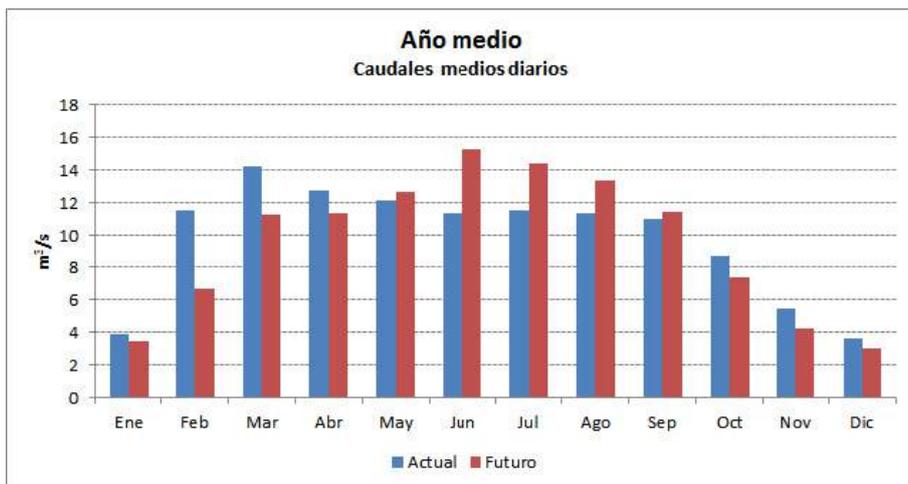
Comparativa actual y futura de los caudales máximos en S. Nevada para un año medio.



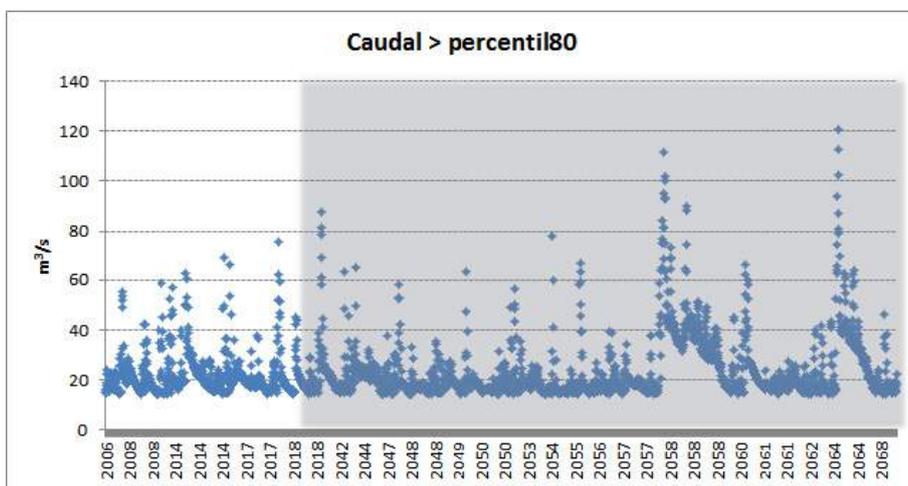
Comparativa actual y futura de los caudales medios en S. Nevada para un año medio.



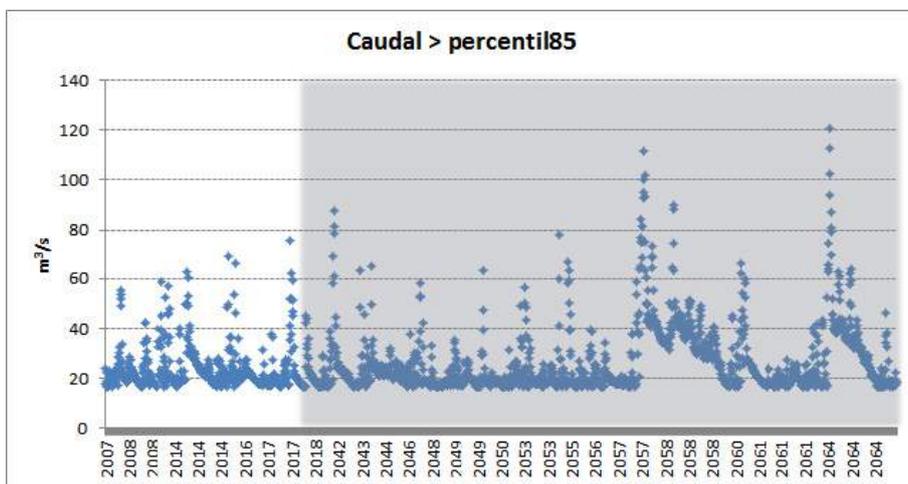
Evolución del caudal máximo anual en S. Nevada.



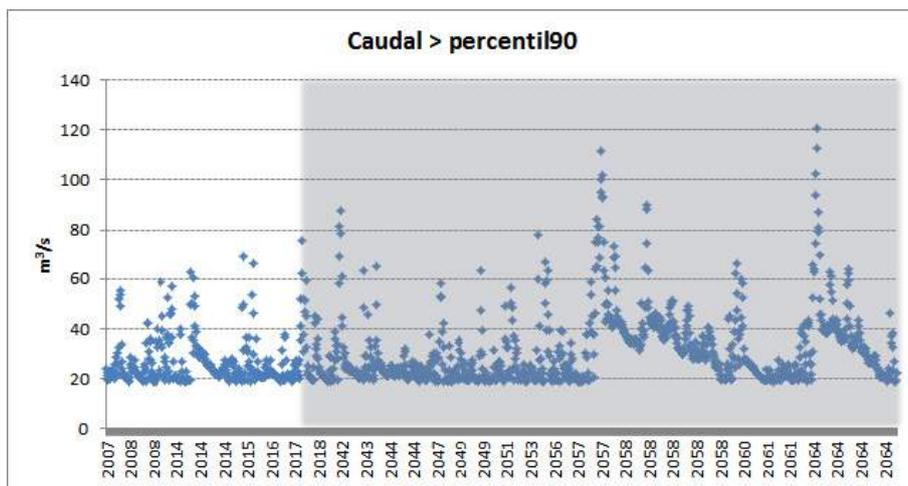
Comparativa actual y futura a nivel mensual de los caudales medios diarios en S. Nevada.



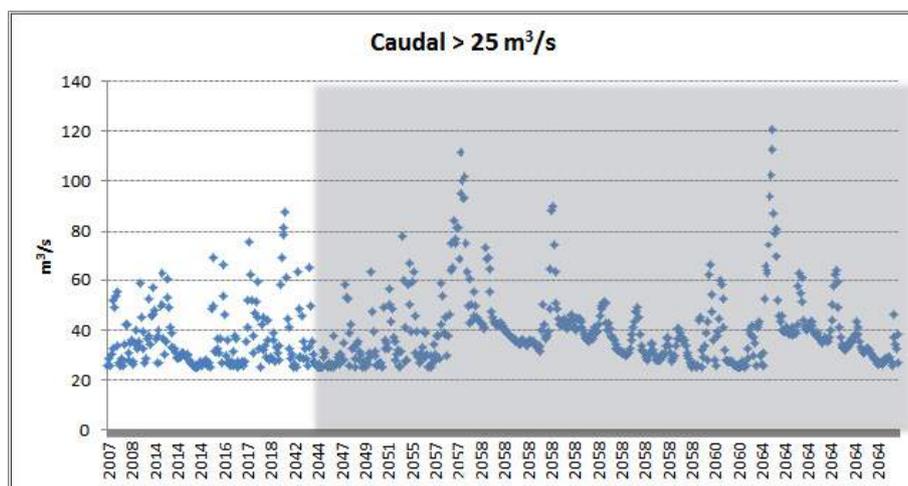
Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 80 en S. Nevada.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 85 en S. Nevada.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 90 en S. Nevada



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima de 25 m³/s en S. Nevada

Como resumen de todos los gráficos anteriores, se aprecia en estos dos últimos cómo los caudales máximos aumentan considerablemente durante los meses de diciembre a marzo, en parte debido a las fusiones máximas antes descritas y que contribuyen a ellos de forma decisiva, incrementando el riesgo de importantes crecidas.

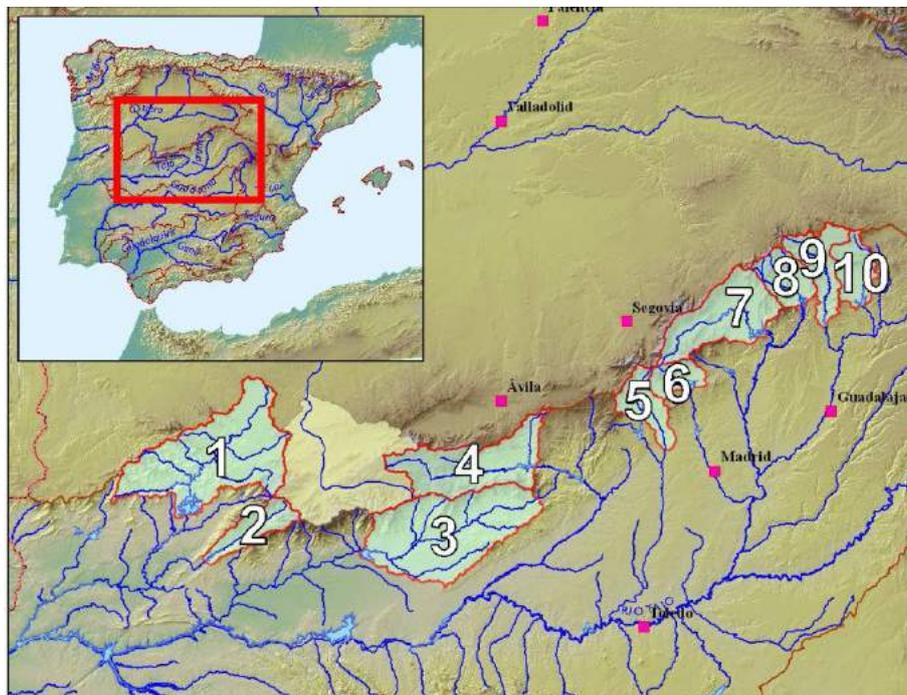
Con todo ello, **se puede afirmar que el cambio en el comportamiento nival en este sistema, sí va a contribuir en el aumento de los episodios de importantes crecidas de caudales, agravando sus efectos perjudiciales, incrementando el riesgo de sufrir mayores daños materiales y humanos.**

SISTEMA CENTRAL

Este sistema se encuentra ubicado en la zona central del país, formada por un total de 10 cuencas, con una superficie de 7.758 km² y una cota media alrededor de 1.067 m. El fenómeno nival tiene una importancia desigual según las diferentes cuencas, ya que sus cotas medias varían entre los 850 m y los 1.400 m

Nº	Cuenca	Superficie (km ²)	Cota media (m)
1	Alagón en E. de Gabriel y Galán	1.848,2	846
2	Jerte en Plasencia	370,0	1.071
3	Tiétar en E. de Rosarito	1.743,2	759
4	Alberche en E. de El Burguillo	1.052,7	1.355
5	Guadarrama en Picotejo	355,9	1.044
6	Manzanares en E. de Santillana	247,1	1.236
7	Lozoya en el Atazar	925,0	1.356
8	Jarama en E. de El Vado	378,0	1.424
9	Sorbe en E. de Beleña	475,6	1.374
10	Bornova en E. de Alcorló	362,3	1.228

Características de las cuencas modelizadas en el Sistema Central.



Localización del conjunto de cuencas modelizadas en S. Central

Tras la simulación con el modelo hidrológico Aster para los escenarios actual y futuro, se obtienen los siguientes resultados numéricos comparativos:

Escenario	Temperatura máxima diaria (°C)	Temperatura media diaria (°C)	Precipitación máxima diaria (mm)	Precipitación media diaria (mm)
Actual	28,47	9,87	45,25	3,03
Futuro	30,80	11,42	48,11	3,18
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+8,2%	+15,7%	+6,3%	+4,7%

Escenarios temporales actual y futuro para las temperaturas y precipitaciones en el S. Central.

En este caso, se vuelve a repetir la misma tendencia que en el resto de sistemas, con un aumento de las temperaturas tanto máximas como medias, con lo que son de esperar unas conclusiones similares en cuanto a las acumulaciones/fusiones nivales. También se observa un ligero aumento en las precipitaciones medias y en las precipitaciones máximas, por lo que también es de esperar que las acumulaciones nivales máximas y los picos de caudales máximos sufran cambios tanto en magnitud como ubicación temporal.

Escenario	Nieve precipitada máxima diaria (mm)	Nieve precipitada media diaria (mm)	Nieve acumulada máxima anual (mm)	Nieve acumulada media anual (mm)
Actual	20,48	0,46	774,9	77,94
Futuro	29,71	0,40	670	45,41
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+45,1 %	-14,3%	-13,5%	-41,7%

Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en el S. Central.

Del análisis de estos resultados se aprecian varios importantes cambios en el comportamiento nival. Se observan cuantiosos aumentos en las precipitaciones en forma de nieve máxima pero descensos tanto en la nieve precipitada media como en la nieve acumulada máxima. Esto indica que las precipitaciones de nieve disminuyen en valores acumulados anuales y que a pesar de que se producen episodios de cuantiosas nevadas, la fusión debida a las altas temperaturas impide que esta nieve se acumule y que pase a formar parte de los caudales fluyentes en los ríos, incrementándolos de forma significativa.

Escenario	Fusión máxima en la cuenca (hm ³)	Caudal máximo en la cuenca (m ³ /s)	Caudal promedio en la cuenca (m ³ /s)
Actual	94,6	1.952	148,5
Futuro	129,9	2.251	154,3
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+37,4 %	+15,3%	+3,9%

Comparativa actual y futura de las máximas fusiones, caudales máximos y caudales medios en S. Central.

