PIRAGUA OPCC

Evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático, y medidas de adaptación con impacto en el territorio (EFA210/16 PIRAGUA)

DESARROLLO Y PUESTA EN MARCHA DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

Evolución de los usos de los recursos hídricos y posibles tensiones bajo escenarios de cambio climático en Andorra

Coordinador: Andorra Recerca + Innovació

Autores: Oriol Travesset, Marta Domènech, Cristina Pesado, Marc Pons

Interreg POCTEFA

UNIÓN EUROPEA
UNION EUROPÉENNE

Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)

RESUMEN

Los recursos hídricos tienen un valor fundamental tanto para los ecosistemas como para la sociedad. Sin embargo, los cambios en el clima, la población, los patrones de consumo, el uso del suelo y la urbanización están afectando su calidad y disponibilidad futura. En Andorra, un país ubicado en el Pirineo Central, la confluencia del cambio climático, la transición energética y un modelo socioeconómico con un peso importante de la industria turística basada en un uso intensivo del agua podría amenazar la sostenibilidad futura de los recursos hídricos. Este caso de estudio analiza los recursos hídricos de Andorra a través de un enfoque integrado que combina la modelización hidrológica y la de la gestión de los recursos hídricos.

El modelo implementado explora la evolución futura de los recursos hídricos combinando escenarios climáticos y socioeconómicos. Los resultados de los escenarios considerados muestran que, en términos generales y sin tener en cuenta los efectos de posibles sequías, el impacto del cambio global no comprometerá la demanda futura de agua para uso humano en el horizonte 2050. Sin embargo, en ocasiones y localizaciones puntuales, las elevadas demandas en diferentes sectores pueden entrar en competencia y provocar un conflicto de prioridades entre usos, en especial para mantener las funciones ecosistémicas de los ríos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

ÁREA DE ESTUDIO 3

METODOLOGÍA 12

Los recursos hídricos y su evolución futura 13
Modelización hidrológica 13
Modelización de la gestión de recursos 24
Escenarios futuros 32

Estrategias de adaptación al cambio global 37
Identificación y percepción de estrategias de adaptación 37
Proyecto piloto. Optimización del uso de recursos en las estaciones de esquí 40

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 43

Modelización de los recursos hídricos y su evolución futura 43
Usos del agua en Andorra 44
Efectos del cambio climático y el cambio global en el régimen hídrico 46
Afectaciones del cambio climático y el cambio global a las funciones ecosistémicas 48
Afectaciones del cambio climático y el cambio global al sector hidroeléctrico 50
Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua 53
Balance hídrico, flujos hídricos y variables de estado 56

Estrategias de adaptación al cambio global 69

Estrategias de adaptación identificadas 69
Potencial de las estrategias de adaptación 73
Optimización del uso de recursos en las estaciones de esquí 78

CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS TRABAJOS 86

Población residente y turismo 87
Agricultura 88
Producción de energía hidroeléctrica 88
Funciones ecosistémicas 90

REFERENCIAS 92

INTRODUCCIÓN

Este caso de estudio analiza de forma multidisciplinaria el recurso hídrico de Andorra para evaluar como cambios en el clima, pero también cambios socioeconómicos pueden afectar a la evolución futura del recurso. El caso de estudio pone especial atención en analizar la evolución de los usos de los recursos hídricos buscando prever posibles tensiones entre distintos sectores de actividad en el contexto de cambio climático en Andorra.

Las zonas de montaña son uno de los ambientes más frágiles del planeta (Diaz et al., 2003). En este sentido, es importante avanzar en el conocimiento del impacto que está teniendo y que puede tener el cambio climático en los recursos hídricos, la biodiversidad o las actividades turísticas, buscando mejorar la gestión e introducir medidas de adaptación. Diferentes estudios valoran, a partir del uso de proyecciones climáticas, la exposición al cambio climático que tendrán las zonas de montaña (Nogués-Bravo et al., 2007), aunque se aprecia una carencia de trabajos que aborden con detalle la evolución reciente del clima a partir de datos observados en estaciones situadas a altitudes medias y altas debido a la dificultad de disponer de largas series de datos (Esteban Vea et al., 2012; Pons et al., 2014).

Hasta el momento se han realizado un buen número de estudios tanto a nivel internacional como en el Pirineo (Beniston, 2012; García-Ruiz et al., 2011; J. I. López-Moreno, Revuelto, et al., 2013; J. I. López-Moreno, Vicente-Serrano, et al., 2013; Nogués-Bravo et al., 2007; Viviroli et al., 2003) que analizan los efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico en zonas de montaña. Sin embargo, la mayoría de los estudios abordan las dimensiones de los recursos y de la demanda por separado, llegando a conclusiones científicas parciales que dificultan la plena comprensión de la dinámica del cambio global. Otros se centran en sectores de actividad específicos, ignorando los impactos en el conjunto del sistema.

El desarrollo de un modelo integral vinculando los cambios físicos y el modelo socioeconómico de usos, presenta no sólo un interés a nivel de planificación y desarrollo de políticas para Andorra sino también a nivel científico sirviendo de referencia para otras zonas de montaña. Este caso de estudio aporta una mejor comprensión de los posibles impactos del cambio global sobre el recurso hídrico en Andorra sirviendo de apoyo para el diseño de estrategias para adaptarse y hacerle frente.

El presente informe describe los trabajos realizados en el caso de estudio de Andorra durante el proyecto PIRAGUA[1] (01/01/2018-31/12/2021). Andorra Recerca + Innovació agradece la ayuda 2017 del Gobierno de Andorra de la convocatoria complementaria a las ayudas europeas POCTEFDA 2014-2020, Ref. AUEP007-AND/2017.

A continuación, se describe el área de estudio, seguida de la metodología de trabajo, los resultados obtenidos junto a su discusión y finalmente, las conclusiones y próximos trabajos.

[1] Detalle del proyecto en https://www.opcc-ctp.org/es/piragua

ÁREA DE ESTUDIO

El área principal de estudio se sitúa en el Principado de Andorra, un pequeño país en los Pirineos entre España y Francia. Tiene una superficie de 468 km² y una población de 77.543 habitantes (Govern d'Andorra, 2020a).

Andorra se encuentra en una región montañosa formada por la alta cuenca del Valira. Agrupa sesenta y cinco picos de más de 2.500 metros de altitud, entre los que el Comapedrosa es el más alto con 2.942 m.s.n.m. Está representada por el afloramiento de materiales paleozoicos pre-carboníferos que han sufrido los efectos de la orogenia herciniana durante el Carbonífero, para posteriormente ser deformados por la orogenia alpina en el Terciario (Govern d'Andorra, 2007).

Es una región de escarpados montañosos y de valles estrechos por donde fluyen numerosos cursos de agua que se unen para formar tres ríos principales (ver Figura 1). El Valira d'Orient nace en la parte más oriental, tiene un recorrido de 23 km y pasa por las poblaciones de Canillo y Encamp. Confluye con el Valira del Nord, que nace en los lagos de Tristaina, tiene un recorrido de 14 km y pasa por las poblaciones de Ordino y la Massana para finalmente, en la ciudad de Escaldes-Engordany, confluir junto al Valira d'Orient para formar el río Valira. Este tiene un recorrido de 11,6 km y un caudal anual medio de unos 11 m^3/s a la salida del país (Govern d'Andorra, 2018b). En

su descenso hacia el sur, desemboca en el río Segre en la Seu d'Urgell que, a su vez, es afluente del Ebro.

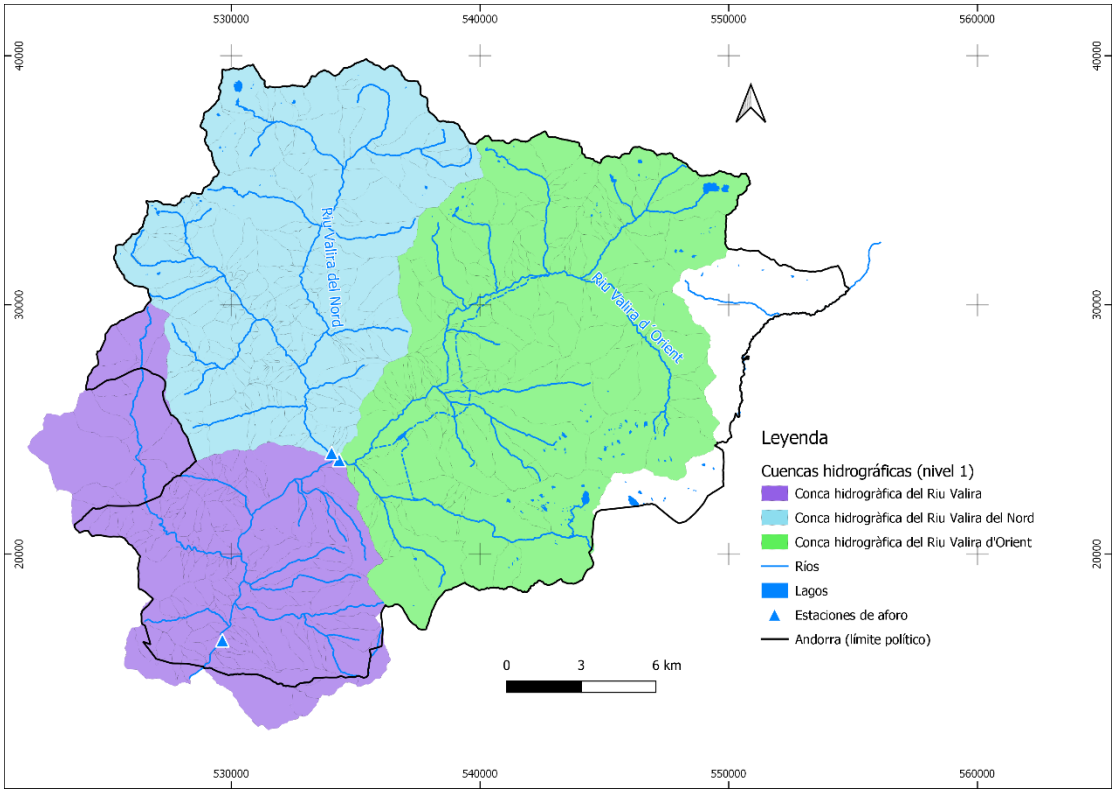


Figura 1. Cuencas hidrográficas del río Valira y ubicación de las estaciones de aforo incluidas en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Cuenca Hidrográfica del Ebro

Desde un punto de vista climático Andorra tiene un clima mediterráneo de alta montaña, de acuerdo con las grandes diferencias de altitud existentes en el país (Sant Julià de Lòria, el pueblo más bajo, está situado a 940 m.s.n.m., y Soldeu, el más alto, a 1.825 m.s.n.m.). La diversidad de las formas del relieve, la diferente orientación de los valles y la irregularidad típica de los climas de influencia mediterránea hacen que el país tenga una gran diversidad de microclimas, que matizan el dominio general del clima de alta montaña (Barceló Pons, 1995).

Influencias continentales que introducen cambios en el típico régimen estacional de precipitaciones, la altitud y localización de cara sur son factores particulares del clima andorrano. Sin embargo, la topografía de la parte francesa de los Pirineos permite la entrada de las masas de aire del Atlántico del norte y noroeste, afectando especialmente áreas de elevadas altitudes y creando puntualmente eventos de aludes extremos (Esteban et al., 2005).

El régimen de temperaturas representado se caracteriza, a grandes rasgos, por un verano templado y un invierno largo y frío, de acuerdo con la condición montañosa del Principado. La temperatura media de Andorra la Vella en el período 1981-2010 fue de 10,2ºC. En julio (el mes más cálido) oscila entre los 18 y 20 °C en Andorra la Vella, y en enero (el mes más frío) alrededor de los 3 °C. En cuanto a las temperaturas extremas, durante el invierno no son excepcionales los valores negativos entorno a los -2 °C. Por otra parte, las temperaturas máximas superan fácilmente los 25 °C durante los meses de julio y agosto (M. Batalla et al., 2016). La distribución mensual de las temperaturas es casi idéntica en las vertientes norte y sur, con los mínimos registrados coincidentes en enero y los máximos en julio o agosto, siguiendo la pauta característica de los climas mediterráneos.

En líneas generales, las precipitaciones se caracterizan por lluvias abundantes durante la primavera y el verano, que pueden prolongarse hasta el otoño (mayo, junio y agosto suelen ser los meses más lluviosos). Invierno, en cambio, es menos lluvioso, excepto en las partes altas, sometidas a la influencia de frentes procedentes del Atlántico, lo que explica la elevada innivación de las montañas andorranas. La precipitación media anual de Andorra la Vella en el período 1981-2010 fue de 832 mm con un recurso hídrico medio anual disponible a escala nacional cuantificado en 262 hm^3/anuales (Govern d'Andorra, 2019). La variabilidad de este recurso en el año más seco se traduce en una disminución del 45,7%,

mientras que el año más húmedo se incrementa el recurso en un 77,2% (Miquel, 2012).

A partir de los datos mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima de las tres estaciones meteorológicas con las series temporales más largas (Central, Engolasters y Ransol) se ha calculado el promedio para el territorio andorrano durante el período 1950-2015 (Figura 2). La media anual del período muestra una temperatura máxima y mínima media de 12,7 y 3,1°C respectivamente, una temperatura media de 7,9°C y una precipitación mensual media de 66,8 mm. Los datos climáticos han sido facilitados por FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra).

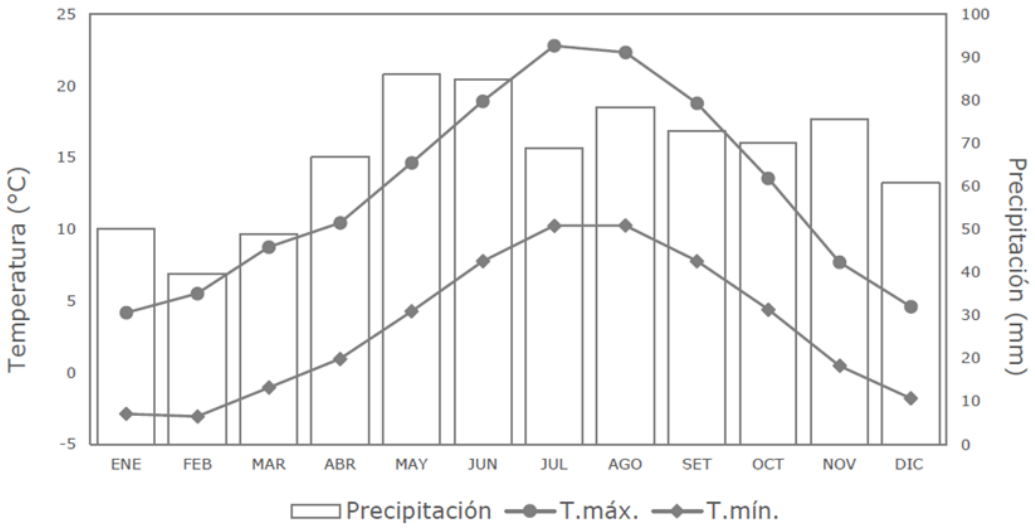


Figura 2. Precipitación mensual promedio (barras) y temperatura (líneas) en Andorra desde 1950 hasta 2015 (Fuente de datos: FEDA)

El *Observatori de la muntanya d'Andorra* (OMA, 2019) publica la tendencia de las temperaturas en Andorra aportando la magnitud del calentamiento global a escala local. La Figura 3 presenta la anomalía de la temperatura media anual en Andorra (1950-2015) mostrando un aumento de la temperatura media anual de 0,18 °C/década. Este aumento es más pronunciado a partir de finales de la década de 1980,

cuando se suceden la mayoría de los años más cálidos (valores de anomalía positiva más grandes).

