



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

Actividad E.3.2.1 Inundaciones e impactos asociados en tramos medios y bajos de ríos mediterráneos del sur de Europa.

Informe del GT3: Desarrollo de herramientas de gestión basadas en el estudio integrado de la dinámica fluvial y costera

Due date of deliverable: 30/09/2021

Actual submission date: 30/09/2021

Lead contractor for this deliverable: UGR

Autores

Marina Cantalejo, Agustín Millares Valenzuela, María Bermúdez Pita, Leonardo Nanía Escobar, Manuel Cobos Budía, Asunción Baquerizo Azofra, Rosa María Mateos, Jorge Pedro Galve Arnedo, Juan Antonio Luque Espinar, Cristina Reyes Carmona, Oriol Monserrat

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF).



Índice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN. | 3 |
| 2 | METODOLOGÍA. | 4 |
| 2.1 | Modelos y diámetro característico del transporte por carga de fondo y suspensión. | 4 |
| 3 | TRAMO AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DEL GUADALFEO. | 6 |
| 3.1 | Selección de avenidas según las proyecciones de cambio climático. | 6 |
| 3.2 | Cambios en la hidrodinámica de las avenidas. | 8 |
| 3.3 | Cambios en la tasa de transporte de sedimento. | 11 |
| 4 | EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LAMINACIÓN DE AVENIDAS EN LA PRESA DE RULES SEGÚN PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO. | 13 |
| 4.1 | Escenario de gestión. | 14 |
| 4.2 | Probabilidad de alcanzar la capacidad límite del embalse, bajo hipótesis de cambio climático. | 16 |
| 5 | PROPUESTAS DE ACTUACIONES DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN. | 20 |
| 6 | REFERENCIAS. | 22 |

1 INTRODUCCIÓN.

Los sistemas fluviales mediterráneos se caracterizan por su régimen de caudales estacional, directamente influenciado por la alta variabilidad de los patrones meteorológicos. (Pérez, 2016). Las proyecciones climáticas futuras apuntan a una intensificación de este comportamiento estacional, siendo cada vez más frecuente la aparición de eventos extremos y periodos de estiaje prolongados (IPCC, 2007). Con ello, aumenta el riesgo por inundación, y a la vez, por escasez de recursos hídricos (Ludwing, 2011). En este sentido, las presas realizan una labor clave como elementos reguladores del caudal, consiguiendo laminar el pico de las avenidas y garantizar el abastecimiento durante la época estival. Por otro lado, los embalses sufren procesos de colmatación, derivados de la dinámica erosiva y de transporte fluvial, que afectan a la capacidad laminadora y de almacenamiento. (Millares, 2018). Esta interrupción de la dinámica natural del curso fluvial también conlleva repercusiones que afectan gravemente a la morfología del sistema costero, al depender estrechamente de las aportaciones procedentes de la cuenca.

El estudio de la cuenca del río Guadalfeo viene motivado por los retos de gestión que plantea la cuenca actualmente y el impacto previsible en la variación del régimen de caudales, tras considerar las proyecciones de los MGC-RCM para varios escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5). Actualmente, se han constatado una pérdida de capacidad del embalse asociada a eventos de alta intensidad, de hasta 1,8 hm³ en la cola del embalse (Millares, 2018). En circunstancias naturales, dicho sedimento se redistribuye a lo largo del cauce, y termina alimentando al sistema costero. El cese de aportaciones fluviales a la costa ha repercutido en un retroceso del delta del Guadalfeo de hasta 214 m², desde la puesta en funcionamiento de la presa en 2004 (Bergillos, 2016).

Como objetivo, este entregable se centra en analizar los cambios previstos en el régimen hidráulico y en el transporte de sedimento en el tramo alto - medio del río Guadalfeo, considerando condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático.

En concreto, la zona del río a analizar se extiende desde el dique del Granadino hasta la cola del embalse de Rules. Además, se analizará la repercusión del cambio de régimen de aportaciones en el periodo (2085 – 2100), en la evolución del estado de almacenamiento del embalse, atendiendo principalmente a la capacidad para laminar avenidas al considerar el efecto de la colmatación en el embalse.

2 METODOLOGÍA.

La metodología seguida para abordar el presente entregable se divide en los siguientes puntos:

Partiendo del régimen de caudales obtenidos por el modelo físico-distribuido de WiMMed (Herrero, 2014) bajo escenarios de cambio climático (Actividad E3.1.1), se seleccionan aquellas proyecciones que presenten una probabilidad de excedencia de caudales $> 50 \text{ m}^3/\text{s}$ superior al observado en el periodo de referencia (1999 – 2014).

Seleccionadas las avenidas más extremas del conjunto de MGC-RCM analizado, se estudian los cambios hidrodinámicos y morfológicos frente al comportamiento observado de la avenida más significativa del periodo (1999 - 2014), el evento de diciembre del 2009. Para ello, se emplea el software de modelización hidrodinámica 2D IBER, que cuenta con un módulo de transporte de sedimento por carga de fondo y suspensión, que permite tener en cuenta los cambios morfológicos en el cauce. La justificación de los parámetros seleccionados para la modelización del transporte de sedimento se lleva a cabo en el apartado 2.1.

Los cambios previsibles en la llanura de inundación y en la tasa de transporte de sedimento, conducen a una lista de propuestas y medidas correctoras para este tramo del cauce.

A parte, las proyecciones de caudal derivadas del modelo WiMMed en condiciones de cambio climático, aportan información sobre el impacto en la evolución del estado de almacenamiento de la presa y de la probabilidad de fallo de su funcionamiento. Para ello, se considera un patrón del caudal desaguado basado en el volumen de agua embalsada, según lo observado en el registro histórico.

2.1 Modelos y diámetro característico del transporte por carga de fondo y suspensión.

La formulación empleada en la caracterización del transporte por carga de fondo corresponde a Meyer-Peter & Müller (1948), y el transporte por carga en suspensión, se calcula a través de la fórmula de Van Rijn (1987). A continuación, se detallan y justifican los parámetros especificados en el cálculo de tasa de transporte fluvial.

El diámetro de sedimento (d_{50}) empleado en cada caso, es el resultado de analizar las curvas granulométricas de ladera y substrato de las muestras obtenidas en el tramo de río considerado.

A partir de los datos obtenidos por 390 muestras recogidas en el tramo aguas arriba y abajo de la presa de Rules, se obtienen las curvas granulométricas que permiten caracterizar el diámetro de sedimento asociado al transporte por carga de fondo y en suspensión en la zona de estudio.