Para el estudio de la fusión y caudales, únicamente durante el periodo donde la nieve tiene especial importancia (diciembre-mayo), se han calculado estas magnitudes durante este periodo y se han tomado para el caso del escenario futuro, la media de los tres máximos de cada serie, puesto que el periodo futuro es aproximadamente tres veces más extenso que el periodo actual. También se ha calculado la importancia que tendrá la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media. Con ello, los resultados obtenidos son los siguientes:

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)
Actual	94,6	1952,3
Futuro	119,4	2103,8
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+26,2%	+7,7%

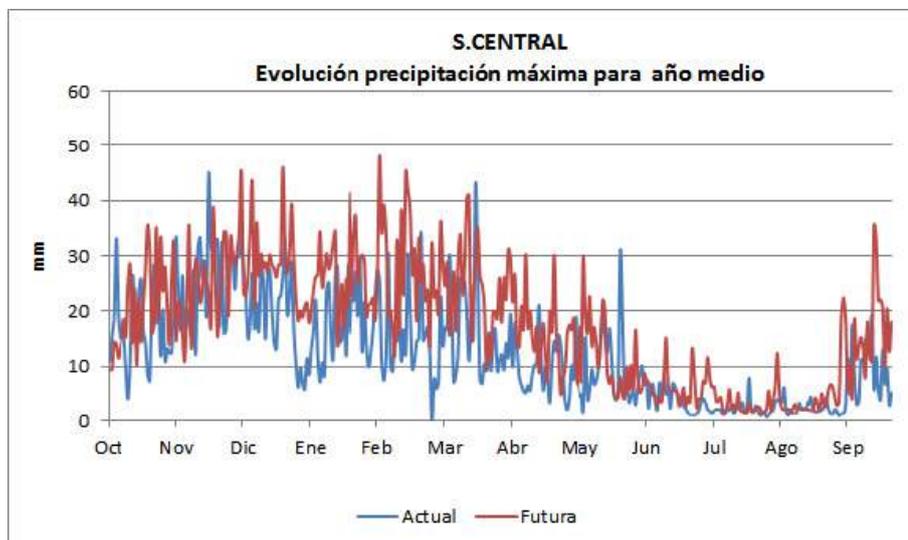
Comparativa actual y futura de las máximas fusiones y caudales máximos durante el periodo diciembre-mayo en el S. Central.

Escenario	Nieve precipitada media (mm)	Precipitación media (mm)	%Nieve Precipitada / Precipitación
Futuro	0,74	4,25	17,31%

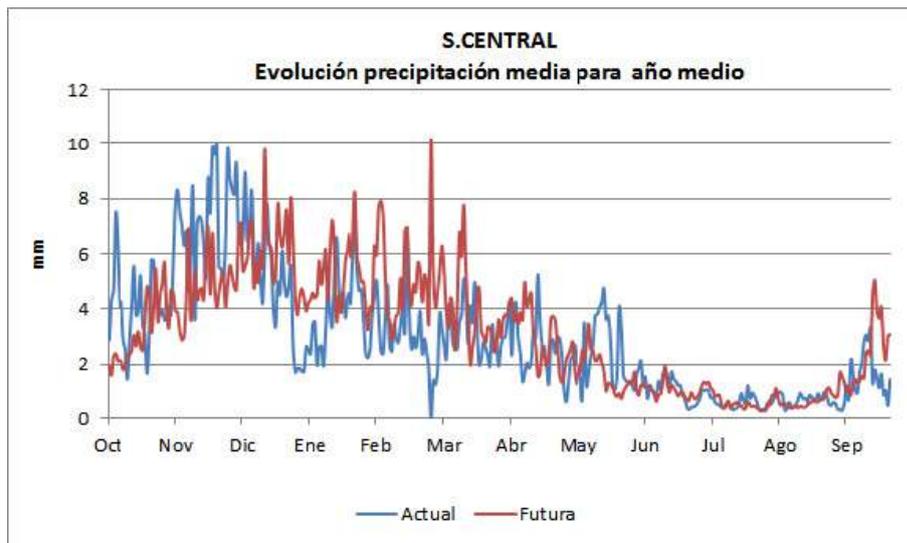
Importancia de la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media para el escenario futuro, durante el periodo diciembre-mayo en S. Central.

Tal y como se esperaba, la fusión máxima aumenta de forma importante contribuyendo a que los caudales máximos también lo hagan de forma moderada. En los gráficos que se adjunta posteriormente, se observará cómo la fusión temprana de los recursos nivales contribuyen de forma decisiva en estos caudales de pico o máximos, lo que pone de manifiesto la importancia en ellos del fenómeno nival.

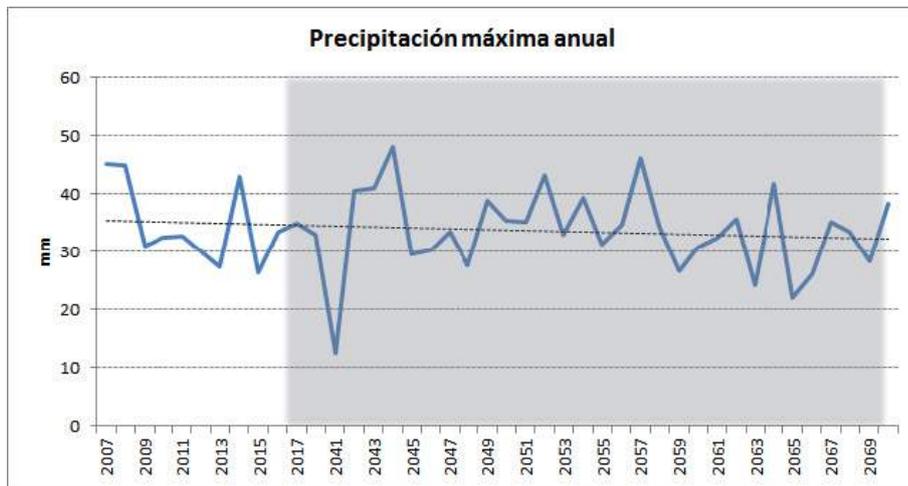
A continuación, se adjuntan los gráficos correspondientes a un año medio para ambos escenarios, actual y futuro, en los que se han representado las magnitudes comentadas en las tablas anteriores.



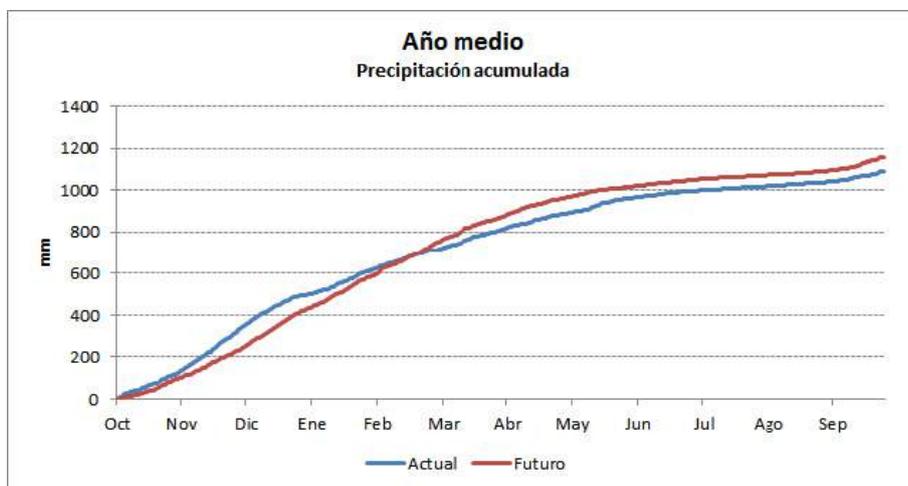
Evolución mensual de las máximas precipitaciones en S. Central.



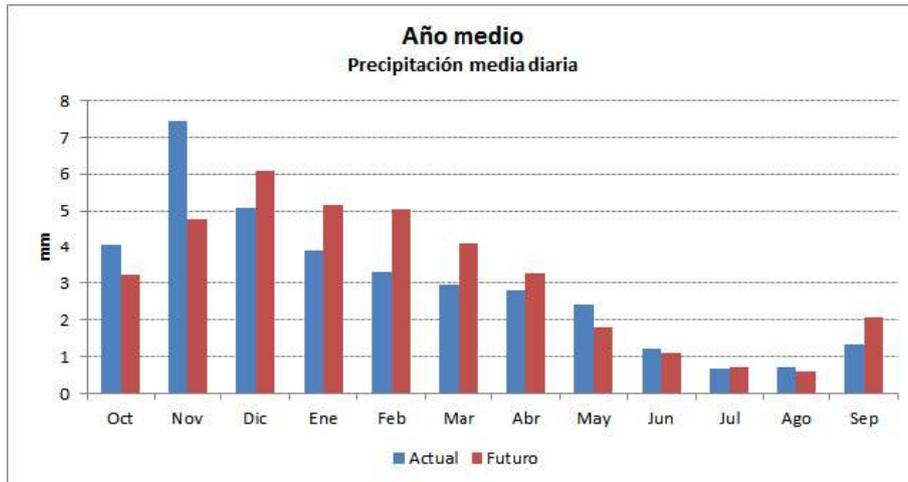
Evolución de la precipitación media mensual en S. Central.



Comparativa actual y futura de las máximas precipitaciones anuales en S. Central.

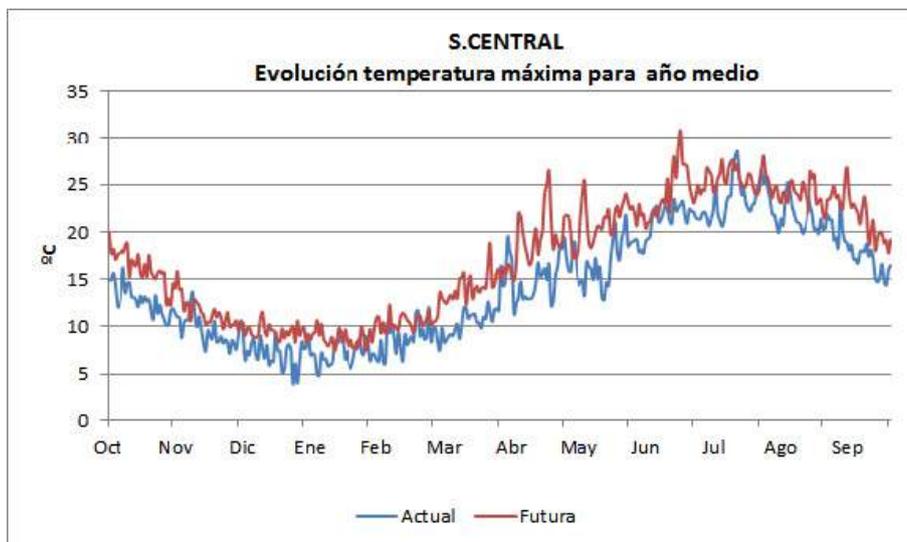


Comparativa actual y futura en la evolución de la precipitación acumulada en S. Central para un año medio.

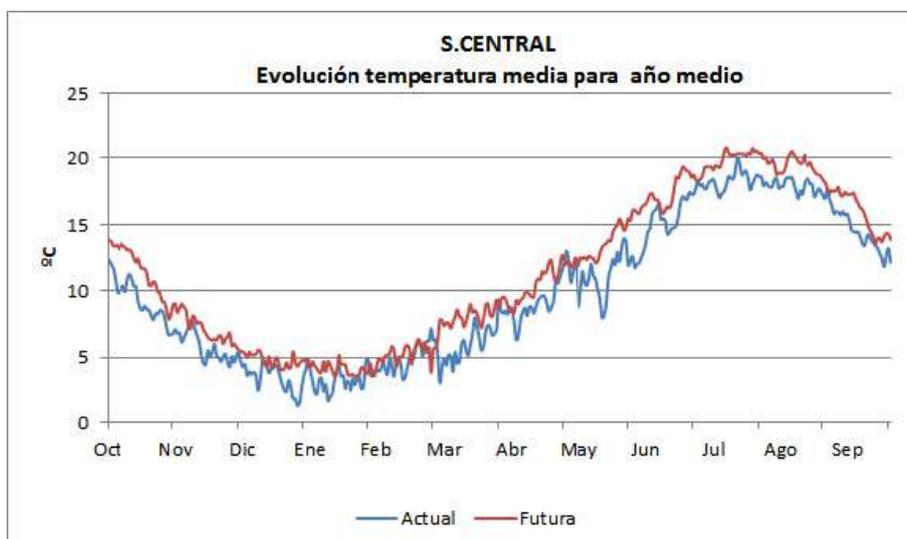


Comparativa actual y futura de la precipitación media diaria en S. Central.

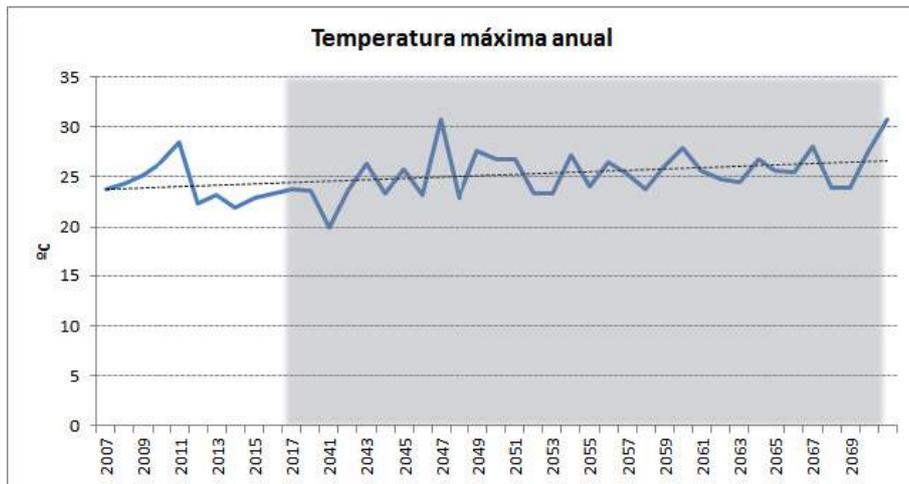
Se aprecia un claro incremento en las precipitaciones máximas durante los meses de enero hasta abril y una clara disminución de la precipitación acumulada durante el periodo otoñal.



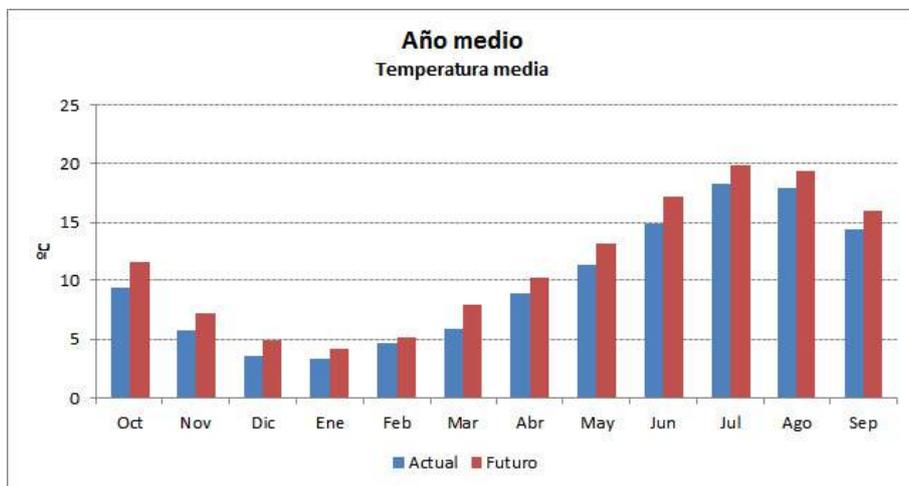
Comparativa actual y futura de la temperatura máxima en S. Central para un año medio.