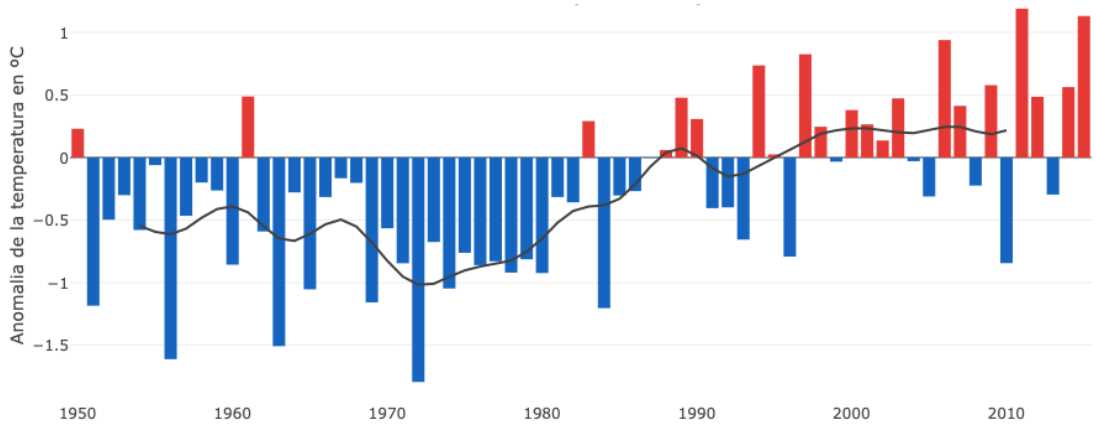


Figura 3. Anomalía de la temperatura media anual en Andorra desde 1950 hasta el 2015 (Fuente: OMA, 2019*)*

La precipitación anual muestra una ligera tendencia a la disminución alrededor de -2,6%/decenio, aunque no es estadísticamente significativa. Las barras amarillas (anomalías negativas) indican los años secos y las verdes (anomalías positivas) los años más húmedos (ver Figura 4).

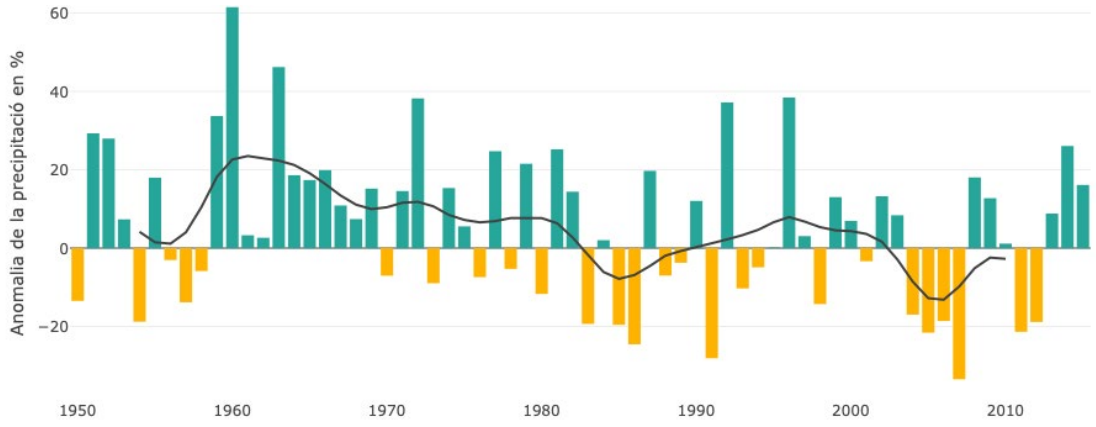


Figura 4. Anomalía de la precipitación acumulada anual en Andorra desde 1950 hasta el 2015 (Fuente: OMA, 2019*)*

El grupo de climatología del proyecto CLIMPY[2] (EFA081/15) (Amblar-Francés et al., 2020) coordinado por el Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (OPCC), ha desarrollado proyecciones de precipitación y temperatura para los escenarios climáticos futuros relativos a los escenarios de diferente concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (RCP 4.5, RCP 6.0, y RCP 8.5) para el año 2050 y 2100. Se usan metodologías de *downscaling* (regresión y analogías) a partir de modelos publicados por el *World Climate Research Programme* (WCRP) y se trabaja con una resolución de 5 km^2, cubriendo todo el territorio de los Pirineos. Los resultados apuntan a un aumento claro de las temperaturas, en especial de las temperaturas extremas. Por contra, la precipitación no muestra un patrón de cambio significativo.

El régimen hidrológico de Andorra es el típico de una zona de montaña de influencia mediterránea con régimen nival, el cual presenta caudales altos en primavera y bajos en estiaje. En otoño aparece una ligera aportación procedente de las precipitaciones.

Una de las características de los caudales pirenaicos es la elevada variabilidad interanual. Esta variabilidad también se observa en los datos de caudal de las cuencas andorranas, tal como se presenta en la Figura 5 (Valira) y la Figura 6 (Valira del Nord). Los caudales son medidos y registrados en los dos aforos de la Confederación Hidrológica del Ebro (código A402 y A403) en Andorra[3].

[2] Detalle del proyecto en https://www.opcc-ctp.org/es/climpy
[3] Consulta de los datos en http://www.saihebro.com/saihebro/

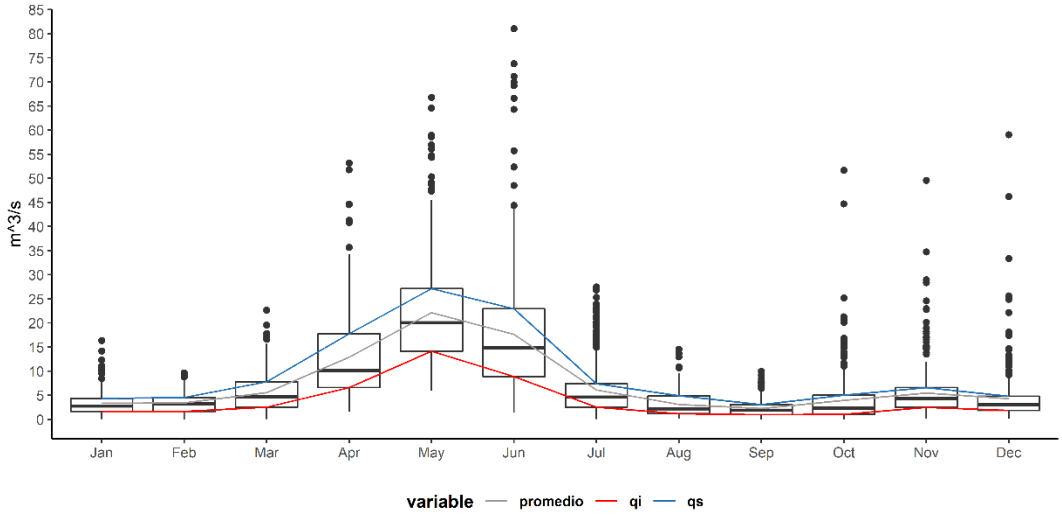


Figura 5. Variabilidad interanual de caudales en el periodo 2010-2021 en el aforo de Borda Sabaté (CHE), donde se representan los boxplot, los valores promedio y los percentiles qi (25), qs (75) mensuales (Fuente de datos: CHE)

La mayor variabilidad se concentra a finales de primavera e a inicios de verano. Los valores extremos son más probables durante los meses de mayo, junio, octubre, noviembre y diciembre, y superan en algunos casos los 70 m^3/s. Los meses de febrero y setiembre son los que presentan menos variabilidad interanual y es a la vez donde acontecen los valores de caudal más bajos.

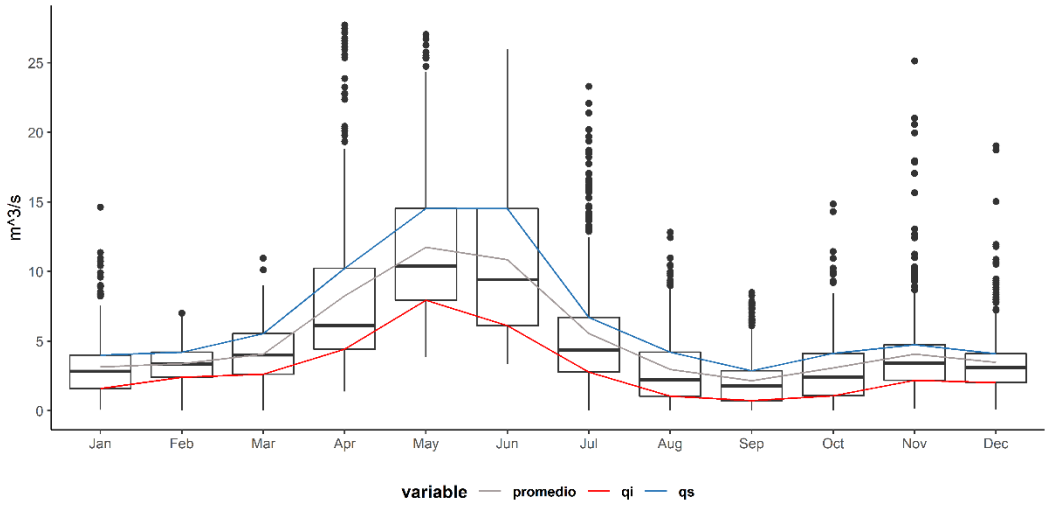


Figura 6. Variabilidad interanual de caudales en el periodo 2010-2021 en el aforo dels Escalls (CHE), donde se representan los boxplot, los valores promedio y los percentiles qi (25), qs (75) mensuales (Fuente de datos: CHE)

Adicionalmente, esta variabilidad interanual climática típica de los Pirineos se ve alterada en el contexto de cambio climático. En este sentido, el incremento de la temperatura junto con la posible disminución de la precipitación, puede incrementar la evapotranspiración que reduciría el aporte de agua a los ríos (OPCC-CTP, 2018).

El aumento de temperaturas provocará un incremento de la precipitación líquida respecto la sólida durante el invierno y un adelanto de la fusión de la nieve. Sin duda, y tal como ya prevén algunos estudios (J. Ignacio López-Moreno et al., 2006), el cambio climático conllevará un cambio en el hidrograma típico de los ríos pirenaicos, atenuando los caudales máximos, y reduciendo el aporte anual.

El análisis de las estaciones de aforo de los Pirineos ha revelado una disminución del caudal medio del 30% entre 1956 y 2015 (Zabaleta et al., 2022). Esta disminución se debe por un lado a un aumento en el consumo de agua para las actividades humanas (nuevas urbanizaciones, estaciones de esquí, dispositivos generadores de nieve artificial, etc.) y, por otra parte, a intensas modificaciones en la cubierta vegetal y los usos del suelo en áreas donde la presión humana ha disminuido y el pastoreo y el cultivo han desaparecido.

Adicionalmente, se ha detectado en las últimas décadas un aumento de la superficie forestal (Améztegui et al., 2010; CTFC, 2021). Este incremento, directamente relacionado con un aumento de la evapotranspiración, podría aumentar aún más la pérdida de caudal de los ríos pirenaicos (Ignacio & Moreno, 2014).

Además del aumento medio de temperatura, se espera una mayor ocurrencia de eventos cálidos extremos (Beniston, 2003; Giorgi & Lionello, 2008; J. I. López-Moreno et al., 2008) con un aumento adicional de la evapotranspiración (Lespinas et al., 2010; Liuzzo et

al., 2010), y en consecuencia, una menor capacidad de generación de escorrentía.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar los efectos del cambio climático y los cambios socioeconómicos en los recursos hídricos de Andorra se aplican distintos métodos y herramientas. Como base del análisis, se ha implementado un modelo a partir de la herramienta WEAP (*Water Evaluation And Planning system*) que permite vincular, entender y explorar las interrelaciones entre los diferentes componentes, tanto ambientales como socioeconómicos, que intervienen en el ciclo del agua. Para ello se caracterizan las variables físicas que intervienen en el comportamiento hidrológico, así como las dinámicas socioeconómicas y sus proyecciones futuras.

Este trabajo realiza una primera aproximación al nexo agua-energía. La producción de energía eléctrica, aunque como uso no consuntivo, es la principal actividad en uso de agua del país. El nexo entre agua y energía en Andorra se prevé aún más importante a medio y largo plazo ya que los diferentes planes energéticos nacionales (Govern d'Andorra, 2012, 2018c) y la reciente ley de impulso de la transición energética y del cambio climático[4] (Litecc) identifican la generación

[4] Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic

hidroeléctrica como elemento clave para alcanzar los objetivos climáticos y de seguridad energética del país.

LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SU EVOLUCIÓN FUTURA

La modelización de los recursos hídricos del Principado de Andorra y su evolución futura se ha abordado mediante la herramienta integrada de simulación hidrológica WEAP. El modelo implementado explora la evolución futura de los recursos hídricos en el contexto de cambio global, combinando escenarios climáticos y socioeconómicos.

WEAP es una herramienta del *Stockholm Environment Institute* que permite abordar cuestiones como los análisis de demanda sectorial, la conservación del agua, los derechos de agua y las prioridades de asignación, las simulaciones de flujo de los arroyos, las operaciones de los embalses, la generación de energía hidroeléctrica, la carga de contaminación y los análisis de costo-beneficio de los proyectos.

WEAP opera sobre el principio básico de un balance hídrico y se puede aplicar a una sola cuenca o a sistemas complejos de cuencas fluviales transfronterizas. Además, WEAP puede simular una amplia gama de componentes naturales y de ingeniería de estos sistemas, incluida la escorrentía de lluvia, el flujo base y la recarga de agua subterránea a partir de la precipitación. Un módulo de análisis financiero también permite al usuario investigar las comparaciones de costo-beneficio de los proyectos.

WEAP se ha aplicado en evaluaciones de agua en docenas de países, incluidos: Estados Unidos, México, Brasil, Alemania, Ghana, Burkina Faso, Kenia, Sudáfrica, Mozambique, Egipto, Israel, Omán, Asia Central, India, Sri Lanka, Nepal, China, Corea del Sur y Tailandia.

Modelización hidrológica

El algoritmo principal del modelo WEAP es un balance de agua resuelto espacialmente y calculado, equilibrando la oferta y la demanda de agua en cada nodo y enlace del sistema. Tal como se

muestra en la Figura 7, los nodos representan puntos de demanda (en rojo) y aportaciones de agua (en verde), mientras que los enlaces los conectan generalmente a ríos. Esta estructura de nodos y enlaces permite agrupar y desagregar los componentes del balance de agua si es necesario, dependiendo de los datos de entrada disponibles, y es aplicable a todas las escalas (Höllermann et al., 2010). El modelo se configura para simular un año base y un escenario de referencia, donde se determina la cantidad de agua disponible y las demandas.