Analizando en detalle los resultados mostrados en la siguiente figura, estos apuntan a que el lecho del río, en la parte alta de la cuenca, se encuentra acorazado. La curva granulométrica del sustrato (capa superficial) muestra una composición de material más grueso y heterogéneo que la del sustrato. (Bermúdez et al, 2020). Cuando se producen avenidas intensas y se moviliza la capa superficial, el material situado en el sustrato es el que se transporta en mayores cantidades, y por tanto el empleado como representativo para el transporte de fondo.

En el caso del transporte en suspensión, se caracteriza a partir la curva granulométrica las laderas situadas en la cuenca de cabecera.

Tabla 1_ Diámetro d50 (m) característico de la fracción de sedimento asociado al transporte por carga de fondo o carga en suspensión.

| Tipo de movimiento del sedimento | d50 [m] |
|---|----------------|
| Transporte por carga de fondo | 0.02 |
| Transporte por carga en suspensión | 0.0001 |

3 TRAMO AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DEL GUADALFEO.

La modelización hidrodinámica de los eventos más extremos asociados a este tramo del río se lleva a cabo a partir del caudal de salida de la cuenca de cabecera del río Guadalfeo, obtenido mediante el modelo físico distribuido WiMMed (Herrero et al, 2014). Se han simulado las condiciones meteorológicas de un periodo actual (1999-2014) y se han comparado con los resultados de las proyecciones climáticas MGC-RCM a futuro.

3.1 Selección de avenidas según las proyecciones de cambio climático.

Comparando el régimen de caudales observados durante el periodo de referencia (1999 - 2014), con los caudales simulados por diferentes proyecciones climáticas MGC-RCM (2085 - 2100), seleccionamos aquellos modelos climáticos que aporten previsiones más severas en la ocurrencia de avenidas. La siguiente figura muestra, para los escenarios climáticos analizados, un aumento de la probabilidad de ocurrencia de caudales superiores a 50 m³/s, para los siguientes modelos climáticos (SMHI-CNRM, SMHI-NCC, DMI-ICHEC, SMHI-MPI), frente al caudal observado en el registro histórico (azul).

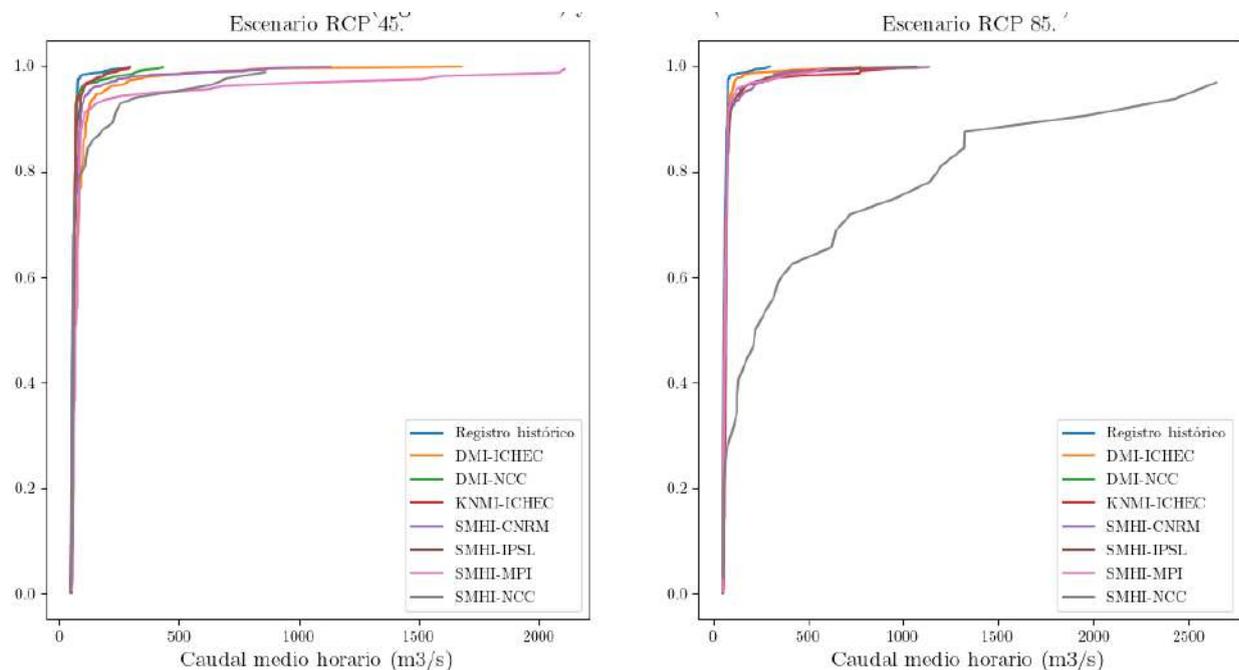


Figura 1_ ECDF del caudal horario > 50 m³/s, simulado para el registro histórico (1999 - 2014) y simulado bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 (2085 - 2100).

Partiendo de dichos modelos, seleccionamos para cada uno de los escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP8.5), las dos avenidas más extremas. Su comportamiento hidrodinámico y transporte fluvial será comparado con el evento del 2009 (el más significativo del periodo de referencia, con un caudal punta de 297 m³/s), para determinar el impacto de los cambios morfológicos en el río y su repercusión en la llanura de inundación en eventos extremos.

Los modelos seleccionados para evaluar el impacto de los eventos más extremos bajo diferentes escenarios de cambio climático corresponden a:

- **Escenario RCP4.5:** Modelo SMHI-MPI-M-MPI-ESM-LR.

| Duración tormenta | Caudal pico | Fecha | |
|-------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 14 horas | 2108 m ³ /s | 2091-09-06 01:00:00 | 2091-09-06 15:00:00 |

- **Escenario RCP8.5:** Modelo SMHI-NCC-NormESM1-M.

| Duración tormenta | Caudal pico | Fecha | |
|-------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 21 horas | 2648 m ³ /s | 2099-05-21 21:00:00 | 2099-05-22 18:00:00 |