Comparativa actual y futura de la temperatura media en S. Central para un año medio.

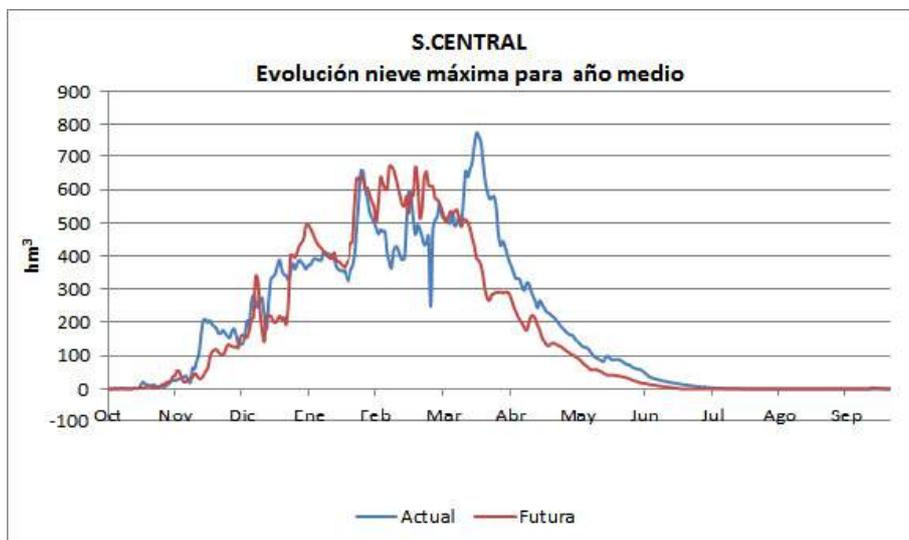


Evolución de las temperaturas máximas anuales para un año medio en S. Central.

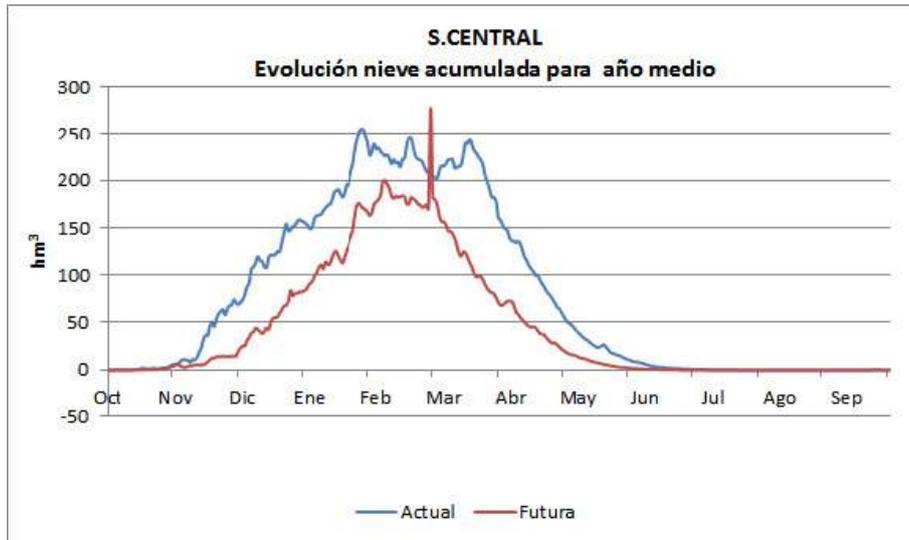


Comparativa actual y futura de la temperatura media mensual en S. Central para un año medio.

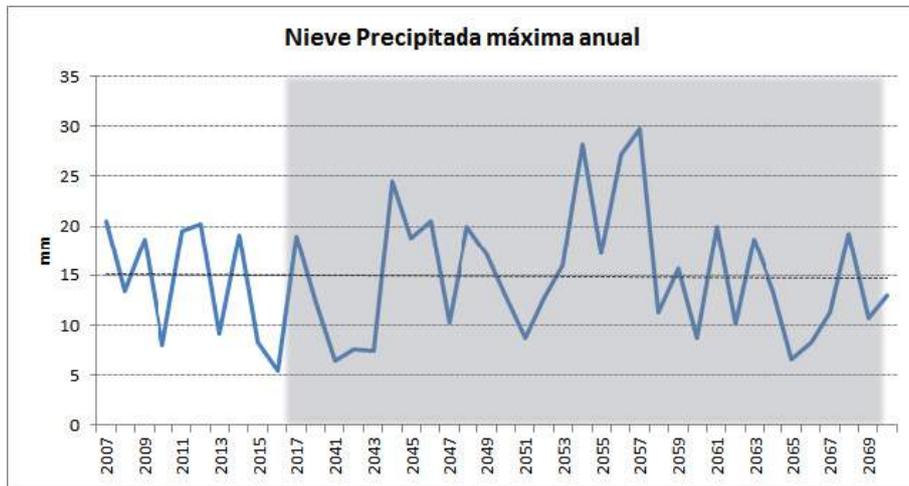
Las temperaturas máximas aumentan durante todo el año, así como las temperaturas medias, en consonancia con el resto de sistemas analizados, pudiendo aplicar en este caso las mismas conclusiones comentadas.



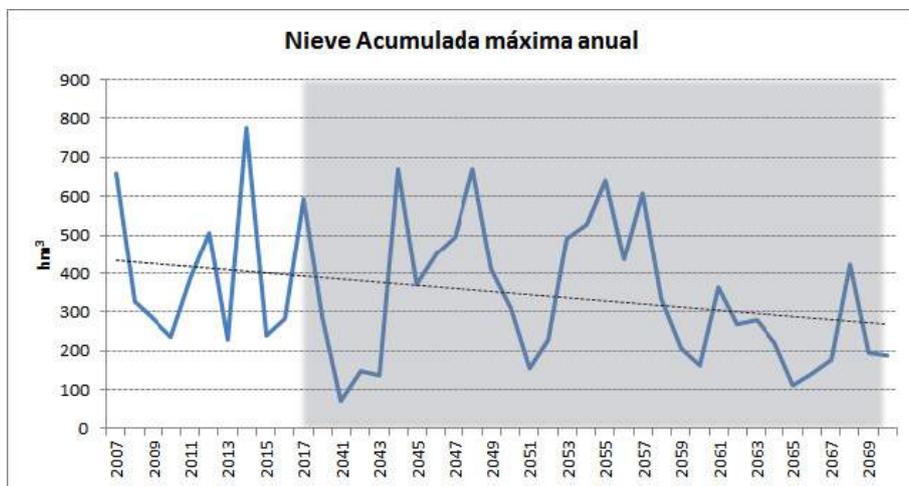
Comparativa actual y futura de la nieve máxima acumulada en S. Central para un año medio.



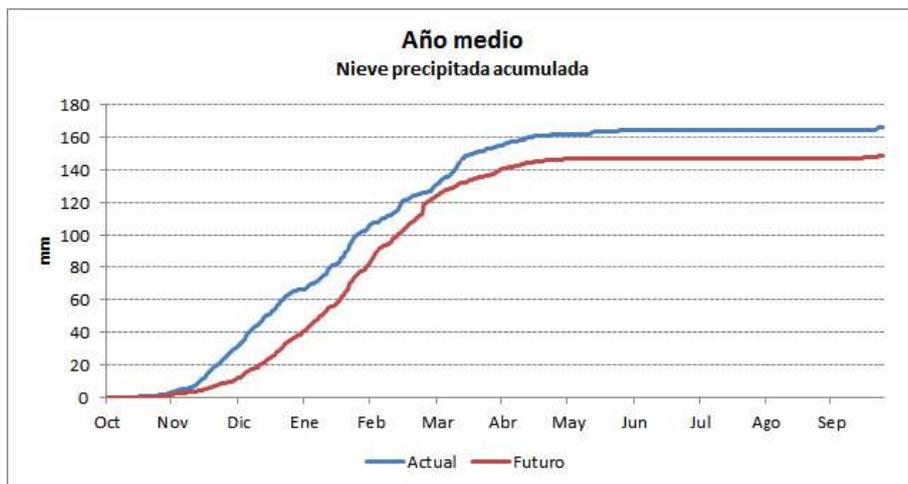
Comparativa actual y futura de la nieve acumulada en S. Central para un año medio.



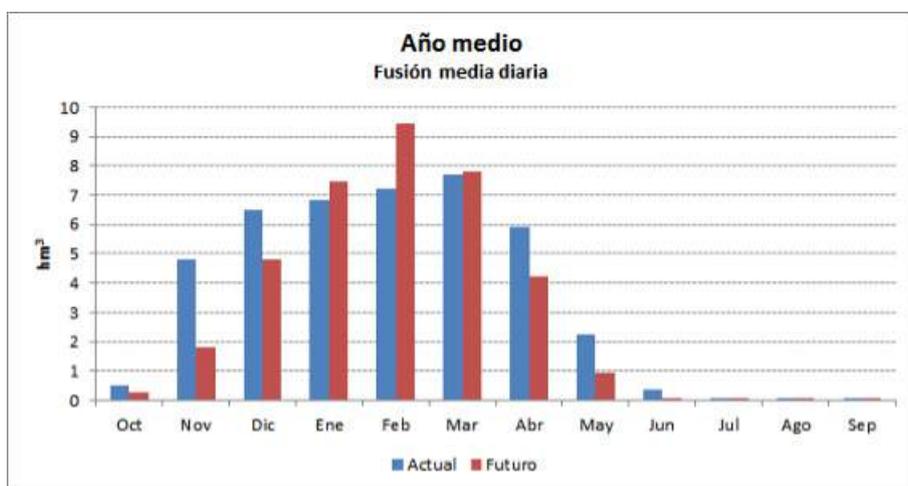
Evolución anual de la máxima nieve precipitada en S. Central.



Evolución anual de la máxima nieve acumulada en S. Central.

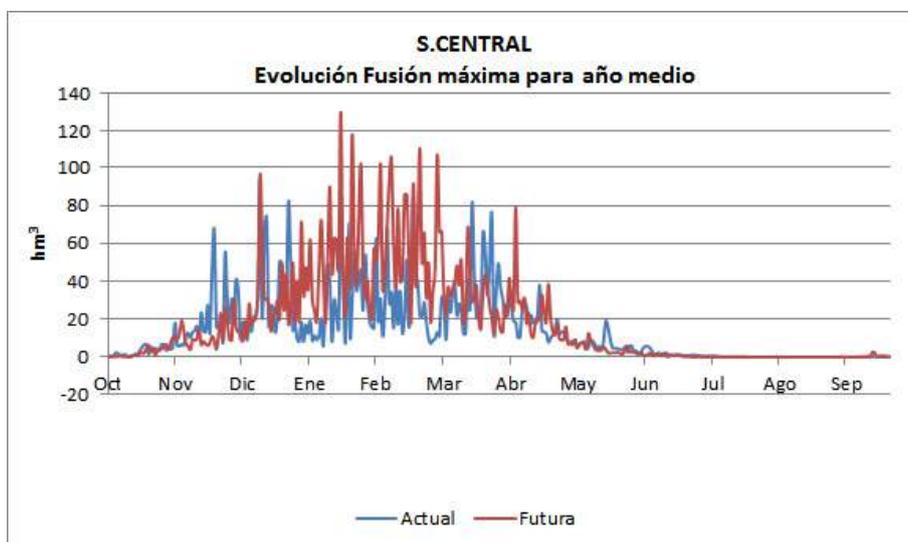


Evolución anual de la nieve precipitada acumulada en S. Central.

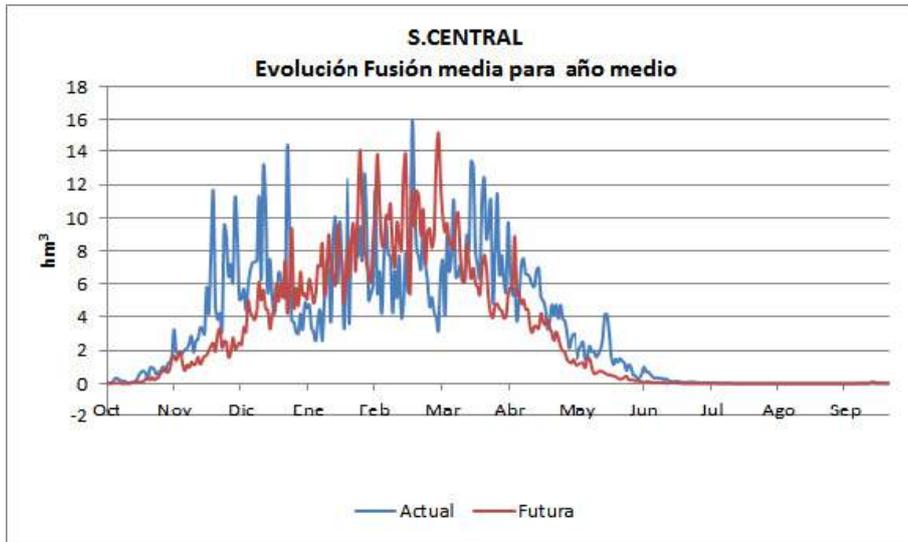


Comparativa actual y futura de la fusión media diaria en S. Central para un año medio.