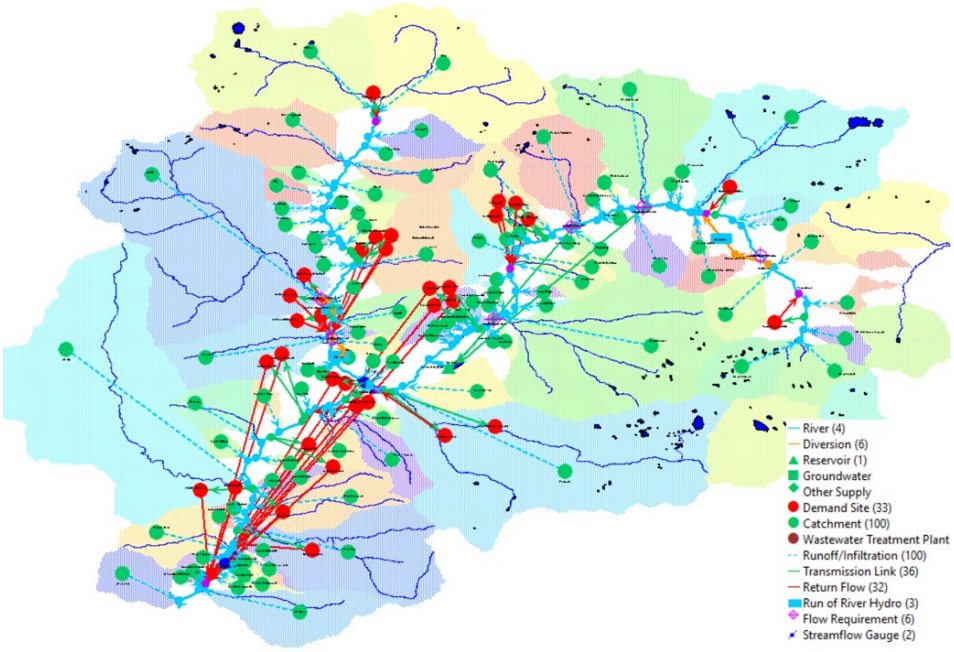


Figura 7. Vista esquemática del modelo WEAP-Andorra con la red hidrográfica modelizada (en azul claro), los nodos de demanda (en rojo), aportaciones de cuenca (en verde), retornos de agua, reservorios e hidroeléctricas

En este estudio se ha trabajado a escala mensual por ser aquella que más se adapta a los resultados definidos en este proyecto y a los datos disponibles. Se utiliza el modelo disponible en el entorno WEAP denominado *Soil Moisture Method*. Este método se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la escorrentía subterránea (es decir, el interflujo) y la percolación profunda para una unidad de cuenca (ver Figura 8). Este

método permite tener en cuenta las cubiertas del suelo y los impactos del tipo de suelo en estos procesos (Stockholm Environment Institute, 2016).

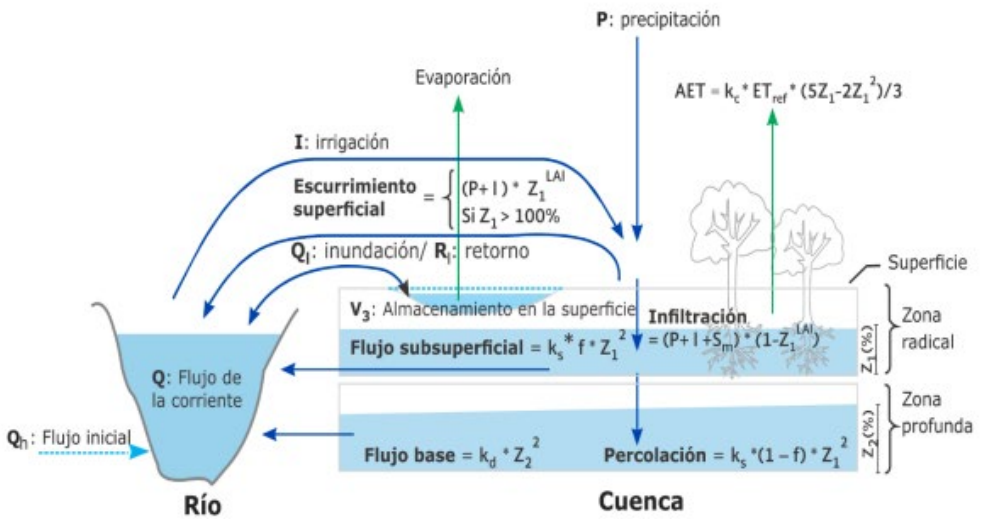


Figura 8. Esquema del método de la humedad del suelo (Fuente: Angarita et al., 2018*)*

Cada cuenca se divide en subcuencas, y estas en *N* áreas fraccionales que representan los diferentes tipos de cubiertas del suelo, donde se calcula un balance hídrico para cada área fraccional, de cada área. Se supone que el clima es uniforme en cada unidad hidrológica (cuenca o subcuenca).

WEAP permite, a través de una interfaz gráfica basada en SIG (Sistema de Información Geográfica), el diseño del sistema hidrológico para simular los principales caudales de los ríos. El trabajo realizado ha permitido modelizar los ríos de las tres cuencas principales de Andorra (Valira del Nord, Valira d'Orient y Valira), y sus respectivas subcuencas internas (segunda bifurcación de ríos dentro de la cuenca de Andorra) denominadas cuencas de grado dos (ver Figura 9) llegando a representar cien cuencas (438,8 km^2). Se han desestimado las cuencas de las cuales su agua no confluye al río Valira (cuenca del río Ariége y cuenca del río de la Llosa), y se ha añadido la parte de la cuenca de grado dos del río d'Ós que pertenece a Catalunya.

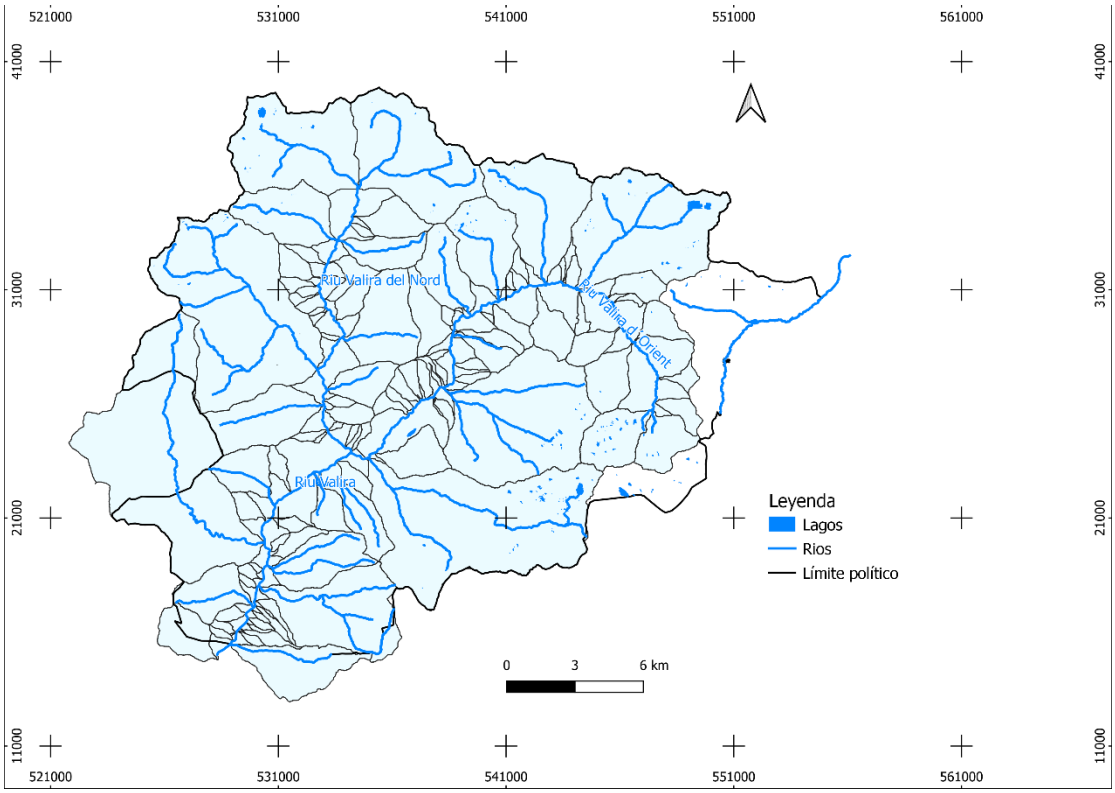


Figura 9. Subcuencas de grado dos pertenecientes a la cuenca del río Valira incluidas en el modelo

El modelo hidrológico se alimenta de variables climáticas y de usos del suelo. La parametrización del modelo se ha realizado mediante las variables relativas a las cubiertas del suelo y a las características del propio suelo.

El modelo ha sido calibrado y validado con los datos del periodo añal 2015-2019, para ser finalmente proyectado, con los diferentes escenarios hasta el año 2050. La utilización de este intervalo de años no es casual, sino obligada, en ser el único intervalo de años en el cual se dispone de (1) datos climáticos interpolados en cada cuenca de grado dos y (2) caudales observados en los aforos hidráulicos de Andorra.

El año base del modelo se establece en 2015 (*current accounts* según la nomenclatura WEAP). Ahora bien, una vez calibrado y validado el modelo, y para proyectar distintos escenarios hacia el año 2050, se ha partido del año tipo representativo del período climático de referencia (1981-2010). Si se escogiese cualquier año comprendido en el intervalo de 2015-2019, se estaría proyectando solo un año concreto en el futuro. Esto supondría un grave sesgo al ser un año no representativo de la normalidad del clima de Andorra donde, al igual que en el resto de los Pirineos, existe mucha variabilidad interanual.

A continuación, se detallan las variables y parámetros utilizados para implementar el modelo hidrológico.

Variables climáticas e hidráulicas

El modelo WEAP se nutre de las series climáticas que permiten caracterizar toda la superficie de estudio. Para la caracterización de la precipitación y la temperatura del año base se ha utilizado la interpolación espacial de los datos mensuales del período climático de referencia 1981-2010[5]. La interpolación se ejecuta mediante la combinación de técnicas geoestadísticas (método de interpolación fijado) (Ninyerola et al., 2000), considerando las estaciones meteorológicas automáticas (EMA's) de Andorra y los factores geográficos con influencia sobre el clima de la zona (Meritxell Batalla et al., 2016). Los valores mensuales promedio de temperatura y precipitación en las cien cuencas del modelo se calculan en base a una malla con un tamaño de celda de 90 metros.

Las variables de viento y humedad relativa se extraen de la misma manera para cada una de las cien subcuencas pero, en este caso, utilizando el conjunto de datos regionales (Palazón et al., 2022) como datos de entrada. Este contiene datos meteorológicos basados en

[5] Datos públicos del *Atles Climàtic Digital d'Andorra* (ACDA) en http://www.acda.ad/

observaciones para la simulación hidrológica a escala de Pirineos. Los datos tienen una resolución de tamaño de celda de 2,5 km y cubren el período histórico 1981-2010.

El modelo WEAP de Andorra se calibra con los datos de caudales disponibles. En Andorra existen únicamente dos estaciones de aforo con series históricas de caudal. La estación Valira del Nord (A402[6]) en Escaldes-Engordany que recoge datos justo antes de su confluencia con el río Valira y la estación Borda Sabaté (A403[6]), situada en el sur del país con datos de caudales del río Valira después de la confluencia entre los ríos Valira del Nord y Valira d'Orient. Una debilidad de los datos de las estaciones de aforo de Andorra es la inexistencia de datos de caudales para el río Valira d'Orient y el corto periodo para el que se dispone de datos, desde 2003 y 2010 en la estación A402 y A403, respectivamente.

La calibración del modelo se ha realizado con los datos de las dos estaciones disponibles, que representan el caudal de salida de la cuenca de Andorra (A403), y el caudal de salida de la cuenca del río Valira del Nord (A402).

Variables del uso del suelo

Las cien subcuencas de grado dos de Andorra incluidas en la cuenca del Valira son la referencia espacial para los datos de usos del suelo. Mediante análisis SIG, cada subcuenca se ha combinado con el mapa de usos del suelo del año 2012 (CENMA-IEA, 2012) para el territorio de Andorra y con el mapa de cubiertas del suelo de Catalunya del año 2009 (Dep. de Geografia de la UAB, 2009) para la subcuenca de Os

[6] Identificador SAIH Ebro
http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/mapas/

de Civís. Las categorías de los usos del suelo se han definido en base a la clasificación *CORINE Land Cover*[7] año 2012 (ver Figura 10).

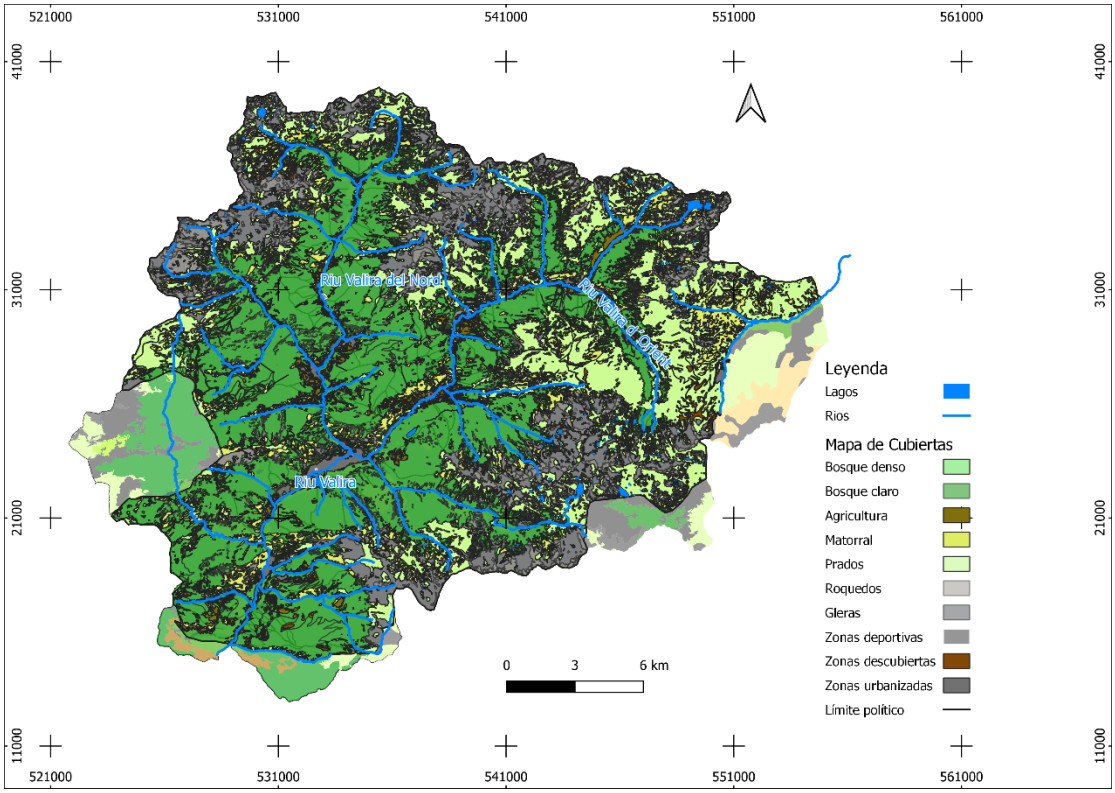


Figura 10. Distribución de las categorías de los usos del suelo en la zona de estudio

Las variables relativas a las características del suelo que el modelo *Soil Moisture Method* de WEAP integra (permeabilidad, dirección del flujo, capacidad de retención de agua, resistencia a la escorrentía, conductividad del suelo en la zona profunda y en la zona de raíces, etc.) han servido de base para la calibración del modelo. Cada tipo de cubierta del suelo de cada subcuenca se ha asociado a cada parámetro del suelo. Esta calibración se detalla a continuación.