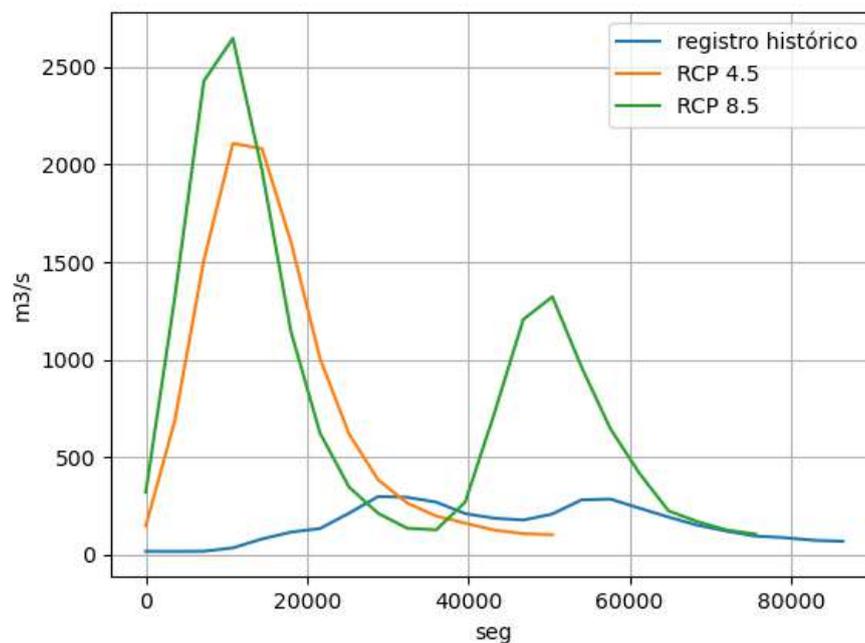


Figura 2_Hidrogramas de las avenidas modelizadas en IBER.

3.2 Cambios en la hidrodinámica de las avenidas.

En este apartado se muestran los resultados de la modelización hidrodinámica 2D en IBER, analizando las repercusiones más importantes en la llanura de inundación.

Se detectan las localizaciones del municipio de Órgiva más susceptibles a sufrir daños por inundación, además de problemas de erosión en los márgenes del río. Se corresponden con la urbanización de Tablones y las casas situadas al sur del municipio de Órgiva, colindantes al río. En la figura 4, quedan marcadas las secciones donde se analizarán los perfiles de calado máximo y erosión tras el paso de la avenida.



Figura 3 Localización de los perfiles transversales analizados.

Los cambios sufridos en la hidrodinámica de las avenidas asociadas, reflejan que la probabilidad de alcanzar calados superiores a 2 m aumenta de un 0.2% a un 1.3% para el escenario RCP 4.5 y en un 1.5% para el escenarios RCP 8.5, incrementándose las probabilidades de inundación las zonas aledañas al cauce.

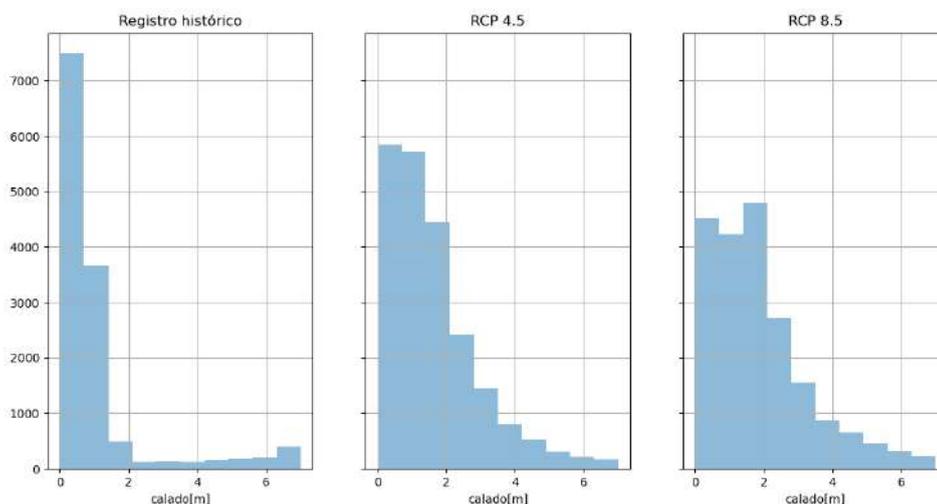


Figura 4 histograma de calados máximos asociadas a las avenidas más extremas de cada escenario.

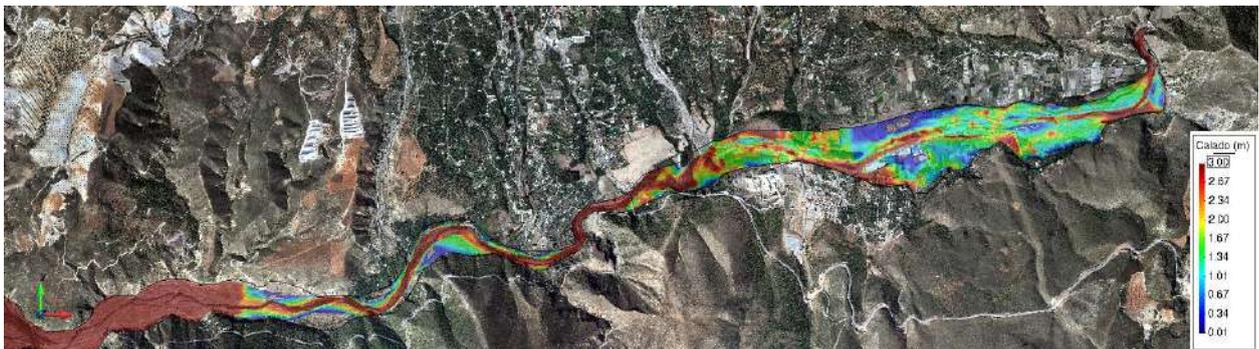
- **Llanura de inundación. Evento 2009-2010.**



- **Llanura de inundación. RCP 4.5.**



- **Llanura de inundación. RCP 8.5.**



(En el entregable E.3.2.2, se aporta la cartografía en formato A3, relativa al calado máximo producido por la avenida y al proceso de erosión -sedimentación sufrido en el tramo analizado).

En las secciones señaladas, el calado máximo alcanzado por las avenidas del RCP 4.5 y RCP 8.5 es bastante parecido según los perfiles que se han estudiado, de manera que las afecciones son similares. Como excepción, en la sección nº3, se aprecia una diferencia de hasta 2 m de calado entre avenidas y donde si será previsible que la zona afectada por la avenida del RCP8.5 sea mayor.