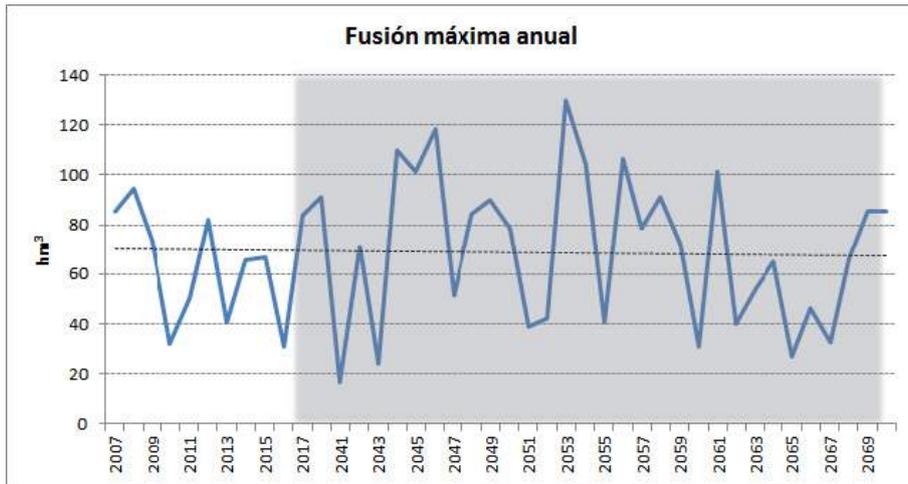
Las acumulaciones máximas aumentan durante los meses de enero a marzo debido al aumento de precipitaciones en este periodo, pero disminuyen claramente a partir de marzo, lo que pone de manifiesto las fusiones tempranas que adelantan y aceleran la fusión nival, tal y como se comentó anteriormente.



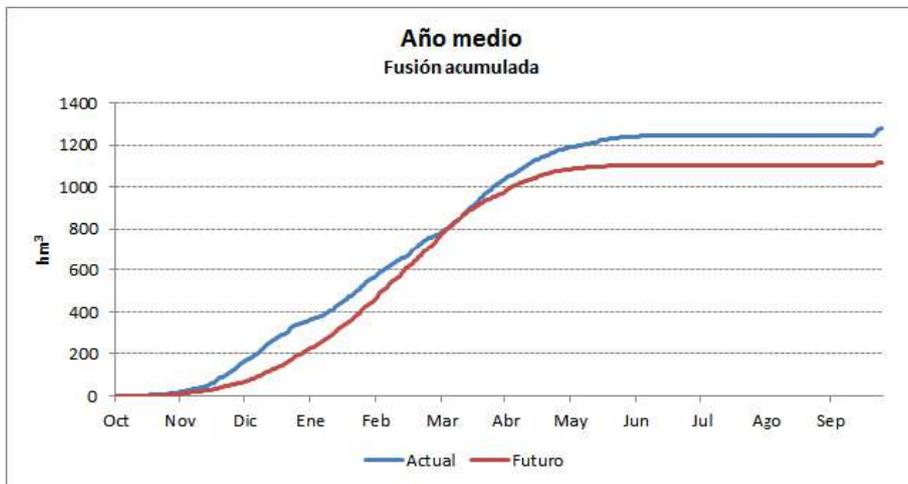
Comparativa entre la fusión máxima diaria actual y en el escenario futuro a lo largo del año en el S. Central.



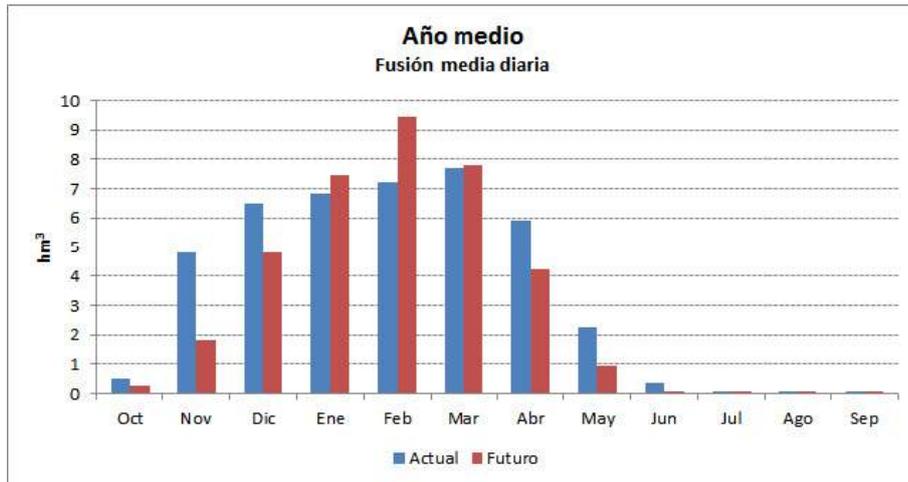
Comparativa actual y futura de la fusión media en S. Central para un año medio.



Evolución de la máxima fusión anual en S. Central.

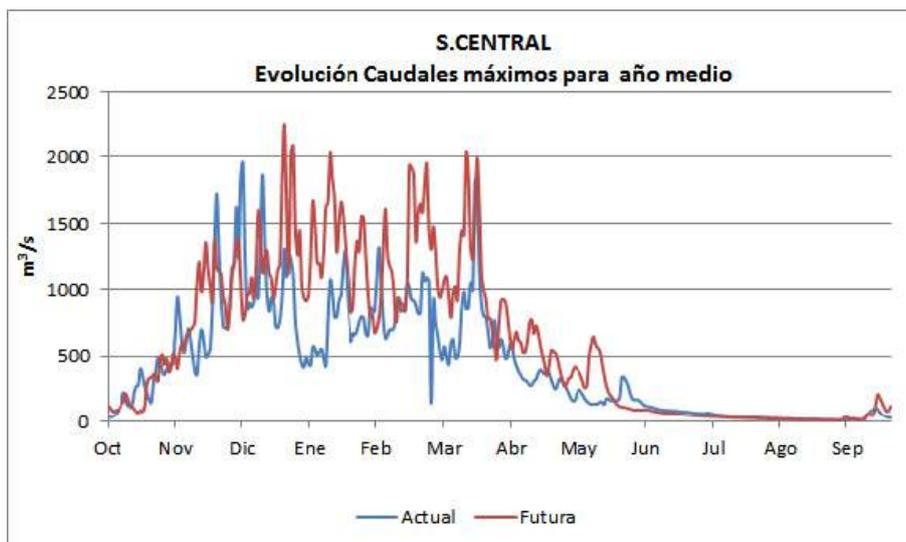


Comparativa actual y futura de la máxima fusión en S. Central para un año medio.

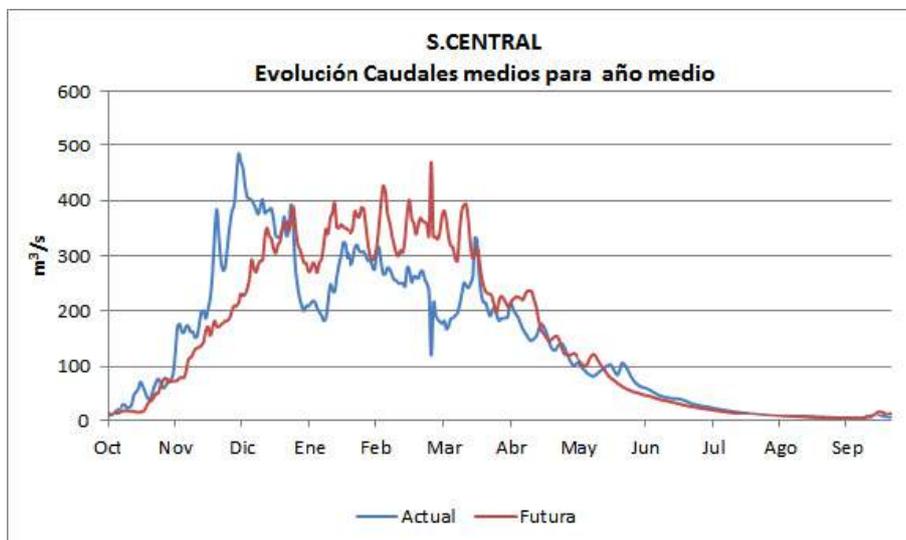


Comparativa actual y futura de la fusión media en S. Central para un año medio.

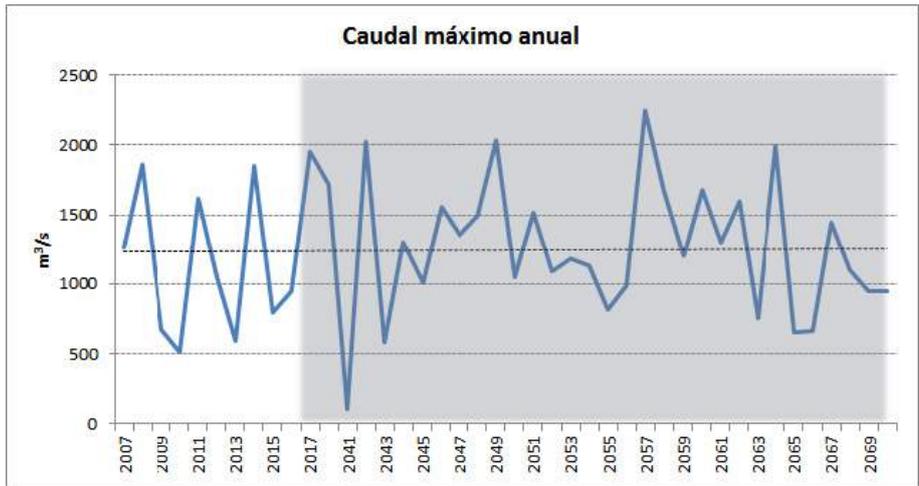
En estos gráficos se aprecia claramente este adelantamiento en la fusión que junto con el incremento de precipitaciones en la primera mitad del año, contribuirán claramente al incremento de los caudales máximos en este periodo. El patrón nivel de fusión se ve modificado también en este sistema, disminuyendo claramente en los meses de abril y mayo.



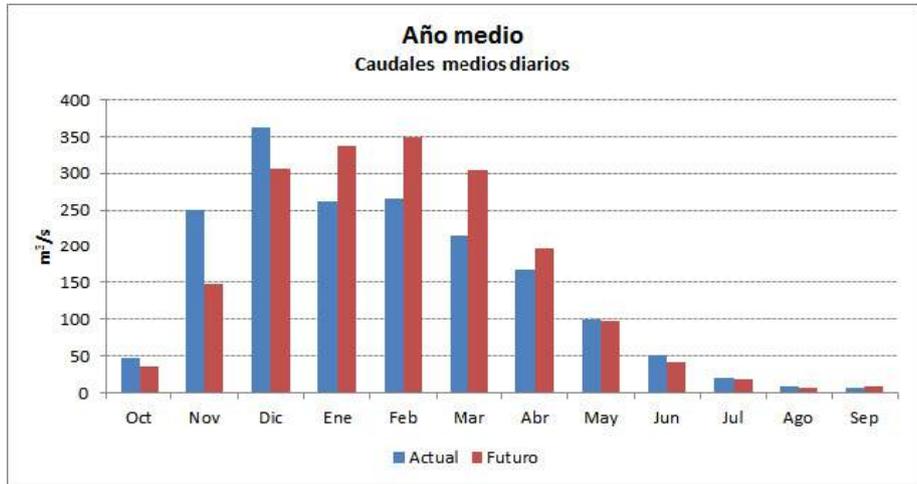
Comparativa actual y futura de la fusión media en S. Central para un año medio.



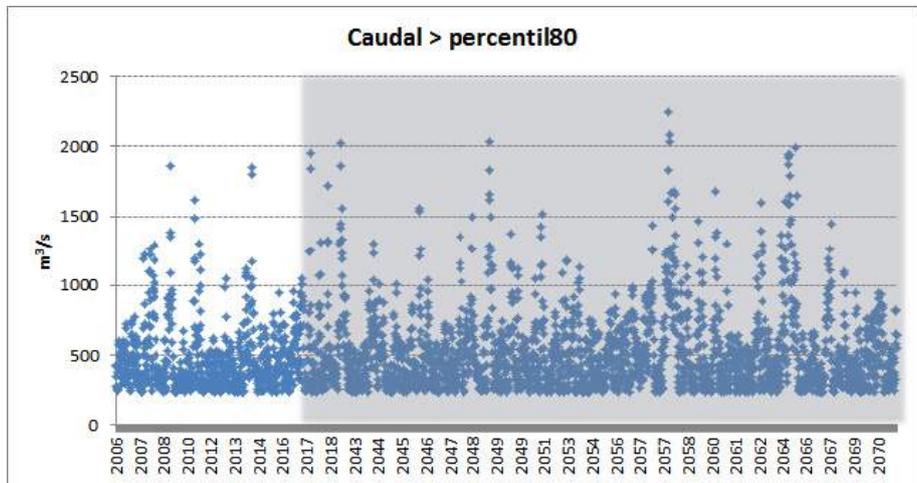
Comparativa actual y futura de la fusión media en S. Central para un año medio.



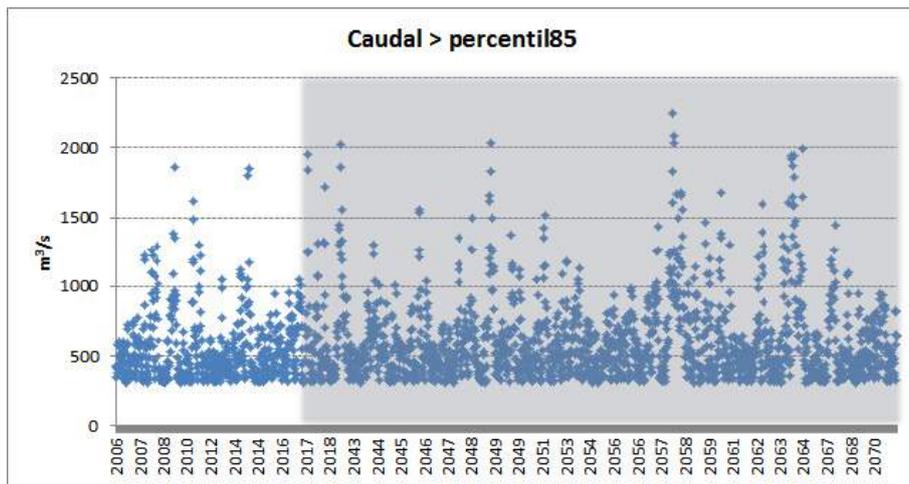
Evolución del caudal máximo anual en S. Central.