Calibración y validación

El período de calibración y validación se ha establecido en el intervalo de años 2015-2019. Este período no es casual, sino que corresponde

[7] https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover

al intervalo de años donde se dispone de todos los datos imprescindibles para calibrar el modelo. Estos datos son:

- *Datos mensuales de temperatura y precipitación interpolados con un tamaño de celda de 90 metros.*
- *Aforamiento de caudales corregidos en la salida de la cuenca de Andorra, y en la salida de la cuenca del río Valira del Nord.*
- *Demanda hídrica de agua de cierta precisión y rigor.*

Para calibrar el modelo se han introducido los parámetros relativos a cada tipo de cubierta del suelo. Algunos parámetros se han estimado a través de información física y también según la experiencia de SEI (Stockholm Environment Institute, 2016) en modelización mediante WEAP, estos son:

- *Coeficiente de cultivo (Kc): rango entre 0,6-1*
- *Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (SWC): valor de 2000 mm.*
- *Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): rango entre 0,15-10.*
- *Nivel de humedad en la zona de raíces (Z1): valor del 35 %*

Mientras que en otros (propios del modelo matemático), se calibran. Los parámetros calibrados, y sus valores asignados son los siguientes:

- *Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (DWC): se estima como un valor único para toda la cuenca (20000 mm), asumiendo un solo reservorio horizontal subterráneo. Debido a que su estimación es compleja a través de información física, sus valores se infieren por calibración (Vicuña et al., 2011; Yates et al., 2005). Inicialmente se empezó a calibrar con un valor de 2000 mm no obstante esto resultó en la obtención de valores de caudal de base muy*

elevados. Estos caudales base, que muchas veces superaban el flujo normal, no representan la respuesta hidrológica de las cuencas. Por tanto, se elevaron los valores para la calibración hasta llegar al valor óptimo.

- *Dirección preferencial del flujo (f): depende de la cobertura del suelo. Conceptualmente varía desde 1 para flujo 100% horizontal, a 0 para flujo 100% vertical. Para una estimación inicial, el factor se relaciona con la cobertura de suelo. Se inicia el proceso de calibración considerando valores referenciales de la literatura (Amin et al., 2018; Keith et al., 2010), obteniéndose un valor de 0.3 mm/mes.*
- *Conductividad en la zona profunda (ks): representa el flujo máximo posible cuando Z2=1. Es un valor único para toda la cuenca. Controla el flujo subterráneo a través de una relación directamente proporcional. La estimación inicial del parámetro se ha determinado a través de referencias bibliográficas (Amin et al., 2018) y calibrando se ha obtenido un valor de 1 mm/mes.*
- *Conductividad en la zona de raíces: es el máximo flujo posible cuando el reservorio Z1 está a capacidad de campo. Su estimación inicial se ha determinado a través de referencias bibliográficas (Amin et al., 2018) y calibrando se ha obtenido un valor de 50 mm/mes.*

Bondad de ajuste del modelo

La calibración del modelo incluye el período 2015-2017 y la validación el de 2018-2019. Se ha llevado a cabo una primera calibración-validación general para toda la cuenca de Andorra, que se ha reforzado a posteriori con la calibración-validación de la cuenca del Valira del Nord (ver Figura 11). El proceso se resume a continuación:

1. *Primera calibración y validación con el modelo hidrológico de toda la cuenca del río Valira y los datos de caudal observados en el aforo de Borda Sabaté (A403) a la salida de Andorra.*

2. *Segunda calibración-validación con el modelo hidrológico del río Valira del Nord con los datos observados en el aforo de Pont dels Escalls (A402) a la salida de la cuenca del río Valira del Nord.*

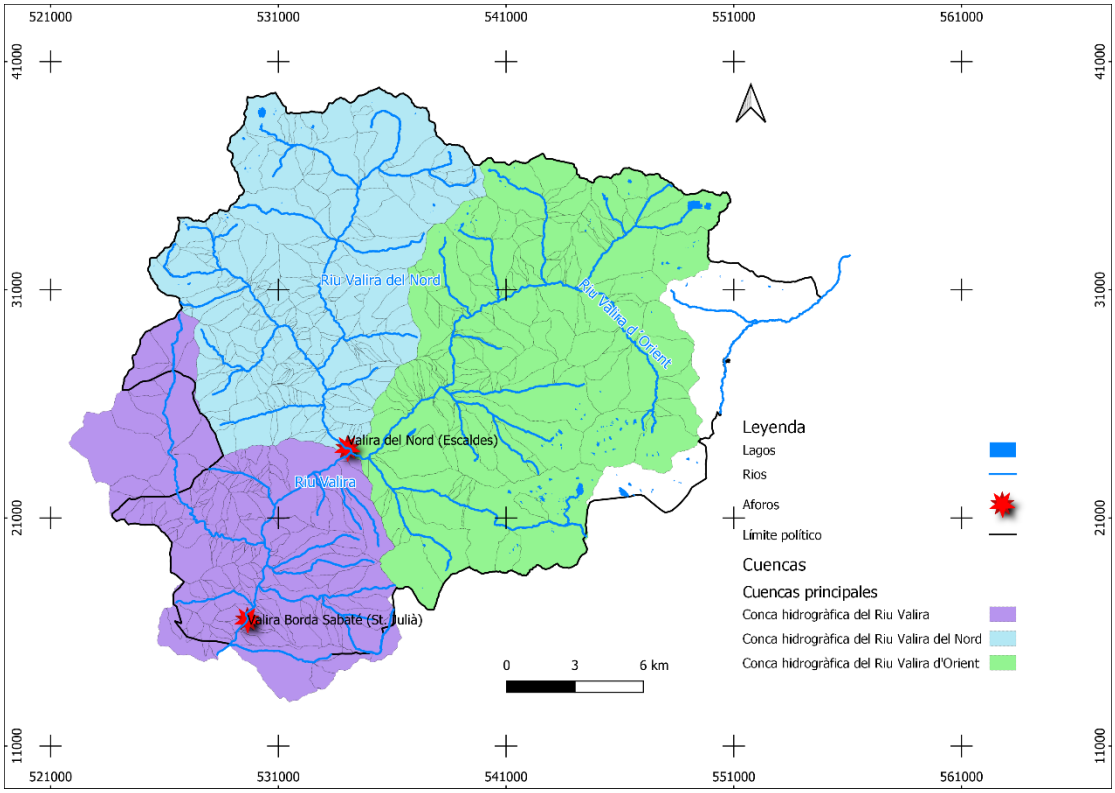


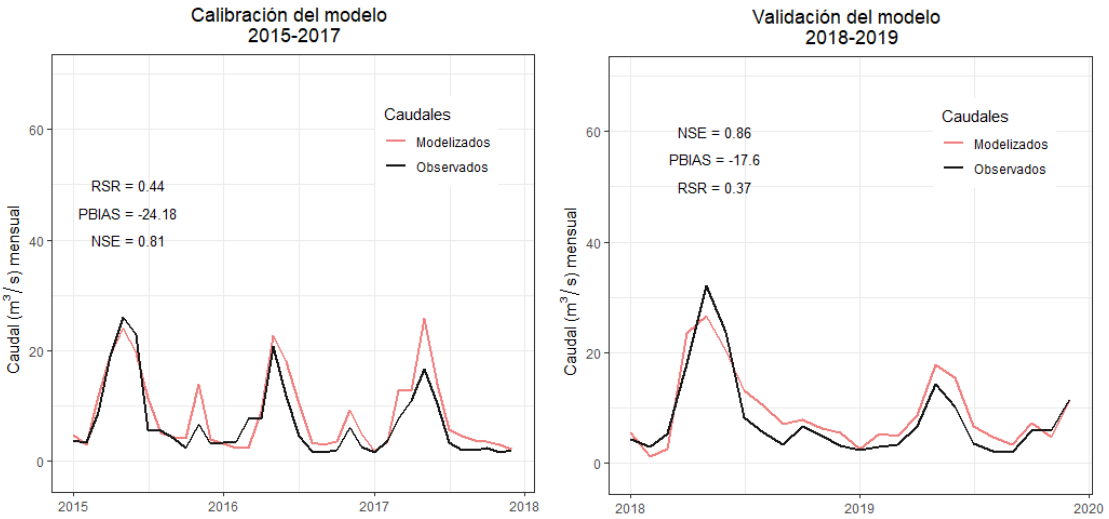
Figura 11. Localización de las estaciones de aforo utilizadas en la calibración y validación del modelo

La cuenca del río Valira incluye la cuenca del río Valira d'Orient y la cuenca del río Valira del Nord, y representa unos 438,79 km^2. La cuenca del Valira del Nord, representa un 33,19 % del total de la cuenca del río Valira (145,27 km^2) (Figura 11).

Los indicadores de bondad de ajuste calculados son*: Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE), *Percent bias* (PBIAS) y *RMSE-observations standard deviation ratio* (RSR), siguiendo la metodología descrita por (Moriasi et al. (2007). Se han utilizado las categorías de nivel de satisfacción

de bondad de ajuste al modelo adaptadas para estudios de cuencas hidrológicas de paso mensual, como es el caso de este estudio.

Los resultados para la cuenca del río Valira demuestran que todos los indicadores de bondad de ajuste son satisfactorios (de media muy buenos), asignando el modelo como significativo y con una buena predicción (ver Figura 12).

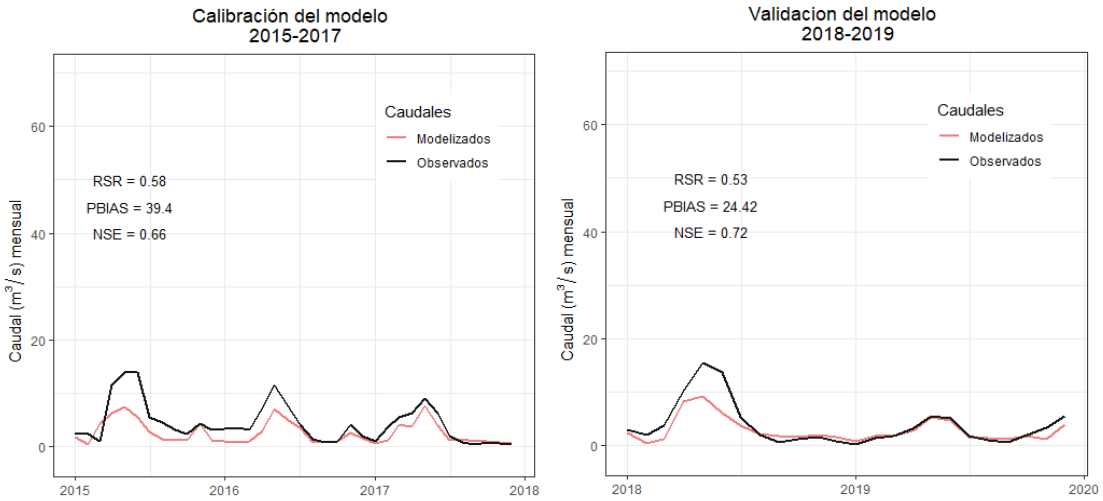


Calibración
NSE=muy bueno
PBIAS=satisfactorio
RSR=muy bueno

Validación
NSE=muy bueno
PBIAS=satisfactorio
RSR= muy bueno

Figura 12.Caudales observados y modelizados en la calibración y validación del modelo, con sus respectivos valores de los indicadores de bondad de ajuste (Moriasi et al., 2007) *en la estación de aforo A403 (río Valira)*

Mientras que los resultados para la cuenca del río de Valira del Nord demuestran que la mayor parte de los indicadores de bondad de ajuste son correctos (generalmente buenos), excepto para el PBIAS del período de calibración (ver Figura 13).



Calibración
NSE=bueno
PBIAS=no satisfactorio
RSR=bueno

Validación
NSE=bueno
PBIAS=satisfactorio
RSR= bueno

Figura 13. Caudales observados y modelizados en la calibración y validación del modelo, con sus respectivos valores de los indicadores de bondad de ajuste (Moriasi et al., 2007) *en la estación de aforo A402 (río Valira del Nord)*

Modelización de la gestión de recursos

Variables socioeconómicas

Las variables socioeconómicas son las que definen la demanda de agua en el modelo. La demanda se estructura por nodos en WEAP y cada nodo tiene una tipología de demanda para diferentes usos o sectores: doméstico, turístico, producción de nieve, agricultura, ganadería, y producción hidroeléctrica. Los distintos nodos de demanda con el tipo de uso asignado se asocian al tramo de río concreto representando las captaciones de agua. Además, cada nodo incluye información de la parroquia a la que pertenece para poder disponer del análisis de demanda a escala parroquial.

Los datos de demanda del año base se han construido combinando técnicas *bottom-up* y *top-down* según el sector de actividad. Estas

últimas se basan en las recopiladas por el *Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat* el año 2019 por ser datos de más calidad y precisión que los del año 2015 (Govern d'Andorra, 2021a). Una vez definidas las demandas de los distintos sectores en el año base, estas se proyectan en distintos escenarios futuros.

A continuación, se describe la metodología para definir cada tipo de demanda incorporada en el modelo.

Sector doméstico

Se utiliza el valor de consumo medio de agua por persona y día en Andorra del año 2019 publicado en el informe nacional sobre uso de agua en Andorra (Govern d'Andorra, 2021a). En este caso se han utilizado los datos del informe del año 2019 y no los del año base del modelo, por ser el último informe disponible de mayor precisión y fiabilidad. El consumo se estima en 220 litros por persona y día.

La demanda de agua se estima para cada una de las parroquias de Andorra por lo que la variable población se introduce en el modelo a escala de parroquia en base al censo (Govern d'Andorra, 2020a).

La distribución del consumo mensual se estima en base a los datos de consumo facturado. En este caso se utiliza el consumo facturado trimestral o mensual publicado en el informe nacional sobre uso de agua en Andorra (Govern d'Andorra, 2021a) que aglutina los datos de las siete parroquias andorranas. Estos datos presentan incoherencias debido al origen y recopilación de la información y por tanto sólo se han utilizado de forma porcentual para distribuir el consumo anual calculado en los distintos meses.

El consumo doméstico también incluye los caudales facturados de cada Comú[8] para las infraestructuras privadas y públicas: escuelas, centros deportivos y sector profesional.