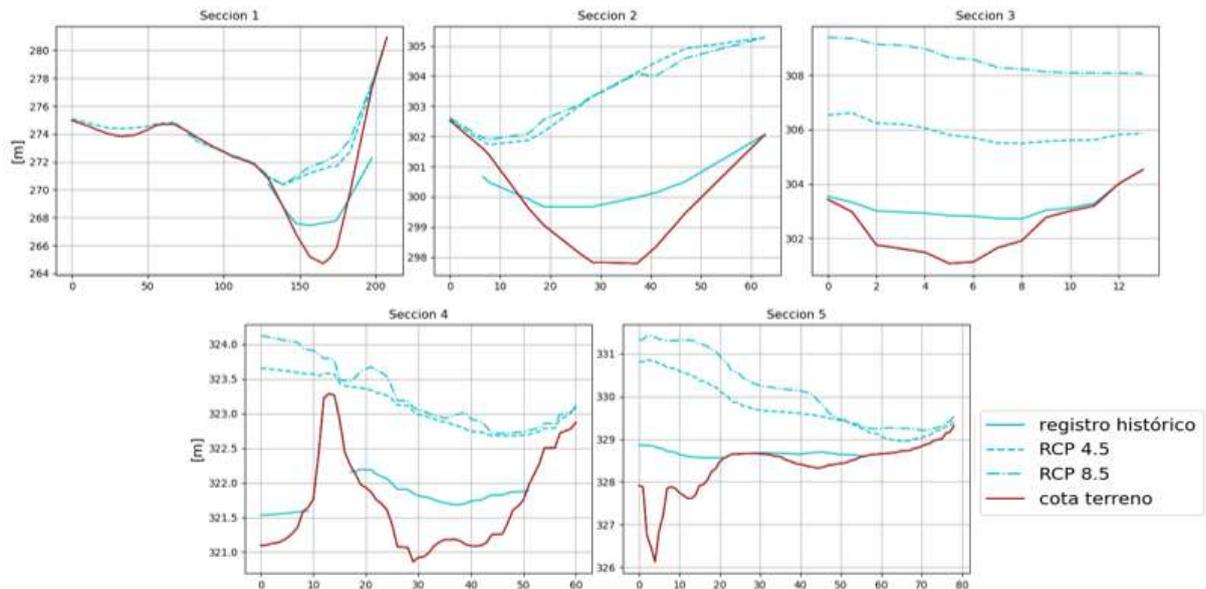


Figura 5_ Cambios en la llanura de inundación de la máxima avenida observada en el periodo de referencia y en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.

3.3 Cambios en la tasa de transporte de sedimento.

En este apartado, se muestran los resultados de la modelización hidrodinámica 2D en IBER, haciendo hincapié en la tasa de transporte de sedimento asociada a cada avenida y analizando el cambio morfológico a lo largo del cauce.

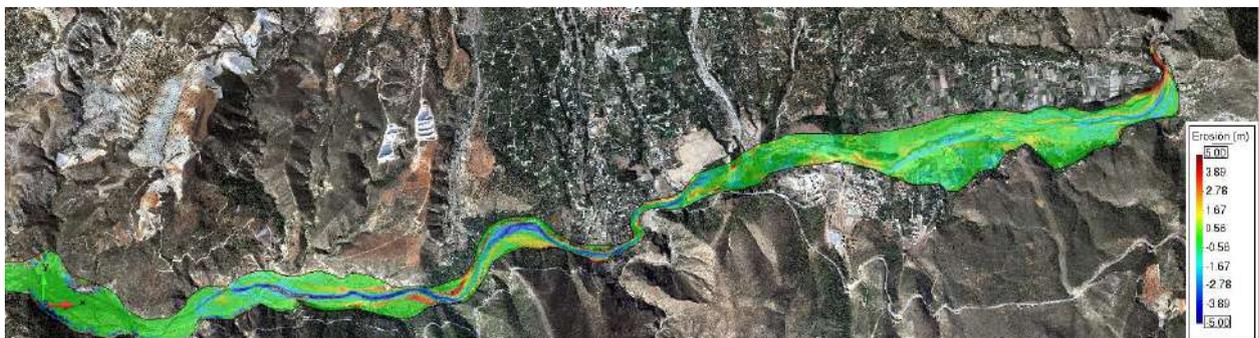
- **Cambios en la morfología del tramo superior. Evento 2009-2010.**



- **Cambios en la morfología del tramo superior. RCP 4.5.**



- **Cambios en la morfología del tramo superior. RCP 8.5.**



(En el entregable E.3.2.2, se aporta la cartografía en formato A3 relativa al calado máximo producido por la avenida y al proceso de erosión -sedimentación sufrido en el tramo analizado).

Los cambios morfodinámicos más importantes del lecho tienen lugar aguas abajo del tramo analizado, donde se puede apreciar zonas de sedimentación en la parte central del lecho, y una importante erosión en los márgenes del río.

Esto se traduce en una tasa de transporte asociada a carga de fondo, que aumenta en 1,94 veces para el evento del RCP4.5 y un 2,3 veces para el evento del RCP 8.5.

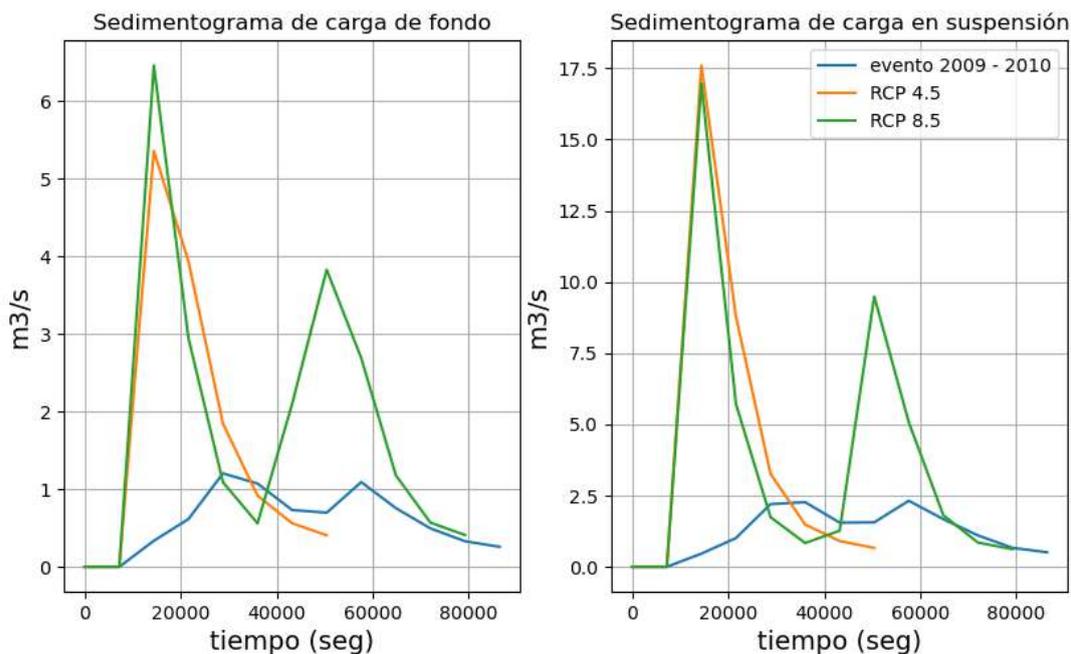


Figura 6_ Comparación de sedimentograma del evento de diciembre del 2009, con las avenidas más extremas correspondientes a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. A izquierda: Sedimentograma de carga de fondo. A derecha: Sedimentograma de carga en suspensión.