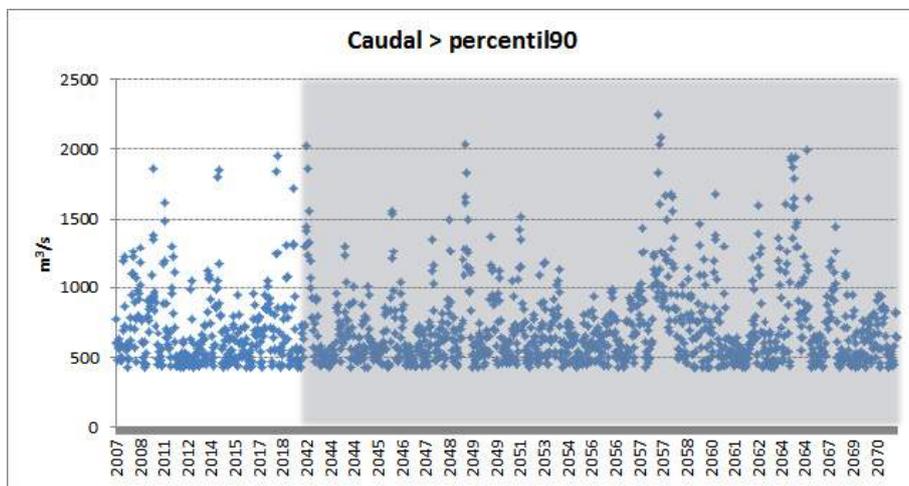
Comparativa actual y futura a nivel mensual de los caudales medios diarios en S. Central.



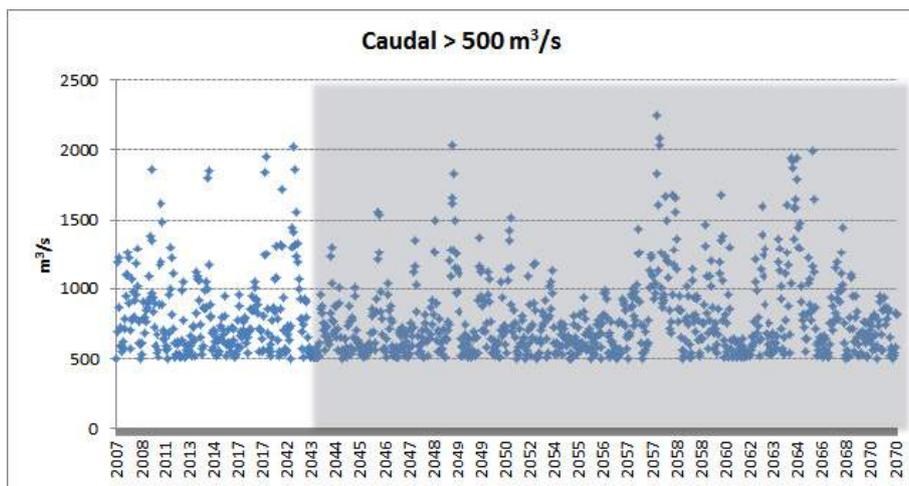
Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 80 en S. Central.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 85 en S. Central.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 90 en S. Central.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima de 500 m^3/s en S. Central.

Los caudales máximos aumentan significativamente en los primeros meses del año, como se ha comentado anteriormente, mientras que los caudales otoñales disminuyen claramente por la disminución de precipitaciones en esta época y por el aumento de las temperaturas.

CORDILLERA CANTÁBRICA

Este sistema se encuentra ubicado en la zona norte del país, formada por un total de 31 cuencas de las cuales 16 pertenecen a la Confederación Hidrográfica del Cantábrico y 15 a la del Duero, con una superficie de 14.099 km² (6.882 pertenecientes al Duero y 7.217 al Cantábrico) y una cota media de alrededor de 1.169 m. La nieve tiene especial importancia en las entradas de frentes nubosos provenientes del norte, puesto que esta cordillera es el primer accidente orográfico que encuentran estos frentes en su desplazamiento de norte a sur, descargando importantes precipitaciones en forma de nieve, conformando la mayor superficie innivada del país. La duración de esta nieve en las cumbres suele extenderse hasta el mes de abril, si bien depende mucho del régimen de vientos que pueden hacer que funda bastante antes o que permanezca algo más de tiempo.

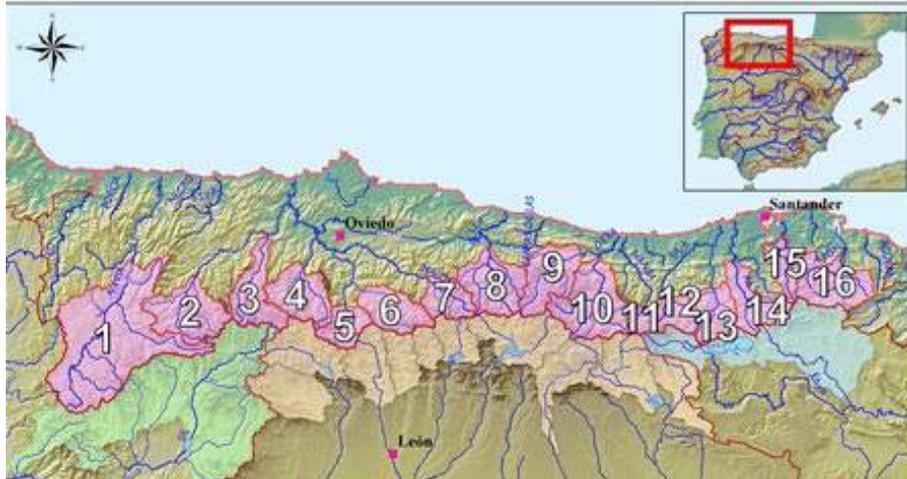
En las dos imágenes siguientes se detalla la ubicación del conjunto de cuencas, agrupadas según a la Confederación Hidrográfica a la que pertenecen.



Cuencas pertenecientes a la CH Duero

Nº	Cuenca	Superficie (km ²)	Cota media (m)
6	Luna en Barrios Luna	496,0	1.500
10	Porma en E. de Porma	250,4	1.436
11	Esla en Riaño	593,4	1.470
12	Carrión en Celadilla	491,5	1.499
13	Pisuerga en A. de Campoo	548,1	1.228
14	Rubagón-Camesa	374,6	1.078
15	Tormes en Santa Teresa	1.851,7	1.362
1	Tera en Puebla de Sanabria	426,9	1.366
2	Negro en Santa Eulalia del río	376,5	1.122
3	Eria en Morla	281,2	1.369
4	Duerná en Puente Velilla	247,9	1.325
5	Omañas en San Martín	483,4	1.361
7	Bernesga en Cuadros	406,7	1.355
8	Torío en Pardavé	260,7	1.402
9	Curueño en Caldas de Nocedo	154,4	1.515

Características de las cuencas pertenecientes a la CH Duero.



Cuencas pertenecientes a la CH Cantábrico

Nº	Cuenca	Superficie (km ²)	Cota media (m)
1	Navia	1.770,6	842,7
2	Narcea	531,9	1.045,9
3	Pigüeña	404,1	1.099,3
4	Trubia	418,7	1.064,5
5	Caudal	234,8	1.125,8
6	Aller	356,4	1.075,2
7	Nalón	264,3	1.127,0
8	Sella	480,8	1.007,2
9	Cares	454,9	1.156,0
10	Deva	643,3	1.024,4
11	Nansa	89,9	1.254,2
12	Saja	206,9	1.004,9
13	Besaya	305,7	694,9
14	Pas	355,5	600,1
15	Miera	205,5	475,9
16	Asón	494,2	556,4

Características de las cuencas pertenecientes a la CH Cantábrico.

Tras la simulación con el modelo hidrológico Aster para los escenarios actual y futuro, se obtienen los siguientes resultados numéricos comparativos:

Escenario	Temperatura máxima diaria (°C)	Temperatura media diaria (°C)	Precipitación máxima diaria (mm)	Precipitación media diaria (mm)
Actual	18,87	7,29	31,26	3,34
Futuro	21,25	8,63	26,90	3,26
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+12,6%	+18,3%	-13,9%	-2,6%

Escenarios temporales actual y futuro para las temperaturas y precipitaciones en C. Cantábrica.

En este caso, se vuelve a repetir la misma tendencia que el resto de sistemas, con un aumento de las temperaturas tanto máximas como medias, con lo que es de esperar unas conclusiones similares en cuanto a las acumulaciones/fusiones nivales. Sin embargo, tanto las precipitaciones máximas como medias disminuyen de manera desigual, siendo más importante el descenso en las precipitaciones máximas, lo que podrá afectar de forma directa a los caudales máximos futuros.

Escenario	Nieve precipitada máxima diaria (mm)	Nieve precipitada media diaria (mm)	Nieve acumulada máxima anual (mm)	Nieve acumulada media anual (mm)
Actual	15,82	0,83	2.072	333,0
Futuro	23,38	0,70	2.262	190,1
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+47,8 %	-15,9%	+9,2%	-42,9%

Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en la C. Cantábrica.

Del análisis de estos resultados se aprecian varios importantes cambios en el comportamiento nival. Se observan cuantiosos aumentos en las precipitaciones en forma de nieves máximas y en la nieve acumulada máxima, pero descensos tanto en la nieve precipitada media como en la nieve acumulada media, lo que apunta a un cambio en el patrón de innivación en el que las nevadas intensas se verán favorecidas, pero su permanencia en las cumbres será más breve debido al importante aumento en las temperaturas.

Escenario	Fusión máxima en la cuenca (hm ³)	Caudal máximo en la cuenca (m ³ /s)	Caudal promedio en la cuenca (m ³ /s)
Actual	381,2	1.783	342
Futuro	560,6	1.729	317
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+47,0 %	-3,0%	-7,4%

Comparativa actual y futura de las máximas fusiones, caudales máximos y caudales medios en C. Cantábrica.

Para el estudio de la fusión y caudales, únicamente durante el periodo donde la nieve tiene especial importancia (diciembre-mayo), se han calculado estas magnitudes durante este periodo y se han tomado para el caso del escenario futuro, la media de los tres máximos de cada serie, puesto que el periodo futuro es aproximadamente tres veces más extenso que el periodo actual. También se ha calculado la importancia que tendrá la

nieve precipitada media respecto de la precipitación total media. Con ello, los resultados obtenidos son los siguientes:

Escenario	Fusión máxima en el sistema (hm ³)	Caudal máximo en el sistema (m ³ /s)
Actual	381,2	1738,7
Futuro	493,4	1693,1
% de variación del escenario futuro respecto del actual	+29,4%	-5,1%

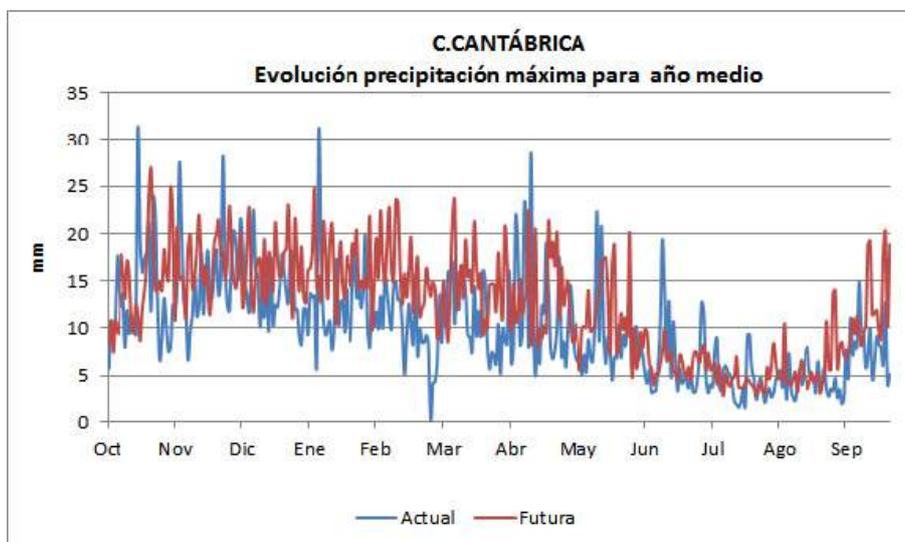
Comparativa actual y futura de las máximas fusiones y caudales máximos durante el periodo diciembre-mayo en el C. Cantábrica.

Escenario	Nieve precipitada media (mm)	Precipitación media (mm)	%Nieve Precipitada / Precipitación
Futuro	1,21	4,00	30,38%

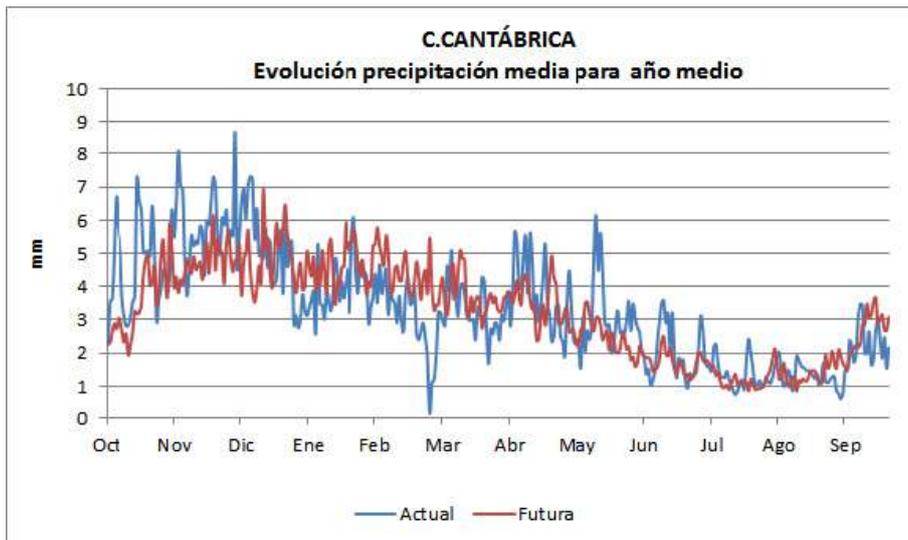
Importancia de la nieve precipitada media respecto de la precipitación total media para el escenario futuro, durante el periodo diciembre-mayo en C. Cantábrica.

Tal y como se esperaba, la fusión máxima aumenta de forma importante pero los caudales máximos disminuyen (como también lo hacía la precipitación), lo que indica que una parte importante de estos caudales máximos es debida a la fusión nival en una proporción mayor que en la actualidad, reforzando así la idea de que la nieve volverá a ser decisiva en los episodios de importantes crecidas de los caudales.