[8] Organismo gubernamental de la división administrativa del territorio andorrano

Sector turístico

En este caso, a diferencia del sector doméstico, se ha seguido una metodología *bottom-up*. Se ha utilizado la base de datos del Departamento de Turismo del Govern d'Andorra[9], donde figuran todos los alojamientos turísticos de Andorra y sus características. También se ha utilizado el registro de estadísticas de la Unión Hotelera de Andorra[10], para conocer la distribución de la ocupación hotelera anual y mensual.

A partir de estas fuentes y bibliografía se ha generado la siguiente información base del modelo:

- *Número de camas y categoría (1-5 estrellas) por alojamiento. Se infiere el número de camas con el número de huéspedes.*
- *Consumo medio por persona y categoría obtenido a partir del informe MEDSTATS II (Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009) (Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009) en el marco del Euro-Mediterranean Statistical Cooperation programme (Tabla 1).*

Clasificaciones	Consumos diarios persona (l)
1 – Estrella	180
2 – Estrellas	300
3 – Estrellas	300
4 – Estrellas	400
5 – Estrellas	500

Tabla 1. Consumos diarios de agua por turista (l) y día en función de la categoría de alojamiento (Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009)

- *Consumo total real para cada categoría de alojamiento teniendo en cuenta el número de camas y la ocupación*

[9] Comunicación personal
[10] https://uha.ad/ca/estadistiques/

hotelera. La media de ocupación se considera del 51,48% basándose en la Tabla 2.

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Set	Oct	Nov	Dic	media
Ocup.	66,4	74,3	62,4	47,0	32,3	29,1	53,8	72,1	46,2	43,1	32,4	58,7	51,48
Prop.	10,7	12,0	10,1	7,6	5,2	4,7	8,7	11,6	7,4	6,9	5,2	9,5	100

Tabla 2. Ocupación mensual hotelera en Andorra (%) del año 2018 (año considerado "normal" en cuanto a ocupación), y proporción equivalente (%) para introducir al modelo

Estaciones de esquí

Del documento oficial del Gobierno de Andorra donde se publican anualmente el gasto hídrico (Govern d'Andorra, 2021a) se han extraído los valores de consumo destinados a producción de nieve artificial en las estaciones de esquí andorranas para cada nodo (ver Tabla 3).

Ordino-Arcalís	SAETDE-Pas de la Casa-Grau Roig	ENSISA-Soldeu-El Tarter	Vallnord Pal-Arinsal
207.919	345.291	729.857	210.606

Tabla 3. Consumo anual (m^3) de agua en las estaciones de esquí de Andorra consideradas

El perfil de consumo mensual de todas las estaciones de esquí se basa en los datos proporcionados por SAETDE[11] de los sectores de Grau Roig y Pas de la Casa durante los años 2015-2019 (ver Tabla 4).

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Set	Oct	Nov	Dic
%	25	1	8	0	0	0	0	0	0	0	30	36

Tabla 4. Perfil de consumo mensual de las estaciones de esquí

[11] Comunicación personal

Sector agrícola

A partir del documento oficial del Gobierno de Andorra donde se publican anualmente las superficies y tipos de conreos de Andorra[12], se extraen las superficies y los tipos de cultivo de cada nodo. Se desarrollan los cálculos teniendo en cuenta los cultivos mayoritarios y que más gasto hídrico suponen como son el tabaco (*Nicotiana tabacum*) y el raygrass (*Lolium* sp.). Las necesidades hídricas para el cultivo de tabaco son de unos 400-600 mm/m^2 y año (Kassam, 1979; Maw et al., 2009). El informe de gobierno sobre el gasto hídrico de Andorra (Govern d'Andorra, 2021a) define un valor de 1500 mm/m^2 y año. Así se decide tomar un valor medio de 750 mm/m^2 y año. Para el raygrass, la mayoría de las publicaciones marcan un valor medio de 400 mm/m^2 y año (Gallego, J.J; Barbarossa, R.A; Murray, F y Miñón, 2010). Por tanto, entendiendo que la mitad del período vegetativo el cultivo es cubierto por tabaco y el otro por raygrass, la necesidad media sería de 575 mm/m^2 y aceptando que la precipitación media en el periodo vegetativo es de 237 mm/m^2 (M. Batalla et al., 2016), se consideran unas necesidades medias de agua para el cultivo medio de Andorra de 338 mm/m^2.

La variación mensual del consumo de agua de los cultivos se ha establecido en base a la definida en (Pesado, 2021). La variación mensual presentada en la Tabla 5 ha sido validada por agricultores de la parroquia de Ordino (como informantes de la cuenca del Valira del Nord).

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
%	0	0	0	0	0	20	35	35	10	0	0	0

Tabla 5. Variación mensual del consumo de agua de los cultivos para Andorra

[12] Más detalle en https://www.agricultura.ad/images/stories/estadistiques/conreus/superficie_conreu_2019.pdf

Sector ganadero

Se han extraído los datos oficiales del "Padral"[13] que es el censo histórico del número y tipo de ganado declarado en Andorra. Los datos obtenidos son para cada nodo de demanda (asociado a cada parroquia) y del intervalo de años 2015-2019.

Se ha calculado el número equivalente de las unidades de ganado mayor (UGM) para cada tipología de ganado. Se han asociado unas necesidades de agua de 20 m^3/año para cada UGM. Las equivalencias entre los diferentes tipos de ganado se basan en las publicadas en el *BOPA, núm. 47, 2015* (07/23/15) (ver Tabla 6).

Tipos de ganado		UBG
Bovino	Vaca	1,00
	Toro	1,30
Equino	Yegua	1,10
	Semental	1,43
	Potrillo	1,24
Ovino	Oveja	0,13

Tabla 6. Equivalencias del gasto nutritivo entre los diferentes tipos de ganado publicados para Andorra en el BOPA, núm. 47, 2015 (07/23/15)

Se desconoce el consumo mensual, pero se considera uniforme a lo largo del año. Se sabe que durante los meses de verano los animales consumen el agua de las cabeceras de cuenca cuando están en los pastos de puerto, y que el resto de año están en los pastos de fondo de valle cerca del río y a menudo estabulados, consumiendo agua de la red pública en algunos casos y en otros, directamente del río.

Producción hidroeléctrica

Los datos de captación de agua para la producción hidroeléctrica han sido facilitados por *Forces Elèctriques d'Andorra*[14] (FEDA). FEDA produce aproximadamente un 15% de la energía eléctrica del país en la Central hidroeléctrica de Encamp. El reservorio principal de 0,6 hm^3 se ubica en el lago de Engolasters y se alimenta a través de tres

[13] https://www.agricultura.ad/
[14] Comunicación personal

captaciones de agua de la cuenca del río Valira d'Orient y una del río Madriu. Tal como se presenta en la Figura 14, la primera y principal captación del Valira d'Orient es en la presa de Ransol, complementada con la de la Vall del Riu y Cortals Ensangents. El retorno de agua se hace unos 11,5 km aguas debajo de Ransol, coincidiendo con las oficinas y estación transformadora de FEDA.

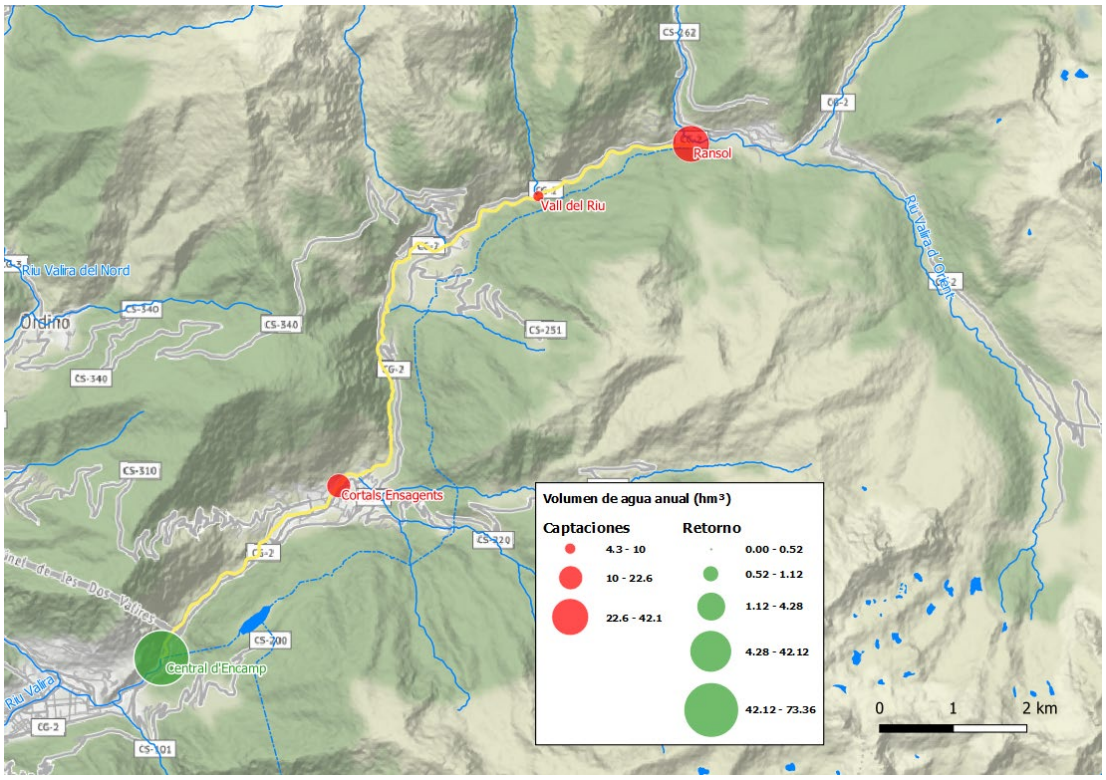


Figura 14. Captaciones (río de la Vall del Riu, río de Cortals Ensangent y presa de Ransol) y retorno de agua de la central hidroeléctrica de Encamp

Los datos utilizados en el modelo WEAP en el cálculo de utilización de agua para producción hidroeléctrica son los siguientes:

- *volumen mensual de agua captado de los afluentes del río Valira d'Orient: río de la Vall del Riu, río de Cortals Ensangent, captación de la Presa de Ransol y captación del río Madriu.*
- *capacidad de almacenamiento (volumen).*

- *curva de relación entre el volumen del embalse y la elevación.*
- *altura de caída de agua.*
- *volumen de agua liberado máximo para el sistema de turbinas.*
- *evaporación del embalse*

Adicionalmente a la principal hidroeléctrica del país, se han introducido en el modelo las mini centrales planificadas en el Plan Sectorial de Infraestructuras Energéticas de Andorra (PSIEA) (Govern d'Andorra, 2018b). En este caso, al ser centrales que no existen en la actualidad, se considera que entraran a funcionar en los escenarios futuros a partir del año 2030.

Escenarios futuros

En la Tabla 7 se presentan los escenarios modelizados en el presente caso de estudio. Para su elección se han tenido en cuenta las proyecciones climáticas y socioeconómicas relacionadas con el uso del agua y las medidas adaptativas presentadas en la sección Estrategias de adaptación al cambio global.

ESCENARIO	**Cambio climático** (anomalía 2050)			**Cambio socioeconómico en los principales sectores**		
	RCP IPCC	T^a (ºC)	Pp (%)	Doméstico	Turístico y estaciones de esquí	Agrícola
Referencia	RCP 4.5	T_1	PP_1	Δ Demográfico 1,18%/año	Infraestructuras Δ 1,18 %/año	-
Cambio climático	RCP 8.5	T_2	PP_2	Δ Demográfico 1,18 %/año	Infraestructuras Δ 1,18 %/año	Δ riego 10 %* Ampliación período vegetativo en un mes
Cambio global	RCP 8.5	T_2	PP_2	Δ Demográfico 1,62%/año	Infraestructuras turísticas Δ 1,62%/año Ocupación 70% Δ Innivación 15% (2050)	Δ riego 10 % Ampliación período vegetativo en un mes
Adaptación	*			150 l/persona y día 20% de pérdidas en las captaciones y en el transporte de agua	-25% consumo en alojamientos turísticos -15% agua para innivación	-15% en uso de agua para riego

*Tabla 7. Resumen de los escenarios analizados. *Hereda las consideraciones climáticas y socioeconómicas del escenario Cambio global. T_1, T_2, PP_1, PP_2, representan las distribuciones mensuales proyectadas de temperatura y precipitación en cada escenario RCP (ver Tabla 8 y Tabla 9)*

En el escenario de referencia se asume el escenario de cambio climático moderado RCP 4.5, y se proyectan las variables socioeconómicas teniendo en cuenta la tendencia de los últimos años. Paralelamente, se han simulado los escenarios Cambio climático,

Cambio global y Adaptación, este último incorporando estrategias para afrontar el cambio global.

Escenario de referencia. Se asume el escenario de concentración de GEI RCP 4.5, traducido para Andorra en un aumento de la temperatura media anual de 1,46ºC en el año 2050 y con una disminución en la precipitación media anual de -0,35 mm (ver distribución mensual en la Tabla 8). A nivel socioeconómico, se proyecta un aumento de población moderado del 1,18%/año (Recaño, 2021)[15], porcentaje asumido también como incremento de alojamientos turísticos. La ocupación turística se considera invariable, tanto en su distribución mensual como en el promedio anual, con un valor del 51%, basado en los últimos 10 años[16].

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
T (ºC)	1,36	0,92	1,21	1,08	1,37	2,18	1,92	2,33	1,50	1,44	1,03	1,14
PP (mm)	1,01	1,50	3,39	-4,75	-3,62	3,05	-1,90	6,10	-3,34	2,24	-2,82	-5,16

Tabla 8. Cambio en la temperatura y precipitación mensual proyectada en el año 2050 y el escenario RCP 4.5. Elaborado en base al conjunto de datos PIRAGUA (Palazón et al., 2022)*, construido a partir de un downscalling estadístico de seis modelos climáticos*

Escenario Cambio climático. Se asume el escenario de concentración de GEI RCP 8.5, traducido para Andorra en un aumento de la temperatura media anual de 2,23ºC y un aumento de la precipitación media anual de 0,72 mm en el año 2050 (ver distribución mensual en la Tabla 9). El aumento de temperatura (>2ºC) se traduce en un aumento de evapotranspiración del 10% que afecta a las necesidades de riego en la agricultura (Durán & Salamanca, 2008). En la misma línea, se ha considerado un aumento del consumo de agua para producción de nieve en las estaciones de esquí del 15% (Gerbaux et al., 2020). El resto de los atributos socioeconómicos se heredan del escenario de referencia.

[15] Basado en el escenario Central (Recaño, 2021)
[16] Comunicación personal *Unió Hotelera d'Andorra*

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
T (ºC)	1,66	1,61	1,66	2,05	2,09	3,32	2,96	2,83	2,50	2,11	2,03	1,95
PP (mm)	-5,62	7,35	3,74	-1,13	-1,89	0,41	3,11	14,55	4,38	1,75	-12,1	-5,80

Tabla 9. Temperaturas y precipitaciones mensuales proyectadas en el escenario RCP 8.5. Elaborado en base al conjunto de datos PIRAGUA (Palazón et al., 2022)*, construido a partir de un downscalling estadístico de seis modelos climáticos*

Escenario Cambio global. Se consideran las mismas condiciones que en el escenario Cambio climático con variaciones en algunas variables socioeconómicas: a) incremento de la población del 1,82%/año (Recaño, 2021)[17], b) aumento de los alojamientos turísticos del 1,82%/año y c) aumento de la ocupación turística anual hasta el 70% para el año 2050.