Tabla 2_ Volumen en m3 de carga de fondo y carga en suspensión, movilizado por cada evento hacia la cola de Rules.

| | Evento dic 2009 (24 h) | RCP 4.5 (14 h) | RCP 8.5 (21 h) |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Carga de fondo (m3) | 54.648 | 93.826 | 157.248 |
| Carga en suspensión (m3) | 110.330 | 235.400 | 319.463 |

4 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LAMINACIÓN DE AVENIDAS EN LA PRESA DE RULES SEGÚN PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.

Los datos procedentes de la red SAIH proporcionan información sobre el estado de almacenamiento del embalse de Rules (de 2006 a 2021), el caudal observado instantáneo en Órgiva (2005 – 2016).

A través de los caudales observados de entrada a la presa en Órgiva (2005-2016) y el volumen medio embalsado (2006 – 2021), se realiza una estimación del volumen de agua desaguado medio diario por la presa (2006 – 2016), teniendo en cuenta que las aportaciones procedentes de la presa de Béznar serán consideradas equivalentes al caudal ecológico. Si se estima un caudal de salida del embalse de Rules inferior al ecológico, se considerará este último, atendiendo a la distribución temporal propuesta por “Establecimiento del régimen de caudales ecológicos en las masas de agua superficiales de la DHCMA”.

Tabla 3-Propuesta distribución temporal de caudales mínimos (Estudio del régimen caudales ecológicos en ríos)

| m3/s | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Media |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| (Béznar) río Ízbor | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,24 | 0,25 | 0,23 | 0,16 | 0,13 | 0,16 | 0,2 | 0,23 | 0,25 | 0,22 |
| (Rules) Guadalfeo | 0,78 | 0,78 | 0,77 | 0,78 | 0,9 | 0,82 | 0,46 | 0,3 | 0,31 | 0,52 | 0,7 | 0,8 | 0,66 |

Estimamos el caudal medio diario a la salida del embalse de Rules como:

$$Q_{\text{desembalsado estimado}} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{(Q_{\text{observado Órgiva}} + Q_{\text{ecológico Béznar}}) \times 3600 \times 24 - (\Delta \text{Volumen embalse medio diario})}{3600 \times 24 \text{ (seg)}}$$

Comparando la evolución del estado de almacenamiento de la presa Rules (observaciones de la red HidroSur) y la evolución de dicho almacenamiento considerando el caudal de observado en Órgiva y el caudal desembalsado estimado, se aprecia una incoherencia entre ambas señales durante los años 2010 y 2012. Dicha incoherencia puede deberse a diferentes factores, destacando:

- Una infraestimación del caudal de entrada a la presa debido a los aportes que se producen entre en punto de observación (Órgiva) y la cola del embalse de Rules, distanciados en X (m).
- De igual manera, la falta de información del caudal desaguado por la presa de Béznar y los aportes que se producen en el tramo final del río Ízbor antes de llegar a la presa de Rules.
- Déficit en la resolución de la información medida o errores en los registros.

Debido a la insuficiencia de datos para realizar mejores estimaciones en el caudal desaguado, crearemos una curva de gasto que relacione el caudal desaguado estimado con el estado de almacenamiento del embalse, con objeto de reflejar la política de gestión de la presa hasta la fecha. De esta manera generamos un escenario de gestión, que será aplicado en condiciones de cambio climático, para comparar los cambios e impactos que se esperan en el ciclo anual de llenado de la presa de aquí a finales de siglo.

4.1 Escenario de gestión.

Basándonos en los datos de caudal de salida de la presa estimados, se representa una curva de gasto que servirá como patrón de gestión del caudal a desaguar por la presa, atendiendo solo al estado de almacenamiento.

En la siguiente figura se representa la curva de gasto y la evolución del estado de almacenamiento del embalse según el patrón de gestión definido por la curva de gasto. Cabe destacar la incoherencia entre el volumen almacenado observado (SAIH Hidrosur) y el generado por el patrón de gestión, antes del evento del 2009, cuando la presa se encontraba en fase de llenado desde su puesta en funcionamiento en 2004.

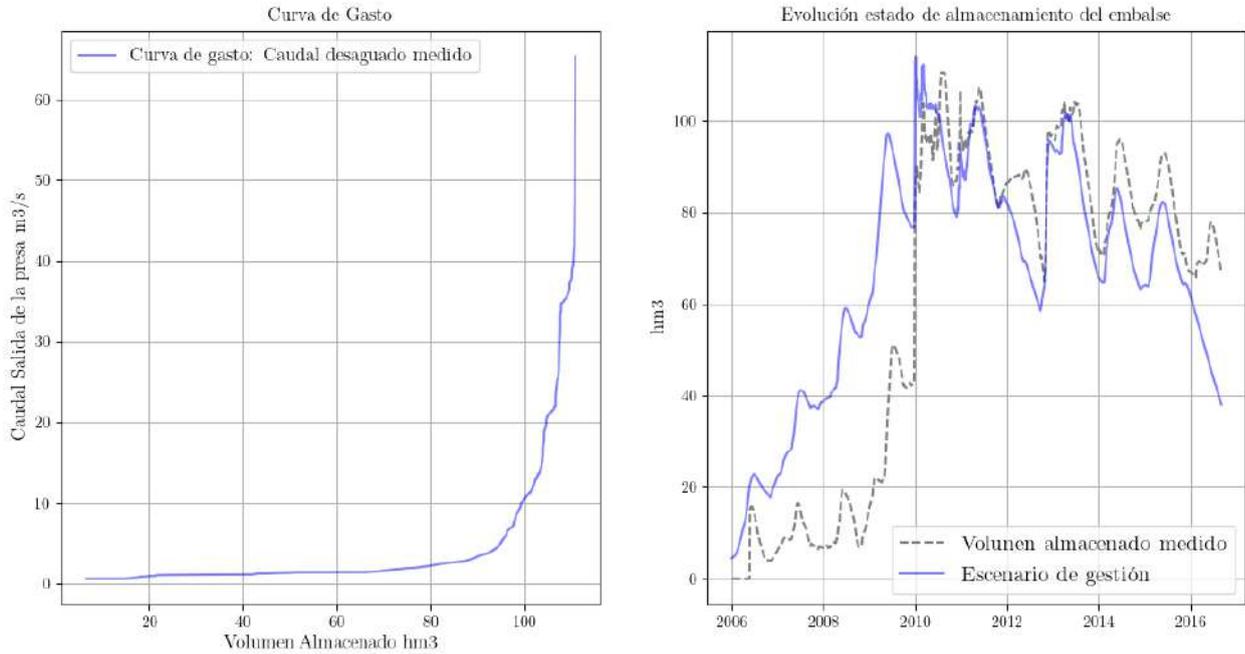


Figura 7_ A la izquierda: Curva de gasto que relaciona el volumen de agua embalsada (hm³) con el caudal desaguado por la presa(m³/s), según el patrón del registro histórico. A la derecha: Evolución del estado de almacenamiento del embalse aplicando la curva de gasto para simular el caudal desaguado por la presa dado un nivel del embalse (derecha).