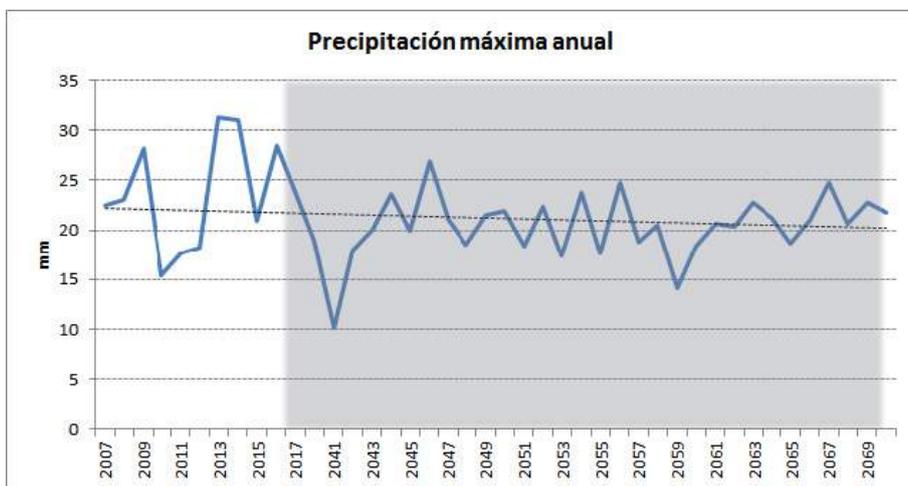
A continuación se adjuntan los gráficos correspondientes a un año medio para ambos escenarios, actual y futuro, en los que se han representado las magnitudes comentadas en las tablas anteriores.



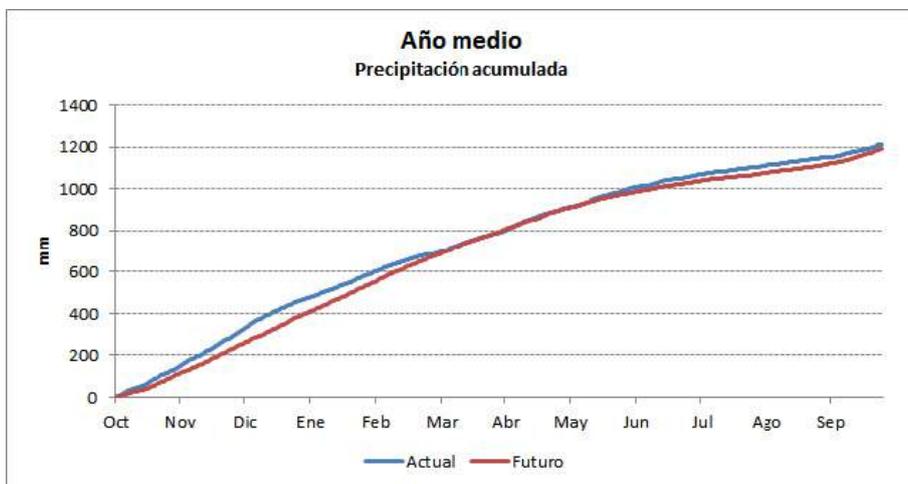
Evolución mensual de las máximas precipitaciones en C. Cantábrica.



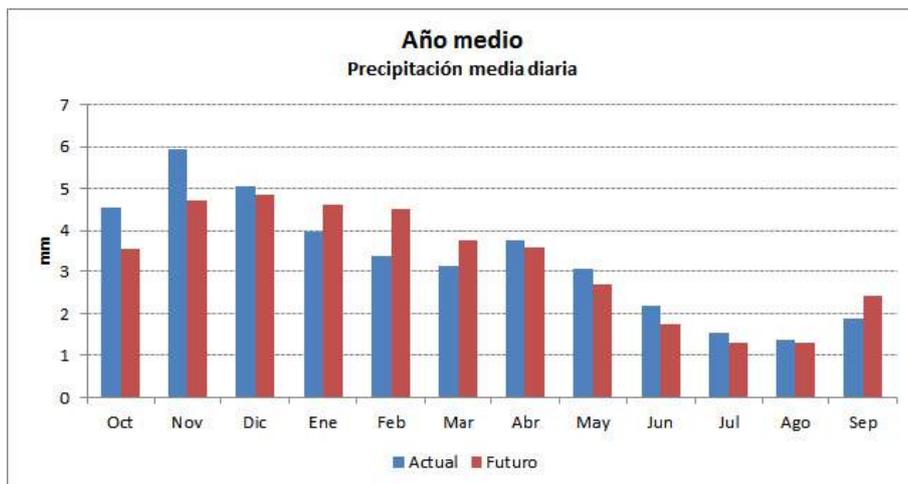
Evolución de la precipitación media mensual en C. Cantábrica.



Comparativa actual y futura de las máximas precipitaciones anuales en C. Cantábrica.

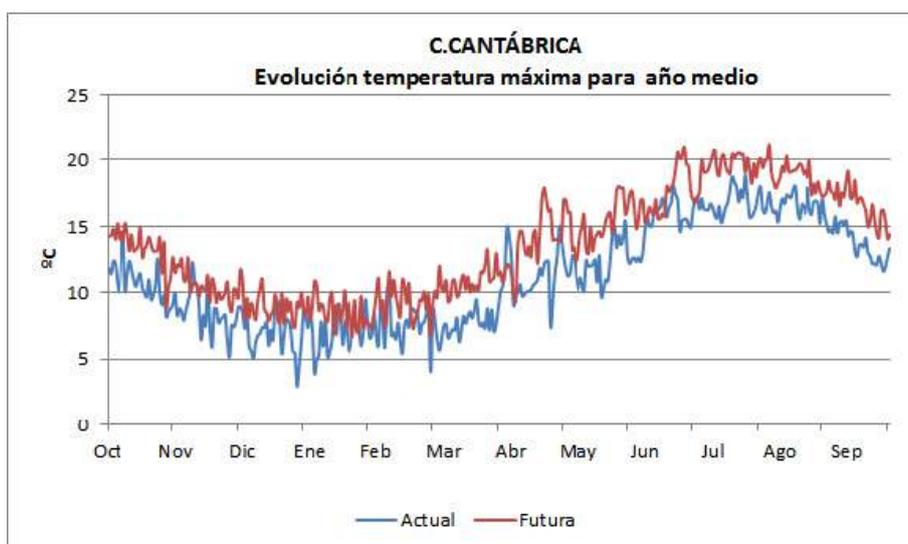


Comparativa actual y futura en la evolución de la precipitación acumulada en C. Cantábrica para un año medio.

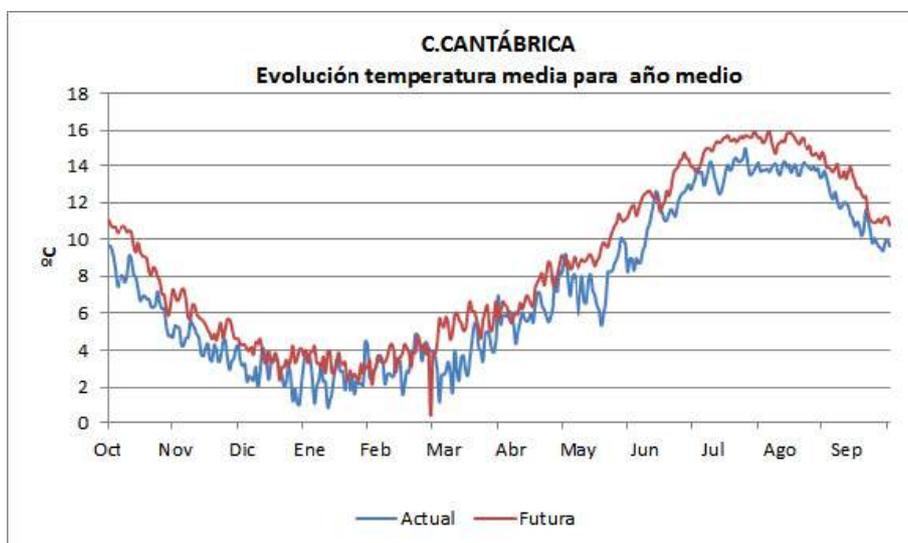


Comparativa actual y futura de la precipitación media diaria en C. Cantábrica.

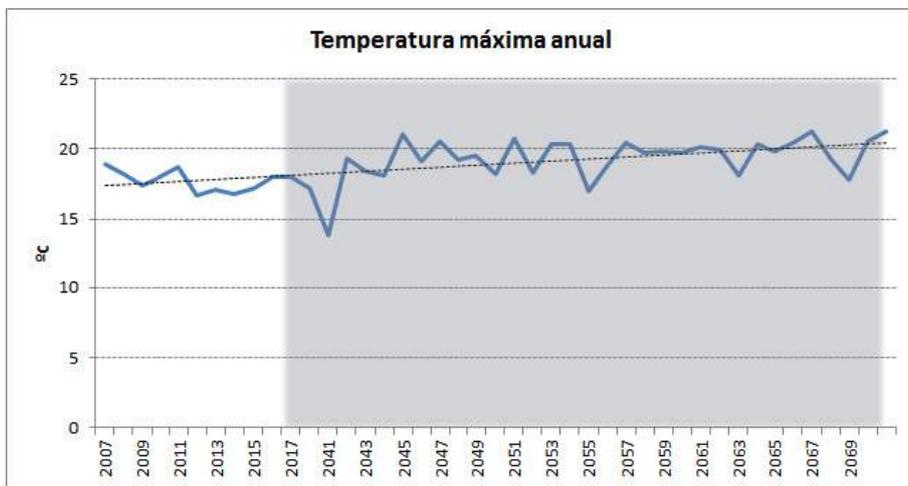
Las precipitaciones máximas presentan numerosos picos superiores a los actuales durante todo el año, pero las precipitaciones medias sólo son superiores durante los meses de enero a marzo y disminuyen claramente durante el resto del año.



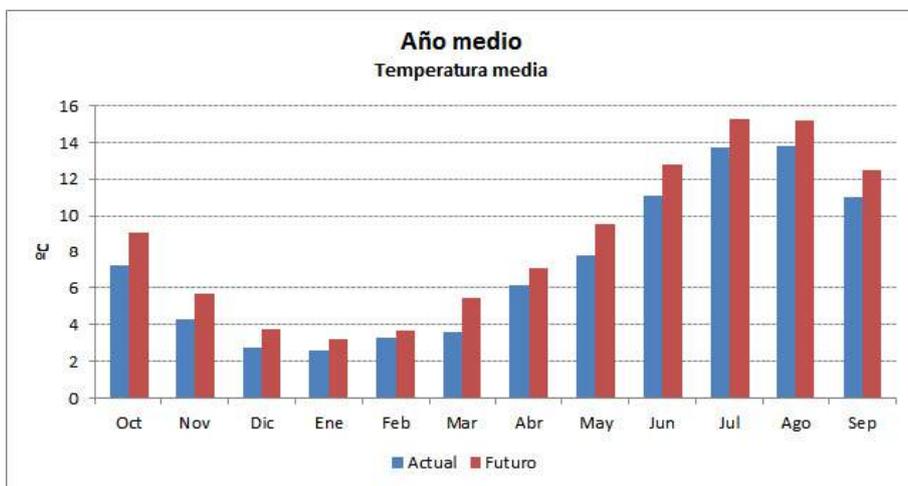
Comparativa actual y futura de la temperatura máxima en C. Cantábrica para un año medio



Comparativa actual y futura de la temperatura media en C. Cantábrica para un año medio.

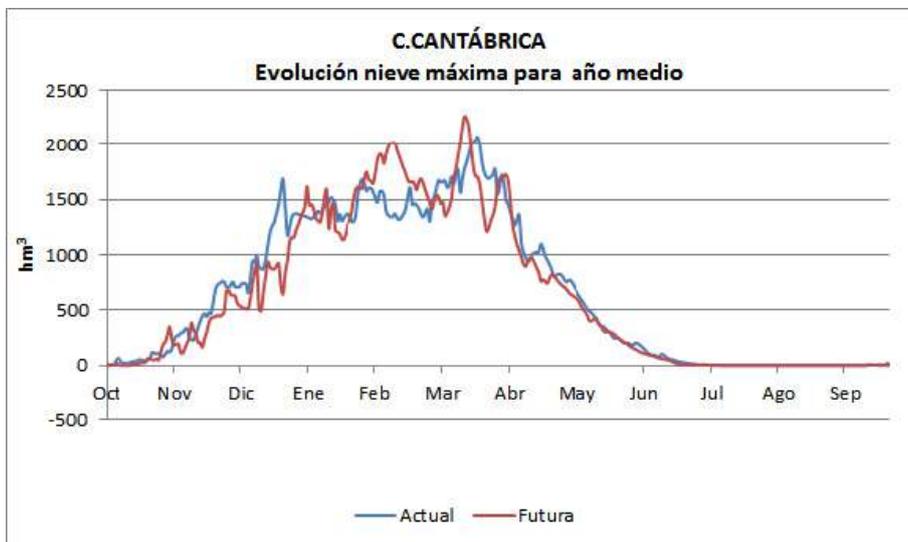


Evolución de las temperaturas máximas anuales para un año medio en C. Cantábrica.

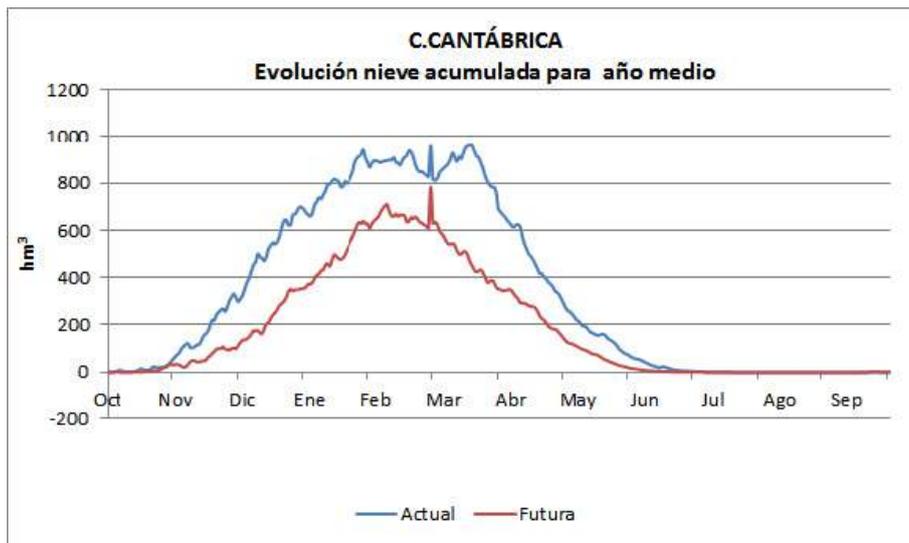


Comparativa actual y futura de la temperatura media mensual en C. Cantábrica para un año medio.