Escenario Adaptación. Se consideran todos los condicionantes del escenario Cambio global y un paquete de medidas adaptativas. A continuación, se detallan y justifican las estrategias de adaptación evaluadas, destinadas a reducir el uso del agua de los principales sectores consumidores del país.

- Sector doméstico
    - Disminución del consumo medio por persona que pasaría de los 220 l/persona y día actuales, a los 150 l/persona y día (objetivo definido en Govern d'Andorra (2021b) a un horizonte 2035). Esta reducción se podría conseguir a través de:
        - Elaboración de un Plan de divulgación del uso responsable del agua en Andorra, que incluiría la difusión a la población de un manual de buenas prácticas de ahorro doméstico del agua.
        - Creación de la "cuota del agua", la cual se pagaría proporcionalmente por consumo unifamiliar como referencia simbólica de concienciación ambiental.

[17] Basado en el escenario Alto

- Reducción de las pérdidas en las captaciones y transporte de agua hasta el 20%. Se asume una inversión pública en la mejora de las canalizaciones de captación y transporte de agua, y una mejora en el monitoreo y seguimiento de dichas captaciones. Se estima que estas medidas reducirían un 50% las pérdidas actuales de agua que se estiman en un 40% (Govern d'Andorra, 2021a).

- Sector turístico
  - Mejora de la eficiencia en el uso de agua que permite reducir un 25% el consumo en los alojamientos turísticos. Esta mejora se podría conseguir siguiendo las directrices del proyecto LIFE *Watsavereuse*[18] y en concreto a través de la creación y difusión de un manual de uso eficiente de agua en el sector turístico y de la implementación de una marca de garantía de buenas prácticas en el uso de agua en alojamientos turísticos de Andorra.
- Estaciones de esquí
  - Monitoreo del uso de agua para conocer en detalle los principales ámbitos consumidores en una estación de esquí y los potenciales ahorros.
  - Seguimiento continuo del espesor del manto nival para mejorar la planificación y gestión de la nieve. El espesor del manto se puede obtener mediante la instalación de equipos GNSS-RTK *(Global Navigation Satellite Systems) RTK (Real-time Kinematic)* en las máquinas pisanieves y la integración de la tecnología LiDAR *(Light Detecting And Ranging)* en vehículos aéreos no tripulados (drones) (Pons et al., 2018).

El incremento de la eficiencia en el uso de recursos hídricos destinados a la producción de nieve mediante las estrategias descritas, se estima que puede suponer una reducción de hasta el 15% en la demanda de agua dedicada a este fin (Cognard & François, 2019).

[18] Mayor detalle en https://lifewatsavereuse.eu

Durante el proyecto PIRAGUA, ambas estrategias se han implementado en dos pruebas piloto en las estaciones de Grandvalira y Vallnord con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica y económica.

- Sector agrícola
    - Reducción del 15% de la demanda de agua para riego mediante la tecnificación del riego. En concreto a la implantación de sistemas de riego más eficientes (VVAA FAO, 2008), evitando el riego por gravedad (también llamado riego a manta) y el riego por aspersión, e implementando el riego por goteo.

ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO GLOBAL

Uno de los objetivos principales de este estudio es la identificación, el análisis y la puesta en marcha de medidas de adaptación al cambio climático y al cambio global. Con este objetivo se ha trabajado en distintas líneas. Por un lado, en la identificación de posibles medidas a través de bibliografía de referencia, pero también mediante procesos participativos para captar las prioridades de la población.

Todas las medidas de adaptación finalmente implementadas y analizadas en el modelo WEAP se encuentran descritas en el apartado "Escenarios futuros" y resumidas en la Tabla 7. Estas medidas forman parte del escenario denominado Adaptación.

En paralelo al análisis teórico realizado mediante el modelo WEAP, se ha iniciado un proyecto piloto con dos estaciones de esquí andorranas con el objetivo de incrementar la eficiencia en el uso de recursos (agua y energía) de su actividad.

Identificación y percepción de estrategias de adaptación

Con el objetivo de conocer y tener en cuenta la opinión de la población andorrana en la elaboración e implantación de estrategias de adaptación al cambio global, se han organizado dos tipos de actividades participativas. Estas son clave para complementar el análisis técnico planteado en este informe y valorar la percepción social de dichas medidas.

El sumatorio de la recopilación bibliográfica sobre medidas adaptativas, el contenido de la legislación, planes y estrategias nacionales andorranas relativas al cambio climático y temas afines, y la percepción social de las medidas, es la base para definir las medidas adaptativas implantadas en el escenario Adaptación descrito previamente. Buena parte de las medidas adaptativas identificadas han sido integradas dentro del modelo WEAP para conocer su potencial a escala de país.

A continuación, se describen las dos tipologías de actividades participativas desarrolladas, la legislación consultada y el trabajo de recopilación bibliográfica.

Talleres participativos en La Nuit des Idées

En enero de 2020 se realizaron dos talleres participativos durante la sesión de *La Nuit des Idées* organizada por la Embajada francesa.

Entre las preguntas y discusiones propuestas a los asistentes, se pedía priorizar los usos del agua en un contexto de posibles tensiones entre sectores de actividad debido a una hipotética escasez hídrica. Se propusieron también una serie de medidas de adaptación basadas en gran parte en el Procés d'Adaptació d'Andorra al Canvi Climàtic (Govern d'Andorra, 2014) de las cuales se pidió el grado de acuerdo o desacuerdo.

Estas sesiones, a pesar de ser abiertas a toda la ciudadanía, contaron con participantes con un perfil principalmente técnico.

Los resultados y conclusiones de este taller se exponen en el apartado de resultados.

Encuesta en línea

A finales del año 2020, se lanzó una encuesta en línea con el objetivo de captar la percepción de la sociedad andorrana sobre el cambio climático y especialmente conocer su voluntad en la puesta en marcha de medidas de adaptación. Buena parte de las preguntas, así como las estrategias planteadas, coincidían con las realizadas en los talleres participativos. De esta manera se ha completado la visión eminentemente técnico-profesional de los talleres presenciales con la de una muestra de población más heterogénea.

Los resultados y conclusiones de esta encuesta se exponen en el apartado de resultados.

Consulta de bibliografía

Se consideran las principales publicaciones en materia de adaptación al cambio climático en los Pirineos y en las principales cordilleras europeas, en especial en los Alpes.

Legislación y estrategias en Andorra

El Gobierno de Andorra ya desde hace unos años ha desplegado varias estrategias y legislaciones en materia de adaptación al cambio climático y al cambio global. A continuación, se citan las todas las consultadas en este estudio:

- *Adhesión al Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para la implementación de los procesos relacionados con la lucha contra el cambio climático.*
- *Proceso de Adaptación de Andorra el Cambio Climático (PAACC)* (Govern d'Andorra, 2014) *para dotar al país de recursos y medidas de adaptación para convertirse en menos vulnerable a los impactos derivados del cambio climático.*
- *Estrategia Nacional de la Biodiversidad de Andorra (ENBA)* (Govern d'Andorra, 2016)*, para asegurar una acción que frene la crisis de biodiversidad en el contexto de cambio climático.*
- *Ley de Impulso a la Transición Energética y del Cambio Climático (Litecc)* (Govern d'Andorra, 2018a)*, potencia y acompaña la transición hacia un nuevo modelo energético basado en el uso de energías renovables y de energía baja en Emisiones de Carbono.*
- *Estrategia energética nacional y de lucha contra el cambio climático* (OECC, 2021) *para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático, de acuerdo con los objetivos del acuerdo de París del Convenio marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC)*

- *POCTEFA ADAPYR[19] (2020-2022) que tiene como objetivo sistematizar los seguimientos de impacto climático en los Pirineos y definir una Estrategia conjunta Pirenaica de Adaptación al cambio climático.*

Proyecto piloto. Optimización del uso de recursos en las estaciones de esquí

Uno de los objetivos de este caso de estudio es el de desarrollar herramientas y metodologías que permitan incrementar la eficiencia en el uso del agua, en las estaciones de esquí en su gestión diaria de la nieve. Esta medida de adaptación incrementa su resiliencia frente a una posible disminución del recurso hídrico. Las estrategias propuestas para las estaciones de esquí se han implementado en una prueba piloto inicial en la estación de Grandvalira con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica y económica. Los buenos resultados obtenidos en Grandvalira durante la temporada 2019-2020, han llevado a realizar una segunda prueba piloto en Vallnord la temporada 2020-2021. De esta manera durante el proyecto se ha podido obtener información representativa de los dos grandes dominios esquiables de Andorra ubicados en las cabeceras de los ríos Valira d'Orient i Valira del Nord.

Las estrategias puestas en marcha en las estaciones de esquí se centran en dos grandes líneas de trabajo, el seguimiento de espesor del manto nival y el monitoreo del uso de agua y energía.

Seguimiento del espesor del manto nival

Conocer con precisión el espesor del manto nival puede conducir a ahorros significativos en el uso de agua y energía asociada a la

[19] *Más detalles en https://ctp.org/ca/projectes/opcc/opcc-adapyr/*

producción de nieve artificial y al mantenimiento de las pistas realizado con las máquinas pisanieves. Según estudios existentes, disponer de datos precisos del espesor del manto nival puede llevar a ahorros de alrededor el 15% y el 8% en uso de agua y energía, respectivamente (Cognard & François, 2019).

Una de las técnicas utilizadas se basa en la instalación de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) RTK (*Real-time Kinematic*) en una máquina pisanieves (ver Figura 15) para medir la altura absoluta del nivel de la nieve en superficie con una precisión centimétrica (<2 cm). A posteriori, mediante el modelo digital del terreno sin nieve en alta precisión implementado con LiDAR (*Light Detecting And Ranging*) se calcula el espesor del manto.

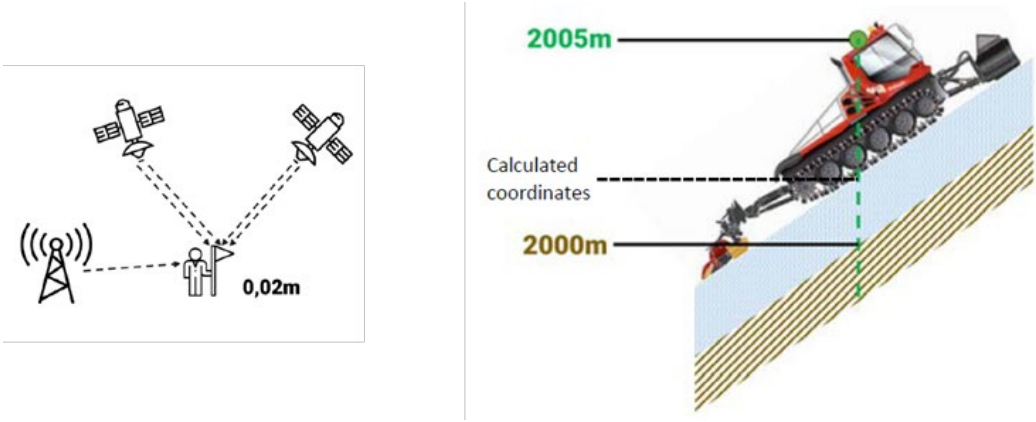


Figura 15. Medida de la altura de la nieve en superficie con GNSS-RTK

En paralelo a la instalación de equipos GNSS-RTK en las máquinas pisanieves, se ha trabajado en la integración de la tecnología LiDAR en un vehículo aéreo no tripulado (*drone*) y en su operación en las estaciones de esquí. El objetivo es que esta sea una herramienta útil y complementaria a las máquinas pisanieves para la estimación del espesor del manto nival. Esta técnica, a pesar de que la distancia recorrida por el vehículo es más limitada, permite realizar escaneos específicos y con mayor detalle en zonas de especial interés.

Monitoreo del uso de agua y energía

Paralelamente al seguimiento del espesor del manto nival, durante la temporada 2019-2020 se han monitorizado los consumos de agua y energía de la estación de Grandvalira. Conocer en detalle el consumo de agua y energía es el primer paso, y aspecto fundamental, en el objetivo de optimizar el uso de recursos.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

MODELIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SU EVOLUCIÓN FUTURA

Los efectos del cambio climático y del cambio global sobre el recurso hídrico en Andorra son determinantes, reduciendo el aporte anual de agua y modificando el hidrograma actual. Estos resultados no contemplan los efectos de los eventos climáticos extremos, como las sequías. Por tanto, es probable que los efectos sobre los recursos hídricos puedan llegar a ser aún más severos. En este sentido, las medidas adaptativas estudiadas pueden tener cierto impacto positivo especialmente en los períodos y tramos de río con caudales bajos.

Las principales estrategias de adaptación que se presentan en este capítulo van dirigidas a la implementación de caudales ambientales para proteger las funciones ecosistémicas de los ríos en los próximos años, a la modificación del comportamiento del consumo doméstico y turístico, y a la tecnificación en los sectores agrícolas y del esquí.

A continuación, se describen los resultados de la modelización para cada sector de uso del agua de Andorra. En primer lugar, se describen los diferentes usos de agua por sectores. En segundo lugar, se

desarrollan los efectos del cambio climático y del cambio global en el régimen hídrico, y seguidamente se abordan los resultados relativos a la capacidad de adaptación.

Usos del agua en Andorra

Actualmente, los usos consuntivos del agua en Andorra son de aproximadamente 21,63 hm^3 al año, y se han clasificado en doméstico, turístico, agrícola, producción de nieve y ganadero (ver Figura 16). Mientras que los usos no consuntivos son de unos 75 hm^3 al año y se refieren mayoritariamente a la producción hidroeléctrica.