Esto se debe a que la curva de gasto relaciona un estado de almacenamiento con un caudal desaguado, cuando en realidad, durante la vida de la presa, se producen diferentes patrones de desagües para un mismo nivel. Esto es apreciable, sobre todo, durante la fase de llenado, ya que la curva de gasto no refleja que en realidad el caudal de salida de la presa fue superior. En la siguiente figura se puede apreciar como el caudal desaguado estimado es superior entre los años 2006 – 2009, al desaguado según la curva de gasto.

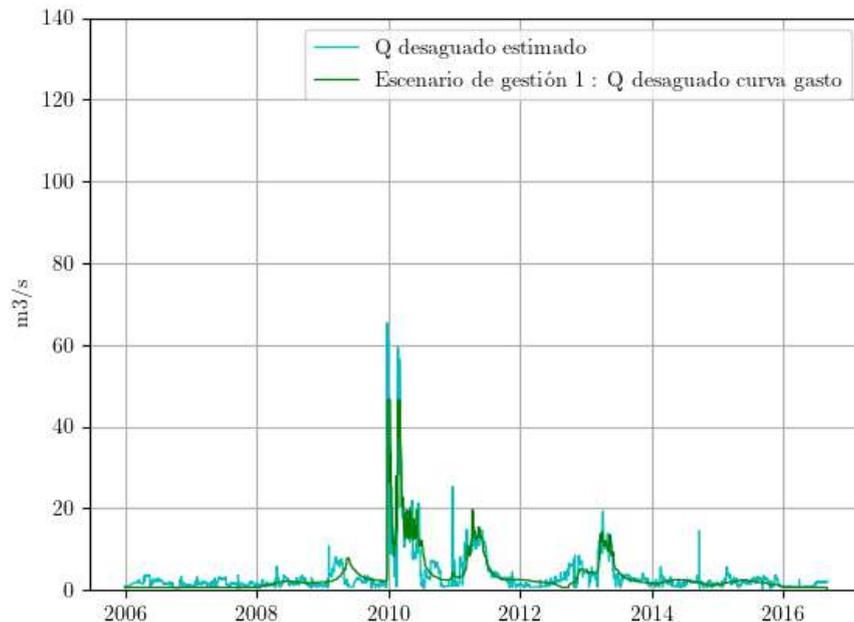


Figura 8_Comparación: Caudal desaguado estimado vs caudal desaguado por el escenario de gestión.

A partir del 2009, el estado del embalse y el pronóstico del almacenamiento según la curva de gestión es similar, justificándose de esta manera su uso para evaluar los cambios previsibles en el estado de almacenamiento de la presa en un futuro.

4.2 Probabilidad de alcanzar la capacidad límite del embalse, bajo hipótesis de cambio climático.

Para evaluar la probabilidad de que la presa alcance el límite de su capacidad, (110.6 hm³ ~ 99%), aplicamos el siguiente balance de masas.

$$\text{Volumen almacenado} \left(\frac{\text{Hm}^3}{d} \right) = (\text{Caudal órgiva} - \text{Caudal desembalsado}) \text{m}^3/\text{s} * 3600 * 24$$

El Caudal en Órgiva se define como:

- Caudal observado en Órgiva (2005 - 2016) en condiciones actuales
- Caudal simulado en Órgiva (2085 - 2100) con WiMMed. Para las diferentes combinaciones de MGC-RCM de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. El caudal desembalsado, corresponde al patrón diseñado en el apartado “escenario de gestión”.

Se ha considerado al inicio de la simulación, un volumen de agua embalsada correspondiente a 51 hm³ (50 % de la capacidad del embalse). Los resultados obtenidos sobre la evolución del estado de almacenamiento sirven para caracterizar la probabilidad de exceder la máxima capacidad del embalse (99% de su capacidad 110.6 hm³), en condiciones normales y bajo los escenarios de cambio climático.

Para tener en consideración el proceso de colmatación de la presa de Rules, (Millares et al, 2018), se estima una aportación de sedimento de 20t/(ha*año), conllevando una disminución de la capacidad del embalse de 50 hm³ para finales de siglo.

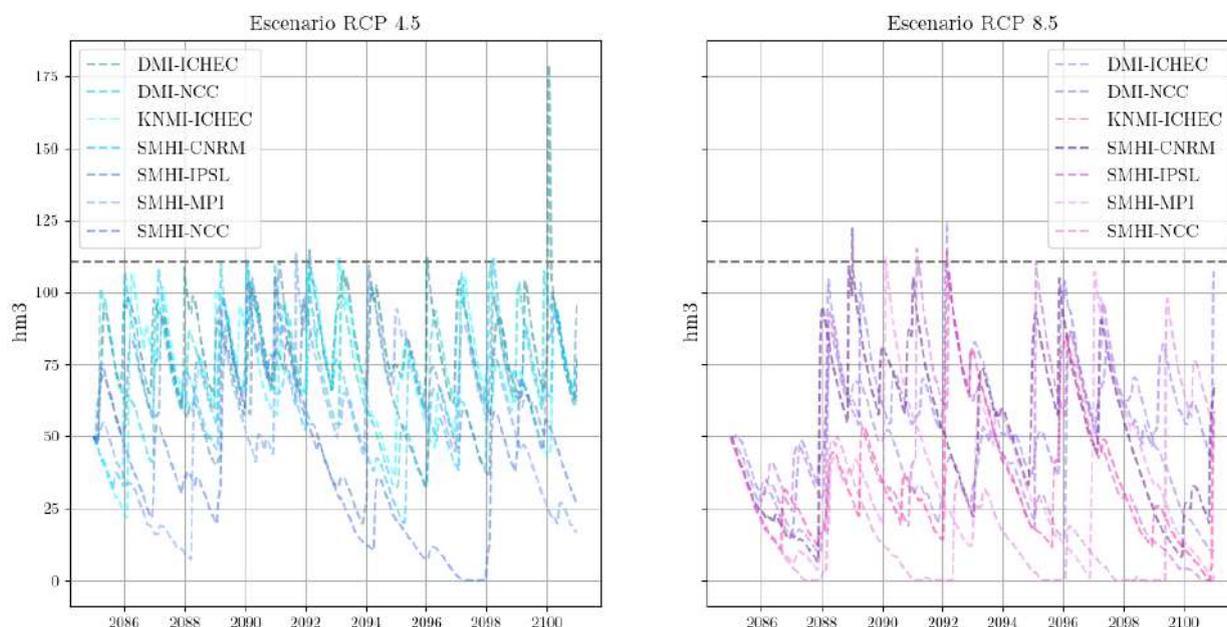


Figura 9_Evolución del estado de almacenamiento del embalse de Rules, considerando el escenario de gestión.