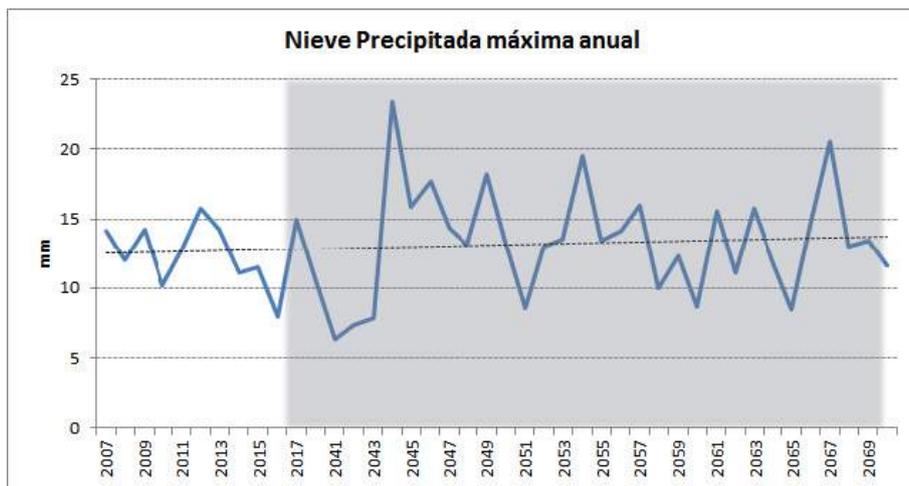
Las temperaturas máximas y medias son superiores a las actuales durante la totalidad del año, en línea con los resultados obtenidos en el resto de sistemas montañosos, pudiéndose aplicar las mismas conclusiones que en ellos.



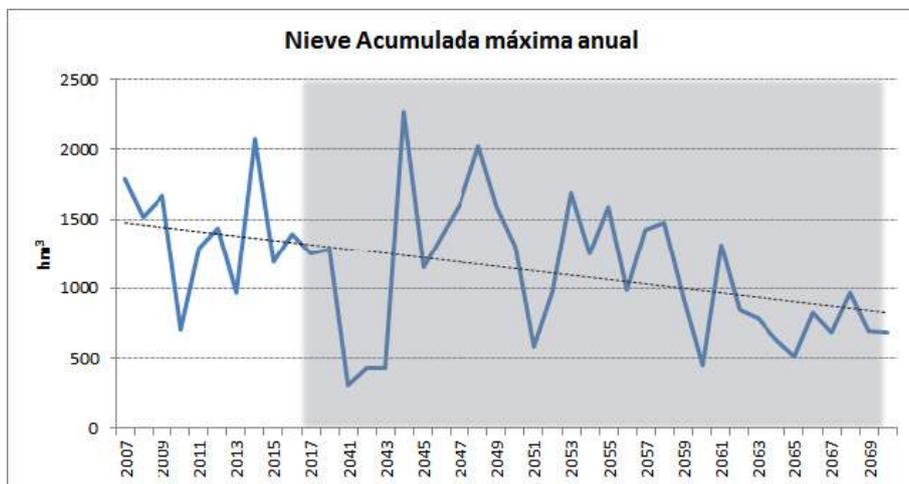
Comparativa actual y futura de la nieve máxima acumulada en C. Cantábrica para un año medio.



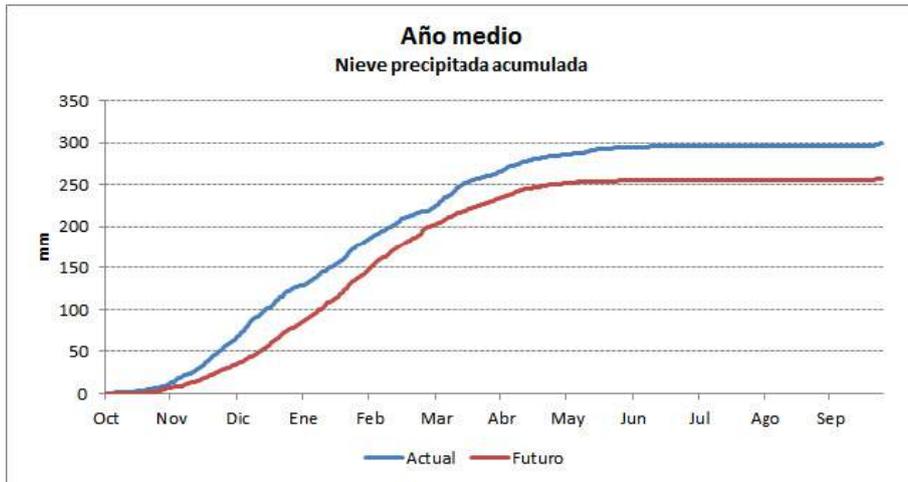
Comparativa actual y futura de la nieve acumulada en C. Cantábrica para un año medio.



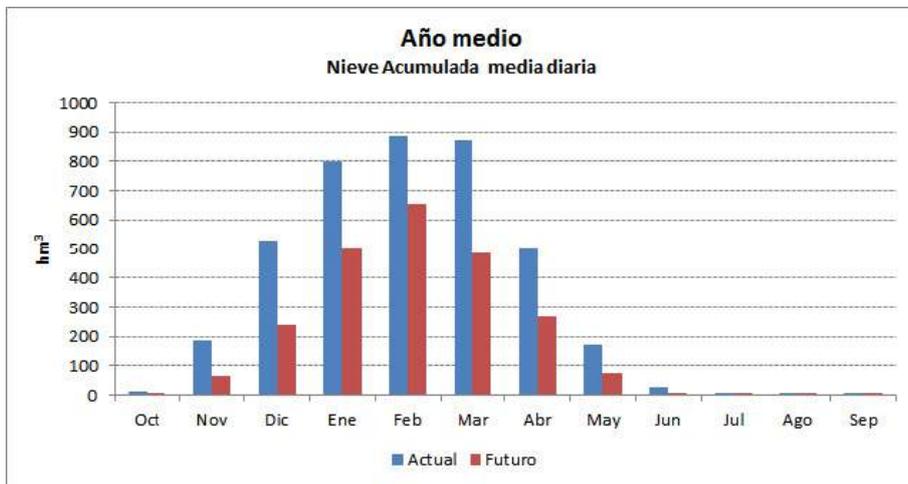
Evolución anual de la nieve precipitada máxima en C. Cantábrica.



Evolución anual de la máxima nieve acumulada en C. Cantábrica.

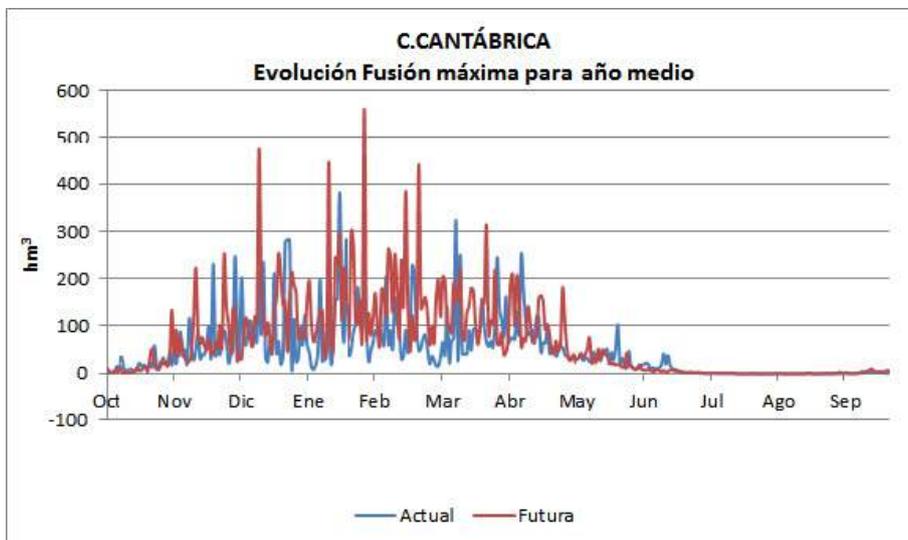


Evolución de las temperaturas máximas anuales para un año medio en C. Cantábrica.

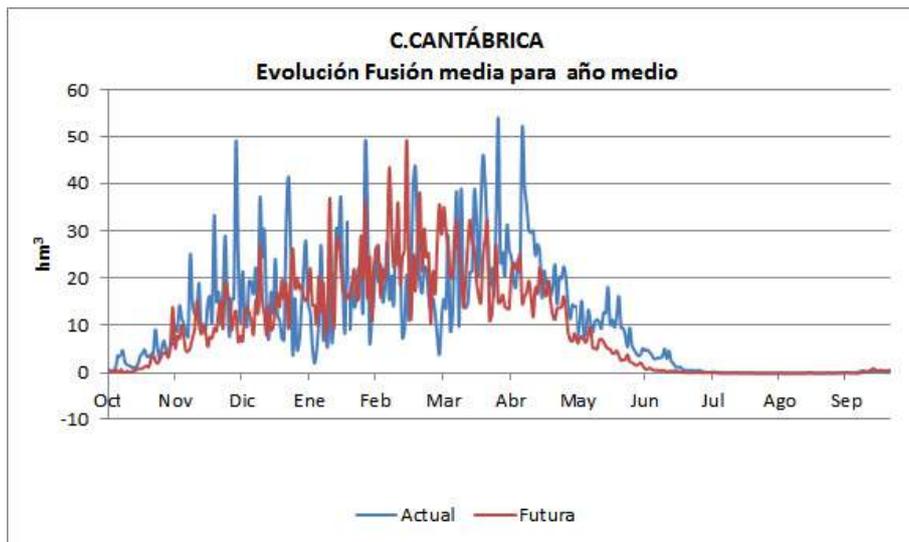


Comparativa actual y futura a nivel mensual de la nieve media diaria acumulada en C. Cantábrica para un año medio.

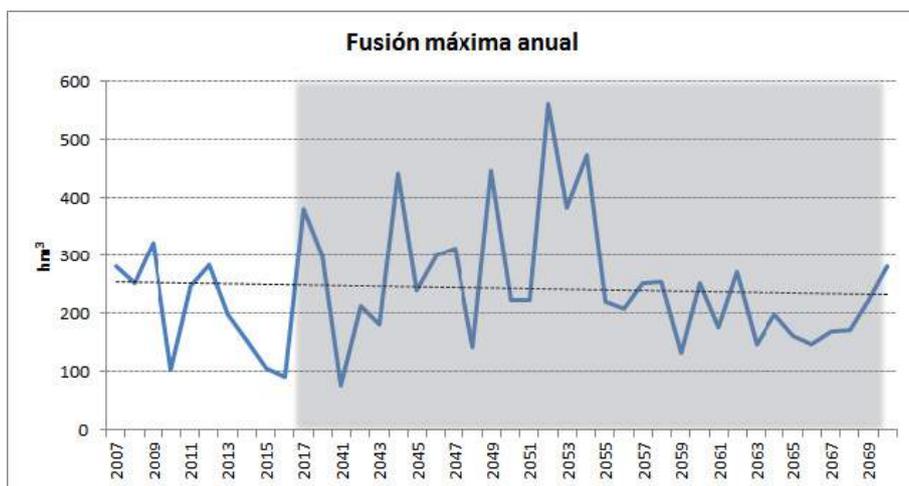
La nieve acumulada media disminuye durante todo el año debido al aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones, pero la nieve acumulada máxima aumenta nuevamente en los meses de enero a marzo, por lo que es de esperar que este hecho influya en los episodios de crecida en este periodo.



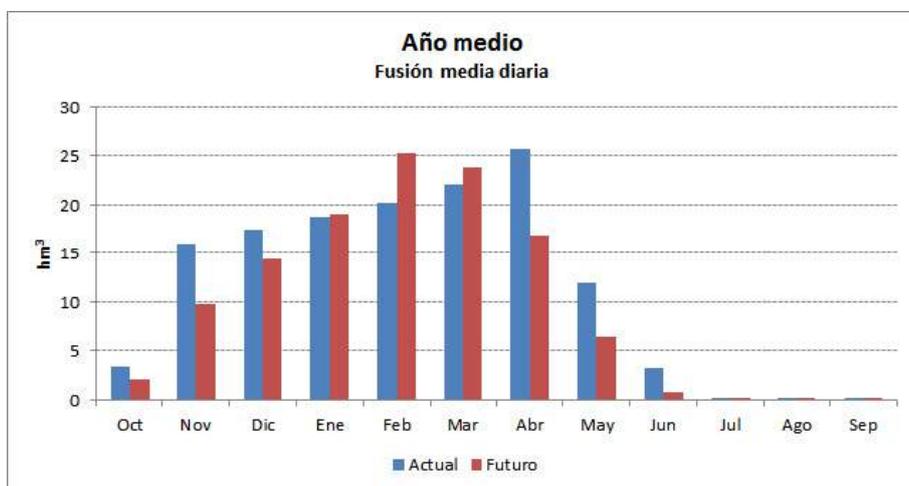
Comparativa entre la fusión máxima diaria actual y en el escenario futuro a lo largo del año en C. Cantábrica.



Comparativa actual y futura de la fusión media en C. Cantábrica para un año medio.