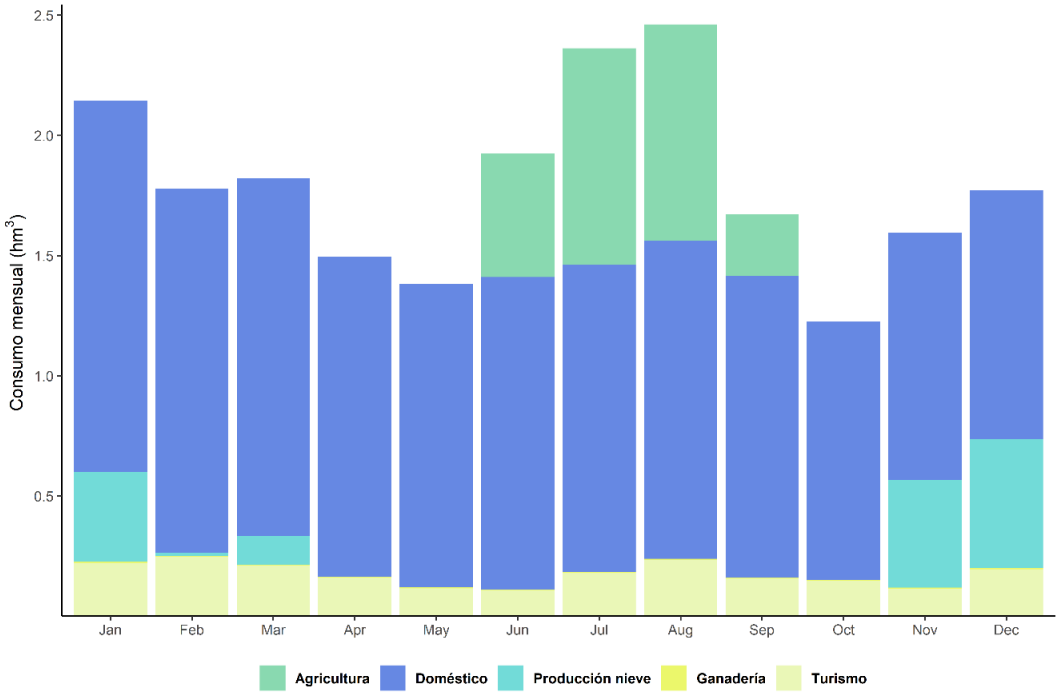


Figura 16. Demanda mensual de agua en Andorra en los principales sectores de actividad

Entre los usos consuntivos, el destinado al sector doméstico es el predominante en Andorra (72,29%) que, tal como se observa en la Figura 16, es prácticamente constante a lo largo del año. El uso destinado a alojamientos turísticos y al centro termal Caldea

representa el 11,48% del total de uso hídrico de los sectores económicos del país y es superior en los meses de invierno y verano. Por el contrario, el consumo para uso agrícola se ciñe a los meses donde acontece el desarrollo vegetativo efectivo en los valles pirenaicos (de junio a setiembre), ocupando el tercer lugar en uso de agua (9,31%). El consumo de agua en las estaciones de esquí se concentra en los meses invernales, teniendo en cuenta que generalmente los meses de noviembre y diciembre se forma la base de nieve artificial y entre enero y marzo se aporta un refuerzo que permite completar la temporada. Este representa el 6,67% del uso total de agua del país. El uso de agua destinado a la gestión ganadera es bajo en Andorra (0,22%), debido a una actividad más extensiva que intensiva del ganado, excluyendo explotaciones que solicitan alta demanda de agua de forma concentrada en el territorio.

El uso con mayor demanda de agua en Andorra es el hidroeléctrico que, aunque sea considerado como no consuntivo, supone de media anual un aprovechamiento de 75 hm^3, principalmente procedente del río Valira d'Orient. Este aprovechamiento se traduce en una producción eléctrica media anual aproximada de 85 GWh gracias a la central hidroeléctrica de Encamp y a una pequeña aportación de las minicentrales de Arcalís i Aixovall. Actualmente, la hidroeléctrica aporta el 75% de la producción eléctrica nacional que, a su vez, representa el 20% de la electricidad usada en Andorra.

La reciente Ley de Impulso de la Transición Energética y del Cambio Climático (Litecc) (BOPA, 2018) expresa la voluntad de aumentar la producción eléctrica nacional como mínimo hasta el 50% en el año 2050 asegurando un porcentaje de fuentes renovables no inferior al 75%. Este compromiso exige promover la introducción de nuevas instalaciones de producción eléctrica renovable, siendo identificada la tecnología hidroeléctrica como la de mayor potencial en el PSIEA (Govern d'Andorra, 2018b). En este contexto, prever posibles cambios futuros en la disponibilidad del recurso se presenta clave para la gestión hídrica y energética.

Efectos del cambio climático y el cambio global en el régimen hídrico

El régimen hidrológico de Andorra es el típico de una zona de montaña de influencia mediterránea con régimen nival, el cual presenta caudales altos en primavera y bajos en estiaje con una ligera aportación procedente de las precipitaciones en otoño. Los resultados obtenidos de la modelización muestran que el hidrograma actual cambiará en los próximos años debido al cambio climático (ver Figura 17). En líneas generales, se espera una disminución del caudal anual concentrada especialmente entre finales de primavera y verano. El cambio de patrón en el hidrograma está también asociado al cambio en el régimen de nevadas. La precipitación sólida decaerá debido al aumento de temperatura y, por consiguiente, la escorrentía instantánea durante los meses de invierno será significativamente mayor.

El escenario de referencia presenta una pérdida de caudal medio anual del 8,87% respecto a la actualidad, mientras que el escenario de Cambio climático presenta una ligera disminución, un poco por debajo del de referencia (6,80%). Las disminuciones de caudal, entre el escenario Cambio climático y el Actual, se concentran durante los meses de mayo a setiembre (-17,73%) y se prevén pequeños incrementos el resto de los meses (14,87%). Los caudales en el escenario Cambio global siguen ligeramente por debajo de los del escenario Cambio climático.

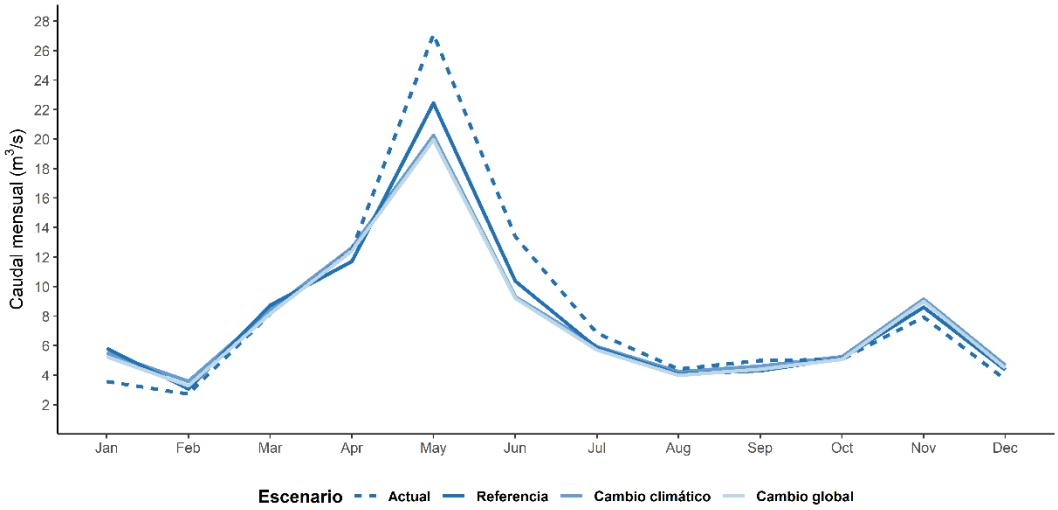


Figura 17. Evolución mensual del caudal en la salida de la cuenca de Andorra (Borda Sabaté) en el año 2050 en el escenario Actual y en los escenarios Referencia, Cambio climático y Cambio global

Estos resultados apuntan que el incremento de temperatura en el futuro producirá un aumento de la ratio agua/nieve, un avance del deshielo y, en definitiva, un aumento de la escorrentía superficial en los meses de invierno. Durante estos meses aumentará el caudal en detrimento del caudal a finales de primavera y verano, donde será significativamente menor. Estos resultados son acordes con los proporcionados por estudios en cuencas de régimen nival (Birsan et al., 2005; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Wilson et al., 2010).

Es importante resaltar que la modelización presentada se basa en modelos climáticos con incrementos aditivos en los valores de temperatura y precipitación, en este caso basados en el proyecto CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020). Por tanto, no se han tenido en cuenta el aumento de eventos climáticos extremos como la sequía, que se estima que podrían agravar los caudales bajos en épocas estivales.

Afectaciones del cambio climático y el cambio global a las funciones ecosistémicas

La planificación y la gestión de las cuencas hidrológicas debe incorporar los escenarios futuros de cambio climático y las medidas adaptativas. Uno de los objetivos clave es el de hacer compatible los diferentes usos del agua y plantear el aumento de las infraestructuras de producción hidroeléctrica asegurando el mantenimiento de la calidad ecológica del río, y a ser posible, promover una tendencia de la mejora en el tiempo.

El mantenimiento de la calidad ecológica de los ríos es una de las garantías de desarrollo sostenible de cualquier país. Uno de los instrumentos previstos por la *Directiva Marco del Agua 2000/60/CE* son los programas de seguimiento y control del estado de los ríos y de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. La mayoría de los países controlan la calidad de los ríos a través de la implantación de caudales ambientales. En este sentido, en Andorra existe el Reglamento de Protección de los Hábitats Acuáticos (en adelante, RPHA) (BOPA, 2005) que regula los caudales mínimos i define el caudal ambiental. El RPHA considera que el caudal mínimo ecológico es la décima parte del caudal medio interanual, mientras que considera el caudal ecológico como "el caudal necesario para garantizar la evolución biológica natural de las poblaciones de flora y fauna acuáticas", no obstante, no se detalla su cálculo o sus valores.

En los ríos de Andorra, así como en el resto de ríos de cabecera de los Pirineos, un régimen de caudales por debajo del límite ambientalmente aceptable supone la pérdida de las funciones ecosistémicas (Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Arnett, 1976). En este contexto, se esperan retrocesos o pérdidas de especies autóctonas. Este podría ser el caso de la trucha común (*Salmo trutta*), que necesita como mínimo una profundidad de río de 40 cm

para mantener la población adulta de forma estable en el tiempo (Lewis, 2006). Con caudales por debajo del límite ambiental también se espera una pérdida en la calidad del agua, pudiendo en determinados periodos, quedarse estancada, aumentando su temperatura, su concentración en nitritos y nitratos, y disminuyendo la concentración en oxígeno, afectando a numerosas especies de fauna y flora, y a la calidad propia del agua. Este caso se ve agravado cuando los caudales bajos suceden en verano ya que las temperaturas ambientales son más elevadas. Existen muchos otros efectos y ejemplos de la pérdida de las funciones ecosistémicas en este tipo de ríos (pérdida de la calidad de agua para uso humano, pérdida de resiliencia del ecosistema, etc.) (Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Tennant, 1976).

Los caudales mínimos definidos en el RPHA (10% del caudal interanual) no aseguran las funciones ecosistémicas de los ríos (Alcazar Montero, 2007; Arnett, 1976; Diaz et al., 2003; Tennant, 1976; Velychko & Dupliak, 2021). Por tanto, es necesario definir y aplicar unos caudales ambientales específicos más conservadores, por tramos de río, que incluyan estudios y seguimientos ambientales debidamente validados, y representen la variabilidad natural del río.

Debido a que la disponibilidad de datos ambientales y biológicos no es evidente, ni tampoco el número y la representatividad de estaciones de aforo con series significativas de datos, generalmente se recurre a cálculos hidrológicos como los percentiles. Un ejemplo son los propuestos en el PSIEA (Govern d'Andorra, 2018a), basados en el método de Tennant (Tennant, 1976). Otro método hidrológico más robusto, extendido y representativo, es el método basado en el cálculo de las medias de los mínimos de las medias móviles, denominado QBM o *Basic Flow Method* (Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Alcázar, 2012; Alcazar Montero, 2007; Arnett, 1976), con adaptaciones a la variabilidad estacional propia de cada río.

A falta de caudales ambientales más robustos, en este informe se ha valorado el cumplimiento de los caudales ambientales fijados en el

PSIEA, que propone los siguientes porcentajes estacionales de retención de caudal:

- *20% del caudal medio interanual (de octubre a marzo)*
- *40% del caudal medio interanual (de abril a septiembre)*

En el apartado Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua se valora la consecución de los caudales ambientales, observando que en el futuro se agravará su incumplimiento especialmente en los meses de verano.

Afectaciones del cambio climático y el cambio global al sector hidroeléctrico

Las centrales hidroeléctricas se prevén esenciales para acompañar la transición energética. En el caso de Andorra, la principal central hidroeléctrica se sitúa en Encamp y supone alrededor del 15% de la producción nacional de energía (OECC, 2021). Se basa en un sistema de lagos regulados de alta montaña y de canales que transportan el agua hacia el lago de Engolasters. Adicionalmente, existen dos minicentrales de agua fluyente (en Arcalís y Aixovall) y el PSIEA proyecta cuatro más a implementar antes del año 2030. En este sentido, el estudio de las afectaciones del cambio climático en la producción hidroeléctrica, en el caudal y en las funciones ecosistémicas de los ríos se presenta clave para desplegar las estrategias de adaptación más adecuadas.

En este caso de estudio se ha observado que el régimen de caudales se verá modificado por el aumento de la precipitación líquida en invierno y por el adelanto de la fusión de la nieve. Esta situación ha sido ya descrita en distintos estudios realizados a escala de los Pirineos y los Alpes (Brunner et al., 2019; OPCC-CTP, 2018).

Los escenarios de cambio climático estudiados en Andorra prevén una modificación en la capacidad de producción hidroeléctrica. La Figura 18 presenta la producción eléctrica mensual estimada en la central de Encamp el año 2050 en los distintos escenarios analizados.

El escenario Referencia prevé un incremento de la producción media de energía hidroeléctrica anual del 2% para el año 2050, mientras que el aumento en el escenario Cambio global es algo más acentuado (2,4%). La diferencia positiva entre el escenario Cambio global y la actualidad es especialmente significativa en los meses de enero, febrero y marzo (40,9%). Este incremento es consecuencia de la mayor disponibilidad de recurso durante los meses de invierno. En cambio, existe un periodo donde los caudales se prevé que disminuirán afectando también a la producción hidroeléctrica. La menor disponibilidad de caudal no llegaría a penalizar la producción en mayo ya que este es un periodo en el que, en la central hidroeléctrica de Encamp, no se aprovecha la totalidad del recurso disponible debido a los caudales significativamente elevados de este periodo y la baja capacidad de almacenaje de agua de Andorra (lago-embalse de Engolasters). Por contra, la reducción de caudal a principios de verano penaliza la producción, en especial durante los meses de junio y julio, y con mayor intensidad en el escenario Cambio global (-25,86%).