En la siguiente figura se muestran las distribuciones empíricas de la evolución del volumen embalsado, para cualquiera de los modelos y escenarios analizados. En rojo, el comportamiento observado según los datos del registro SAIH-HidroSur.

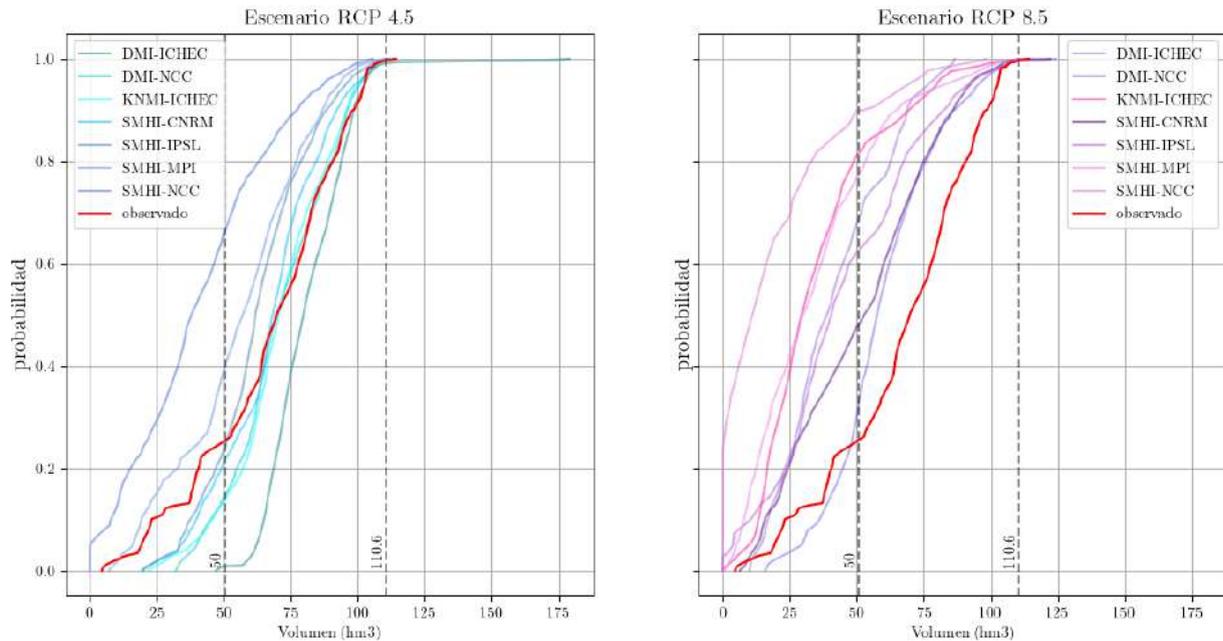


Figura 10_ECDF del estado de almacenamiento del embalse (hm³). En rojo: Observaciones de la red SAIH. A izquierda: Los resultados del estado de almacenamiento para diferentes modelos climáticos según el escenario climático RCP 4.5. A derecha: análogamente, con el escenario climático RCP 8.5.

Tabla 4_Probabilidad de exceder la capacidad límite del embalse actual (110,6) o tras sufrir proceso de colmatación (50 hm³) en condiciones actuales (2005 - 2017) y bajo escenario de cambio climático (2085-2100),

| Capacidad Límite | Periodo actual (2005 - 2017) | RCP 4.5 (2085 – 2100) | RCP 8.5 (2085-2100) |
|--|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Actual: 110,60 hm ³ | 0,225% | (0,017% – 0,8%) Media: 0,2% | (0,017% – 0,302%) Media: 0,15% |
| Tras proceso de colmatación: 50 hm ³ | 72% | (34% – 99,1%) Media: 74,4% | (10% – 69%) Media: 39 % |

Los resultados muestran que, teniendo en cuenta la incertidumbre de los modelos para cada RCP's analizado, la tendencia media apunta que la probabilidad de exceder la capacidad máxima actual del embalse (110.6 hm³), es parecida a la actual (RCP 4.5) o menor (RCP 8.5). En la tabla, pueden observarse que la probabilidad más desfavorable implicaría un aumento del 0,6% (para el RCP 4.5) y o del el 0,1% (RCP 8.5). Sin embargo, teniendo en cuenta el proceso de colmatación que tiene lugar en la cola del embalse, la probabilidad de superar la capacidad límite

del embalse futura (50 hm³), aumenta significativamente. Los modelos apuntan a un rango que varía entre 34 y 99% para el RCP 4.5 (74% de media) y del 10% al 69% (39% de media) para el RCP 8.5.

En general, los modelos climáticos demuestran que, para la zona de estudio, las aportaciones en ambos escenarios de CC van a ser mucho más escasas que las actuales. El volumen de agua embalsada por debajo de los 25 hm³ alcanza una probabilidad de ocurrencia del 29% (RCP 4.5) y del 69% (RCP 8.5), lo que contrasta con el 10% del periodo actual. Ni los cambios en la dinámica de la nieve, ni el aumento de la frecuencia y severidad de las avenidas, empeoran la capacidad de la laminación de la presa. Los resultados aportados por los modelos DMI-ICHEC (RCP 4.5) y SMHI-CNRM (RCP 8.5), son los únicos que mostrarían un aumento, no muy significativo, de la probabilidad de fallo. Estas conclusiones dependen mucho del proceso de colmatación que sufra la presa, cuyo estudio no ha sido realizado en detalle en este entregable.

5 PROPUESTAS DE ACTUACIONES DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN.

Partiendo del análisis de los cambios previsibles en el comportamiento hidrodinámico y de transporte de las avenidas más extremas, se han detectado las localizaciones dentro del tramo de cauce fluvial analizado que pueden verse más afectadas.

Las medidas de adaptación y mitigación planteadas seguirán las directrices del Plan PIMA Adapta-AGUA, enmarcado dentro de las estrategias planteadas por el Plan Nacional de Cambio Climático (PNACC) y las líneas estratégicas del Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC), dentro del Anejo10 “Programa de medidas”.