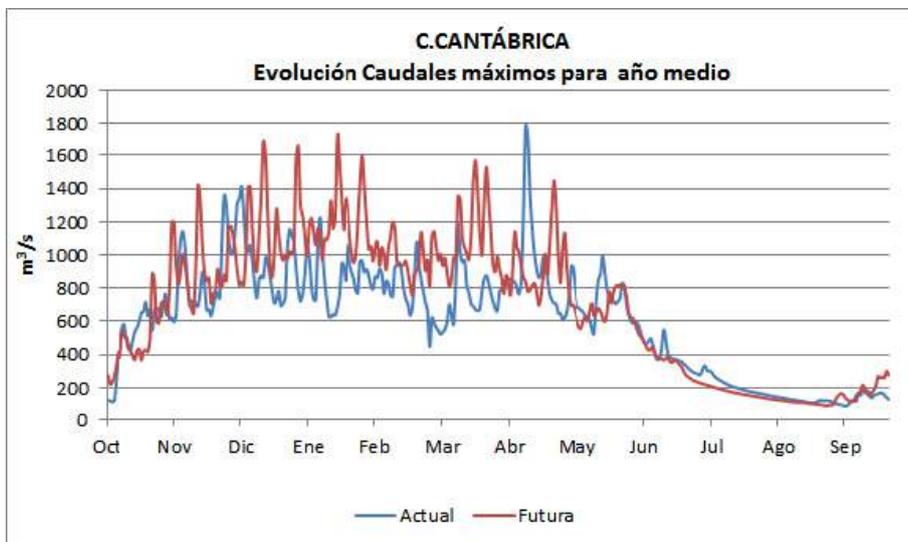


Evolución de la fusión máxima anual en C. Cantábrica

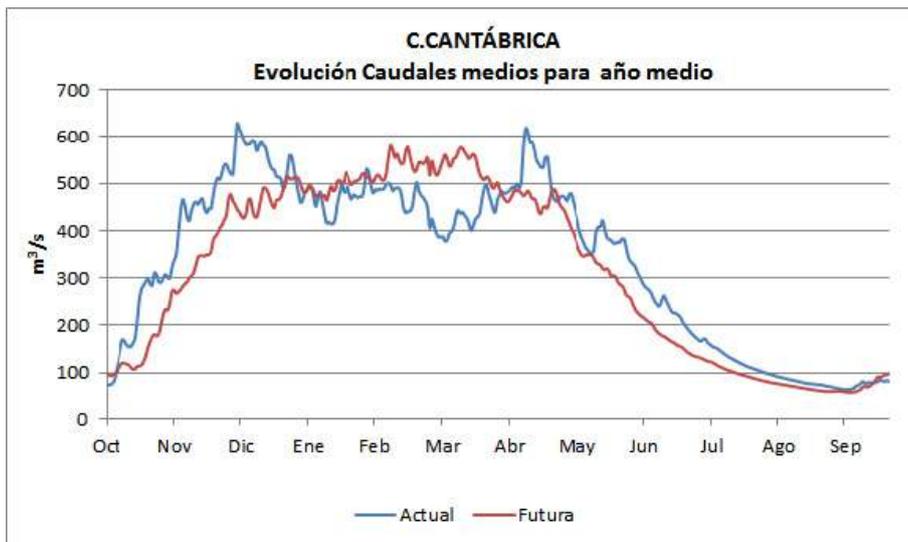


Comparativa actual y futura de la fusión media diaria en C. Cantábrica para un año medio.

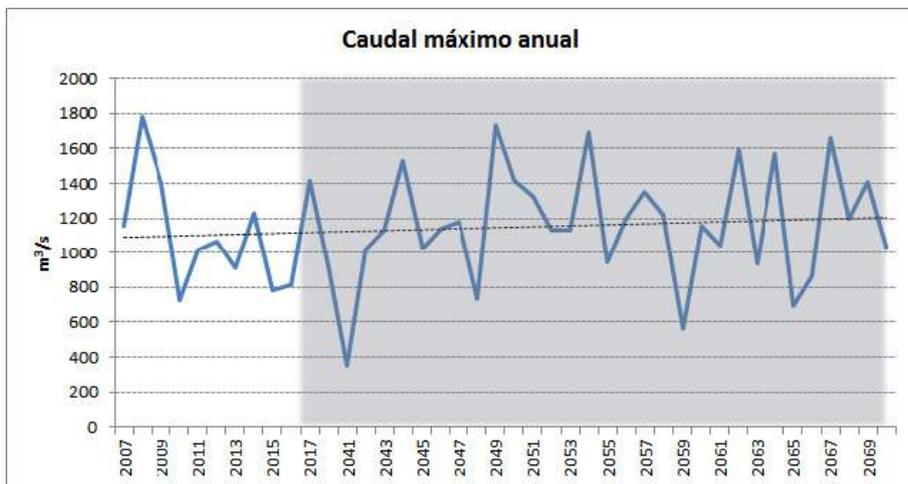
Tal y como se esperaba, las fusiones máximas aumentan entre enero y abril contribuyendo en mayor medida a los caudales máximos registrados, mientras que disminuye claramente en los meses de abril y mayo, donde en la actualidad se produce la mayor fusión lo que vuelve a poner de manifiesto el cambio en el patrón nival.



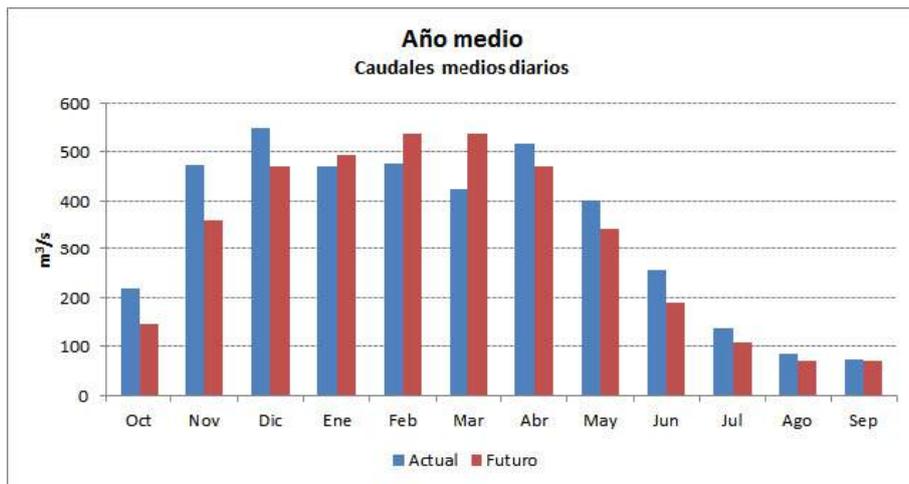
Comparativa actual y futura de los caudales máximos en C. Cantábrica para un año medio.



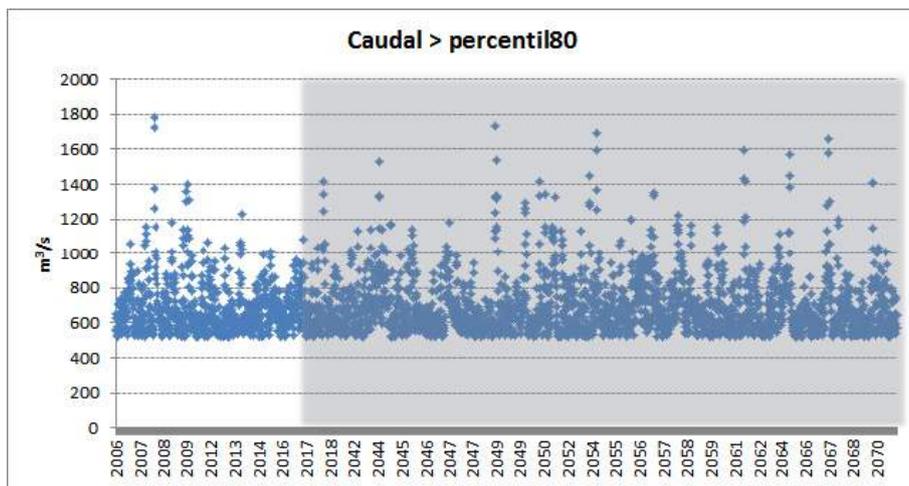
Comparativa actual y futura de los caudales medios en C. Cantábrica para un año medio.



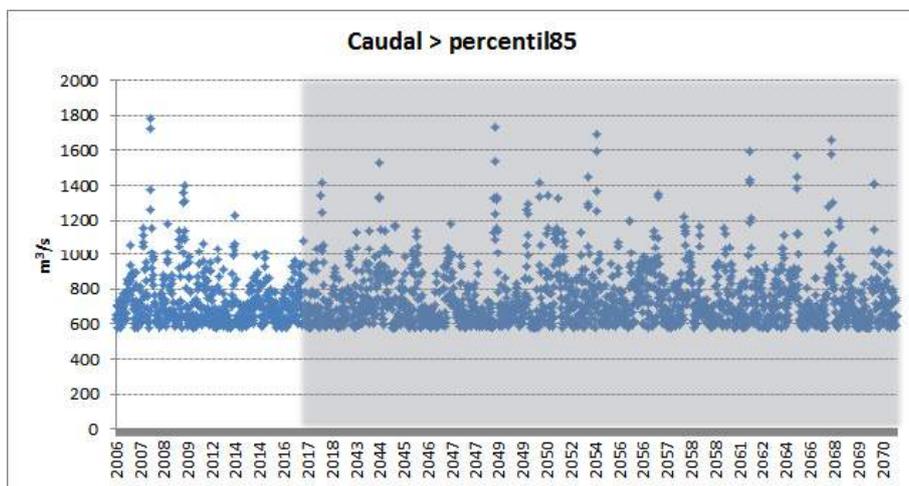
Evolución del caudal máximo anual en C. Cantábrica.



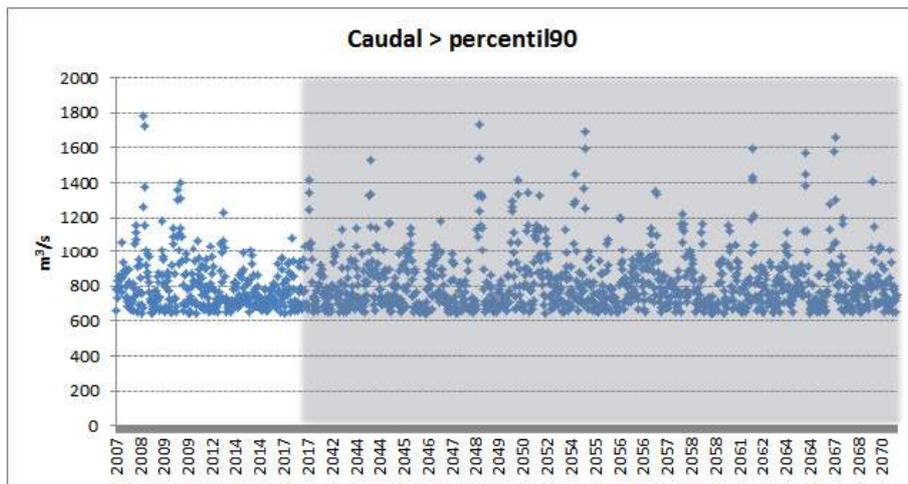
Comparativa actual y futura a nivel mensual de los caudales medios diarios en C. Cantábrica.



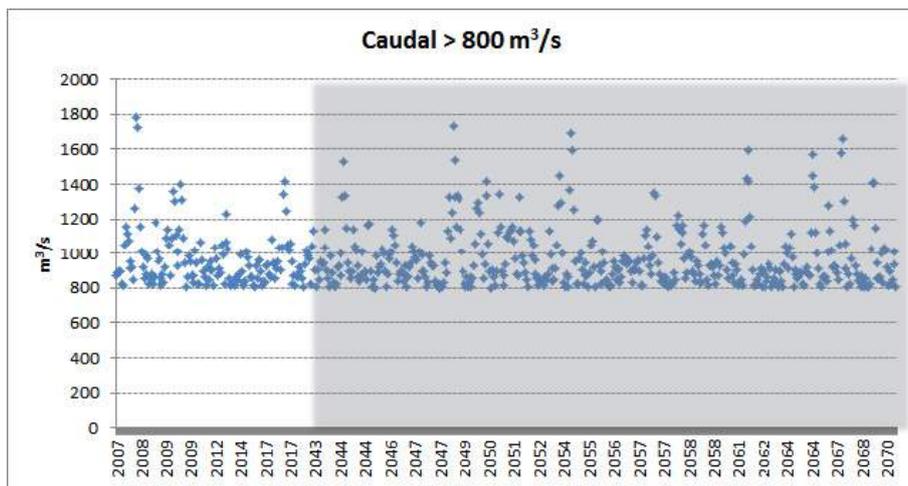
Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 80 en C. Cantábrica.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 85 en C. Cantábrica.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima del percentil 90 en C. Cantábrica.



Evolución del número de instantes con caudal diario por encima de 800 m³/s en el C. Cantábrica.

Los picos de caudales máximos aumentan significativamente en los primeros meses del año alimentados por las fusiones nivales, y pese a la leve disminución en las precipitaciones, al igual que lo hacen los caudales medios en ese periodo, pero disminuyen claramente durante el resto de año.

CUADRO RESUMEN

SISTEMA	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	CAUDALES	INFLUENCIA NIVAL EN LOS EPISODIOS DE CRECIDAS DE CAUDALES
PIRINEO	Aumento moderado en las temperaturas máximas y mucho mayor en las temperaturas medias anuales. Tendencia al alza conforme aumenta el horizonte temporal.	Fuerte aumento en las precipitaciones máximas y moderados en las precipitaciones medias anuales. Cambio en el patrón de precipitaciones disminuyendo en verano-otoño y aumentando en invierno y primavera.	Aumento moderado en los caudales máximos y ligera disminución en los caudales medios anuales. Cambio en el patrón de caudales medios, aumentando en invierno y primavera y disminuyendo en verano y otoño.	Aumento considerable entre los meses de febrero a mayo por el aumento de las fusiones máximas. Cambio en el patrón de fusión con un adelanto medio aproximado de un mes.
SIERRA NEVADA	Aumento moderado en las temperaturas máximas y mucho mayor en las temperaturas medias anuales	Fuerte aumento en las precipitaciones máximas y moderados en las precipitaciones medias anuales.	Fuerte aumento en los caudales máximos y leve disminución en los caudales medios anuales.	Importante en los primeros tres meses del año por el importante incremento de las fusiones nivales en este periodo.
SISTEMA CENTRAL	Aumento moderado en las temperaturas máximas y medias anuales.	Aumento moderado en las precipitaciones máxima y media anual. Cambios en el patrón de precipitaciones: aumentan en invierno, disminuyen en otoño.	Aumento moderado en los caudales máximos y leve en los caudales medios anuales. En invierno se ven claramente favorecidos por las fusiones tempranas que se producen. Aumento en la frecuencia de caudales por encima de los percentiles de interés.	Considerable en los tres primeros meses del año debido al fuerte aumento en las fusiones máximas durante este periodo. Cambio en el patrón de fusión, aumentando en los meses invernales y disminuyendo en primavera.
CORDILLERA CANTÁBRICA	Aumento moderado tanto en las temperaturas máximas como en las medias anuales.	Leve disminución de las precipitaciones medias y moderada disminución en las precipitaciones máximas. Aumento de las precipitaciones máximas en invierno y disminución en otoño y verano.	Ligera disminución en los caudales máximos y medios pero fuerte incremento en el número de episodios con fuertes picos de caudales.	Considerable en los tres primeros meses del año debido al fuerte aumento en las fusiones máximas durante este periodo, y pese a la disminución de las precipitaciones. Clara disminución de los recursos nivales medios y cambio en el patrón de fusión, con una menor duración del manto nival.

Tabla resumen de las principales características de temperatura, precipitación, caudales e influencia nival sobre crecidas en cada uno de los sistemas montañosos analizados.