- Medidas para la mejora del régimen de caudales:
 - Medidas de gestión para el establecimiento de caudales ecológicos.
 - Modificación de la estructura de regulación – órganos de desagüe- para la mejora del régimen de caudales.
 - Modificación en la gestión de las operaciones en las estructuras (esclusas y compuertas).
- Medidas de prevención de inundaciones:
 - Ordenación territorial: limitaciones a los usos del suelo en la zona inundable.
 - Reordenación de los usos del suelo en las zonas inundables haciéndolos compatibles con las inundaciones. (relocalización o retirada de actividades/instalaciones vulnerables)
 - Reducción de la vulnerabilidad de los bienes afectados e incremento de la resiliencia: medidas para adaptar elementos situados en zonas inundables reduciendo las consecuencias adversas en episodios de inundaciones sobre edificios, viviendas y redes.
 - Elaboración de estudios de mejora del conocimiento del riesgo de inundación: leyes de frecuencia de caudales, efecto del cambio climático, modelización de los riesgos por inundación y su evaluación.
- Medidas de protección frente a inundaciones:
 - Restauración hidrológico-forestal, ordenaciones agro-hidrológicas, incluyendo medidas de retención natural del agua.
 - Restauración fluvial: Incluyendo medidas de retención natural del agua, reforestación de riberas.

- Medidas estructurales para regular caudales, tales como la construcción / modificación de presas exclusivamente para defensa de avenidas.
- Mejora en la continuidad longitudinal de las características morfológicas del cauce.
 - Medidas de mejora del flujo de sedimentos en el entorno fluvial (by-pass, adecuación de órganos de desagüe, limpieza, estudios ...).
 - Actuación en presa/azud o en el remanso generado para la mejor de las condiciones morfológicas o ecológicas del cauce.
- Medidas para la mejora de la estructura del lecho y de las riberas y orillas de ríos.
 - Mejora de la morfología del río para facilitar el desarrollo de vegetación de ribera.
 - Medidas para conectar el río con su llanura de inundación: retranqueo de motas y obras de defensa frente a inundaciones.
 - Recuperación y mejora de la estructura del lecho fluvial.

6 REFERENCIAS.

Aguilar, C., Herrero, J., Millares, A., Losada, M. A., Polo, M. J. (2014). Meteomap: Generation of meteorological variables for distributed physically-based hydrological modeling. CUNY Academic Works.

Barra, A., Monserrat, O., Solari, L., Herrera, G., Lopez, C., Onori, R., Reichenbach, P., González-Alonso, E., Mateos, R.M., Bianchini, S., et al. (2018). The safety project: Sentinel-1 for the management of geological risk. In Proceedings of the WIT Transactions on Engineering Sciences

Bergillos, R. J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., and Losada, M. A. (2016). Impact of river regulation on a Mediterranean delta: assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research*, 52(7):5132-5148.

Bermúdez, M., Millares, A., Lira, A., Baquerizo, A. (2020). Towards sustainable sediment management strategies in Mediterranean reservoirs: Insights from the Guadalfeo semiarid river basin. *River Flow 2020*, 2294-2299.

Buishand, T.A. (1977). Stochastic modelling of daily rainfall sequences. *Mededlingen Land-bouwhogeschool Wageningen*, 45-49

Egüen, M., Aguilar, C., Polo, M. J., Moreno, I., Herrero, J., Millares, A., & Losada, M. A. (2009). WiMMed, a distributed physically-based watershed model (II): Application examples. *Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions*, 229-232.

Elliot, W.J., Liebenow, A.M., Laflen, J.M., Kohl K.D. (1989). A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987; 88.' NSERL Report No. 3. (The Ohio State University/USDA-Agricultural Research Service: West Lafayette, IN)

Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., Lane, L.J., Risse, L.M., Finkner, S.C. (1995). Hillslope erosion component, chap 11. D.C. Flanagan, M.A. Nearing (Eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Hillslope profile and watershed Model Documentation*, NSERL Report no. 10, West Lafayette, Indiana (1995), pp. 11-1-11-12

Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Egüen, M., Carpintero, M., Polo, M., Losada, M. A. (2010). *WiMMed. User Manual v1.1*. University of Granada, Granada.

Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Egüen, M., Losada, M.A., Polo, M.J., 2014. Coupling spatial and time scales in the hydrological modelling of Mediterranean regions: *WiMMed*. CUNY Academic Works. http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/315.

Herrero, J., Polo, M. J., Moñino, A., & M. Losada. (2009). An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* 371(1), 98–107.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Millares, A., Moñino, A. (2020). Hydro-meteorological drivers influencing suspended sediment transport and yield in a semi-arid mountainous basin. *Earth Surf. Process. Landforms*,45: 3791–3807

Millares, A., Herrero, H., Bermúdez, M., Leiva, J.F., Cantalejo, M. (2020). Long-term modeling of soil loss and fluvial transport processes in a mountainous semi-arid basin, southern Spain. *River Flow 2020 - Twentieth International Conference on Fluvial Hydraulic*, Delf, Netherlands.

Millares, A., Díez-Minguito, M., Moñino, A. (2019). Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. *Environmental Modelling & Software*, 111, 61-71.

Millares, A., Moñino, A. (2018). Sediment yield and transport process assessment from reservoir monitoring in a semi-arid mountainous river. *Hydrological Processes* 32(19), 2990–3005.

Millares, A., Moñino, A., Arjona, S., Baquerizo, A. (2018). Suspended sediment dynamics by event typology and its siltation effects in a semi-arid snowmelt-driven basin. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 40, p. 04008). EDP Sciences

Millares, A., Gulliver, Z., and Polo, M. (2012). Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically-based hydrological model. *Geomorphology*, 153-154:115-126.

Millares, A., Polo, M., Moñino, A., Herrero, J., and Losada, M. (2014a). Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology*, 206(0):330-342.

Millares, A., M. Polo, A. Monino, J. Herrero, and M. Losada (2014b), Reservoir sedimentation and erosion processes in a snow-influenced ~ basin, in Southern Spain, in *Reservoir Sedimentation—Special Session on Reservoir Sedimentation of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow*, pp. 91–98, Taylor and Francis Group, London, U. K.

MITECO (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Madrid 246 p.

Morgan, R.P.C., (1995). *Soil Erosion and Conservation*. Longman, London, 298 pp.

Pérez,MJ., (2016). Climate change impacts on the fluvial regime in a Mediterranean mountainous área. EGU General Assembly,

Rodríguez, J. (2008). Sistema de Inferencia Espacial de Propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Herramienta de Apoyo a la Simulación de Procesos Agro-Hidrológicos a Escala Regional. Informe Final. Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero, Consejería de Agricultura y Pesca.