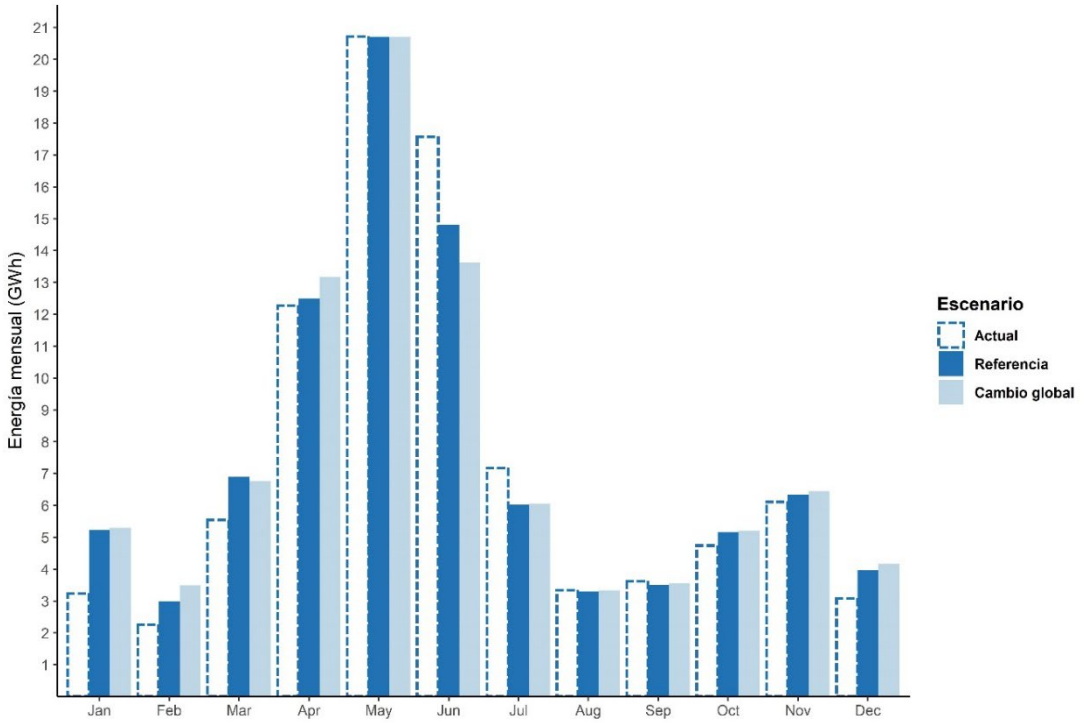


Figura 18. Energía producida en la central hidroeléctrica de Encamp en los escenarios Actual, Referencia y Cambio global el año 2050

Aunque la importante disminución de caudal en primavera no tiene gran influencia en la capacidad de producción, la disponibilidad de agua en este periodo para reservar en los lagos de alta montaña va a ser inferior y, por tanto, la gestión del almacenaje de agua se verá alterada. En este sentido, la capacidad de regulación de los almacenajes de agua en zonas de montaña será clave para gestionar la producción hidroeléctrica y hacerla compatible con la conservación de los caudales ambientales. Esto dependerá de cada región y de su capacidad de almacenaje, que en el caso de Andorra es baja.

Los resultados expuestos en esta sección están en línea con los obtenidos en países del centro i norte de Europa (Adamovic & Després, 2020). Es importante destacar que estos se basan en la proyección de un año tipo y, por tanto, el impacto sobre la producción

hidroeléctrica del posible incremento de periodos de sequía (Van Vliet et al., 2016) queda fuera del alcance del presente estudio.

Afectaciones del cambio climático y el cambio global en un tramo de río con alta competencia por el agua

Se ha analizado uno de los tramos que podría presentar conflictos en el uso del agua debido a una alta convergencia de usos de distintos sectores. Se trata del tramo entre la presa de Ransol y la confluencia del río Valira d'Orient y el torrente de Plamanera (*Figura 19*), justo antes del retorno de agua de la central hidroeléctrica al río. Este tramo, de unos 11,5 km de longitud, se ve afectado por las tres desviaciones de agua de la central hidroeléctrica de Encamp hacia Engolasters. Además, en el mismo tramo existen dos poblaciones con un importante consumo de agua (Canillo y Encamp), usos turísticos y agrícolas y, aguas arriba, las captaciones destinadas a la producción de nieve de la estación de esquí de Grandvalira.

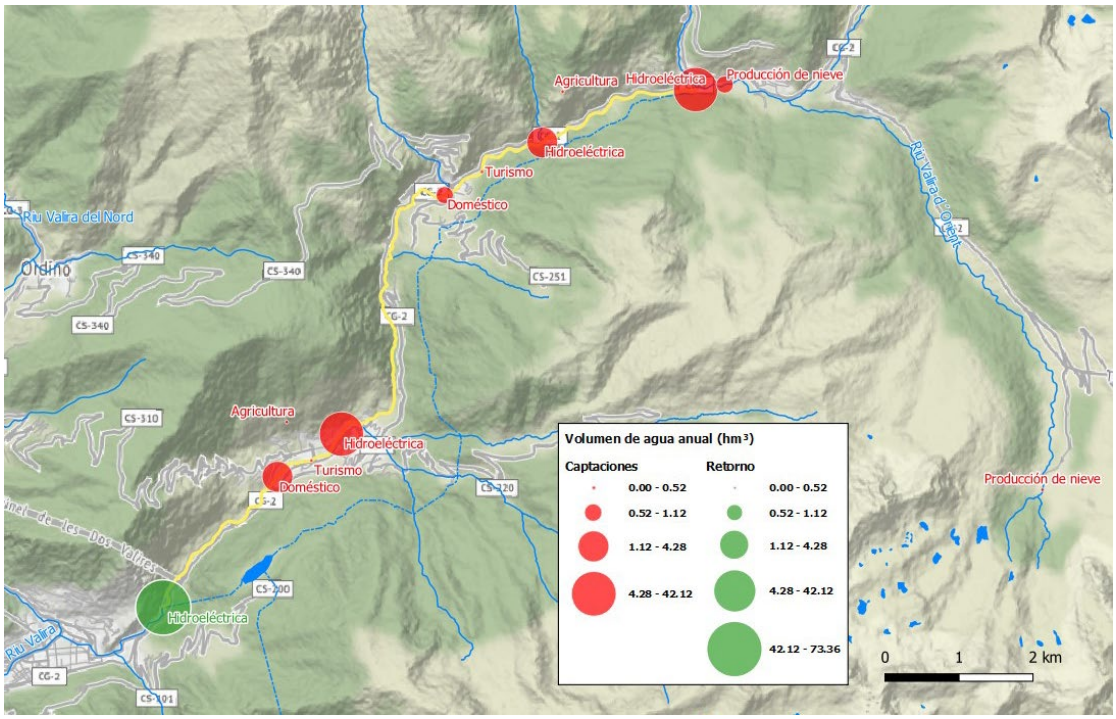


Figura 19. Localización del tramo de río con alta competencia por el agua, entre Ransol i Escaldes-Engordany

Según la modelización realizada, a excepción de los meses de enero y febrero, se cumplen los caudales mínimos ambientales fijados en el RPHA (10% del caudal interanual) en el nodo previo al retorno de agua de la hidroeléctrica. Por el contrario, los caudales ambientales fijados por el PSIEA no se cumplen durante la mayor parte del año.

Los resultados de los escenarios futuros apuntan a una reducción general del caudal anual en el horizonte 2050. En este sentido, la disminución del caudal se concentra entre los meses de abril y octubre, mientras que de enero a febrero y de octubre a diciembre se prevé un ligero aumento (ver Figura 20). El incremento de caudal previsto en invierno permite acercarse al caudal ambiental fijado en el PSIEA durante enero, sin llegar a conseguirlo en febrero. El descenso del caudal anual en el escenario de referencia es del 9,57% respecto a la actualidad. El descenso de caudal en el escenario Cambio global es de 2,9 m^3/s, representando una reducción del 15,26% respecto a la actualidad, mientras que en el Cambio climático es de 2,18 m^3/s (-11,46%).

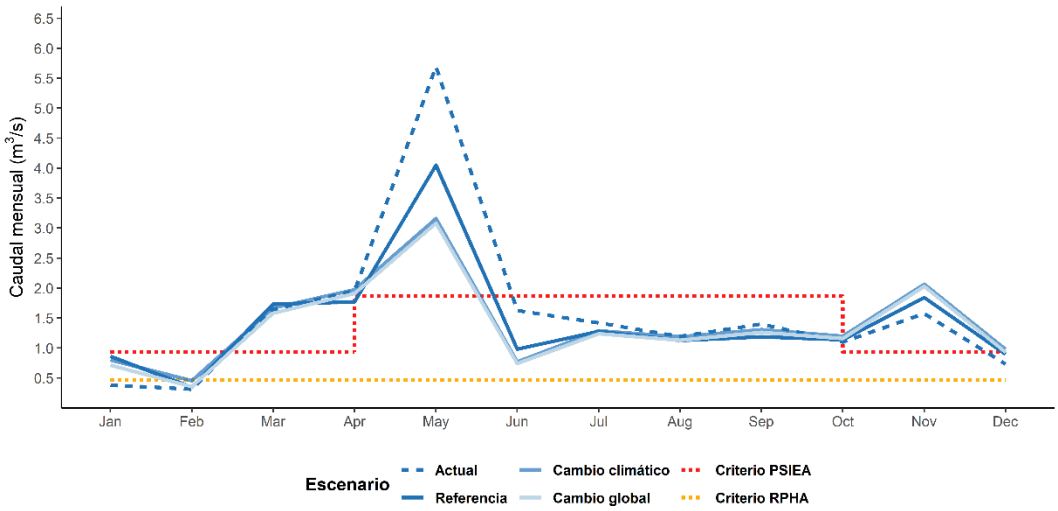


Figura 20. Caudal mensual en el año 2050 en el nodo previo al retorno de agua de la central hidroeléctrica (coordenadas EPSG:27563: 536028, 24948) y en los diferentes escenarios analizados. En rojo se proyecta el límite de caudal ambiental propuesto por el PSIEA y en amarillo el caudal mínimo ecológico reglamentario del RPHA

Tal como se observa en la Figura 20, en el escenario Cambio global, el periodo de abril a julio es el que presenta una disminución de recurso más acentuada (29,53% respecto a la actualidad). La disminución durante los meses más cálidos del año es más crítica ya que la temperatura del agua de los ríos en el periodo veraniego es más elevada, agravando las condiciones bioquímicas y térmicas de las aguas de caudal bajo y afectando directamente al hábitat y a sus seres vivos. En junio, el caudal actual modelizado es de 1,62 m^3/s mientras que en el escenario Cambio global disminuye hasta 0,74 m^3/s (reducción del 54%), ambos por debajo del límite del caudal ambiental fijado en el PSIEA (1,85 m^3/s)[20].

Según los resultados de la modelización, actualmente entre los meses de junio y octubre no se cumple el caudal ambiental fijado en el PSIEA. Precisamente en estos meses, todos los escenarios futuros pronostican que los valores de caudal aún se alejarán más de los establecidos por el PSIEA como caudal ambiental. En cambio, durante los meses de invierno, el incremento previsto de caudal en el horizonte 2050 facilitará el cumplimiento de los valores propuestos por el PSIEA. Febrero es el mes que presenta menor caudal, periodo en que este representa en todos los escenarios menos de la mitad del requerido por el criterio ambiental fijado en el PSIEA.

Es importante remarcar que hasta la fecha no se ha estudiado ni determinado para Andorra ningún régimen de caudales ambientales específicos para sus ríos teniendo en cuenta estudios precedentes, datos de seguimiento ambiental y cálculos hidrológicos robustos como el cálculo de las medias de los mínimos de las medias móviles o QBM (Agencia Catalana de l'Aigua, 2006; Alcazar Montero, 2007; Arnett, 1976). Esta propuesta de caudales ambientales permitiría

[20] El caudal ambiental fijado en el PSIEA se ha calculado a partir de las medias del caudal interanual a diferentes tramos de río, obtenidas por restitución de series climáticas y balance hídrico, y no a partir de un modelo hidrológico como en el presente trabajo.

zonificar por tramos los ríos de Andorra teniendo en cuenta sus particularidades.

Estas perspectivas futuras de disminución de caudal (sin tener en cuenta las sequías), y en especial en tramos de alta competencia por el agua como el descrito, refuerzan la necesidad de estudiar, valorar y desplegar una estrategia integral de adaptación al cambio climático que compatibilice la conservación de las funciones ecosistémicas de los ríos y la transición energética a la que se ha comprometido el país. Esta estrategia debería regular los caudales ambientales, integrando la conservación de los sistemas riparios y, por consiguiente, de sus funciones ecosistémicas. A su vez, la regulación de los caudales ambientales permitiría disponer de unos criterios robustos a aplicar en el desarrollo de nuevas instalaciones de aprovechamiento hidroeléctrico.

Balance hídrico, flujos hídricos y variables de estado

WEAP permite detectar cambios en el volumen mensual de agua en los diferentes compartimientos donde se encuentra el agua en una cuenca (flujo de base, escorrentía, precipitación, formación de nieve, volumen de agua en el suelo, etc.), que son los flujos hídricos o las variables de estado. Por tanto, se pueden estimar los diferentes elementos del balance hídrico y evaluar los cambios en cada cuenca y entre los diferentes escenarios.

A continuación, se resumen los resultados de algunas variables de interés para conocer la situación actual y las tendencias futuras en el ciclo de agua en las cuencas de grado dos de Andorra.

Principales variables climáticas: precipitación y temperatura

Presentamos a continuación los mapas de precipitación y temperatura usados como entradas del modelo WEAP. En ambos casos se trata de los mismos datos extraídos de los ráster con un tamaño de celda de 90 m interpolados a partir de los datos de las estaciones meteorológicas del área de influencia de Andorra para el período de 1981-2010.

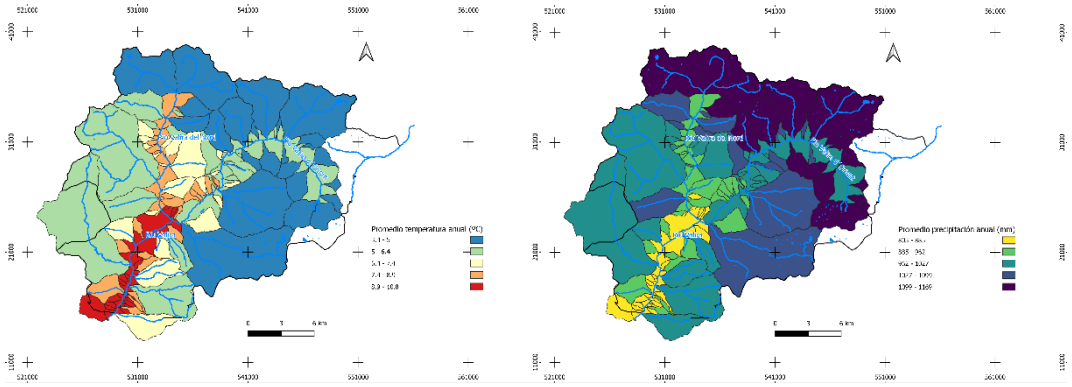


Figura 21 y 22 . Temperatura media anual (ºC) y precipitación media anual (mm) en el periodo 1981-2010 en las cuencas estudiadas

Se observa (Figura 21), como es de esperar, que las subcuencas más elevadas presentan temperaturas medias más bajas que las subcuencas más bajas. En la Figura 21, se ve claramente, como sucede en otros valles pirenaicos, que llueve más en las cuencas occidentales y septentrionales, que en las cuencas orientales y meridionales.

Flujos hídricos

A continuación, se presentan las variables de flujos simulados por WEAP en el periodo de referencia (1981-2010) y los cambios esperados en el escenario de Cambio climático en el año 2050.

Escorrentía y caudal superficial de las cuencas

Los valores totales de escorrentía generados por el modelo WEAP en Andorra (328,77 mm) son ligeramente inferiores a los resultados del modelo SWAT implementado en PIRAGUA para todo el Pirineo, que presenta valores entre 400 y 600 mm (Quintana-seguí et al., 2022). La distribución espacial de la escorrentía sigue el patrón esperado, con valores superiores en las cuencas de mayor altitud, y en las orientales (Figura 23).

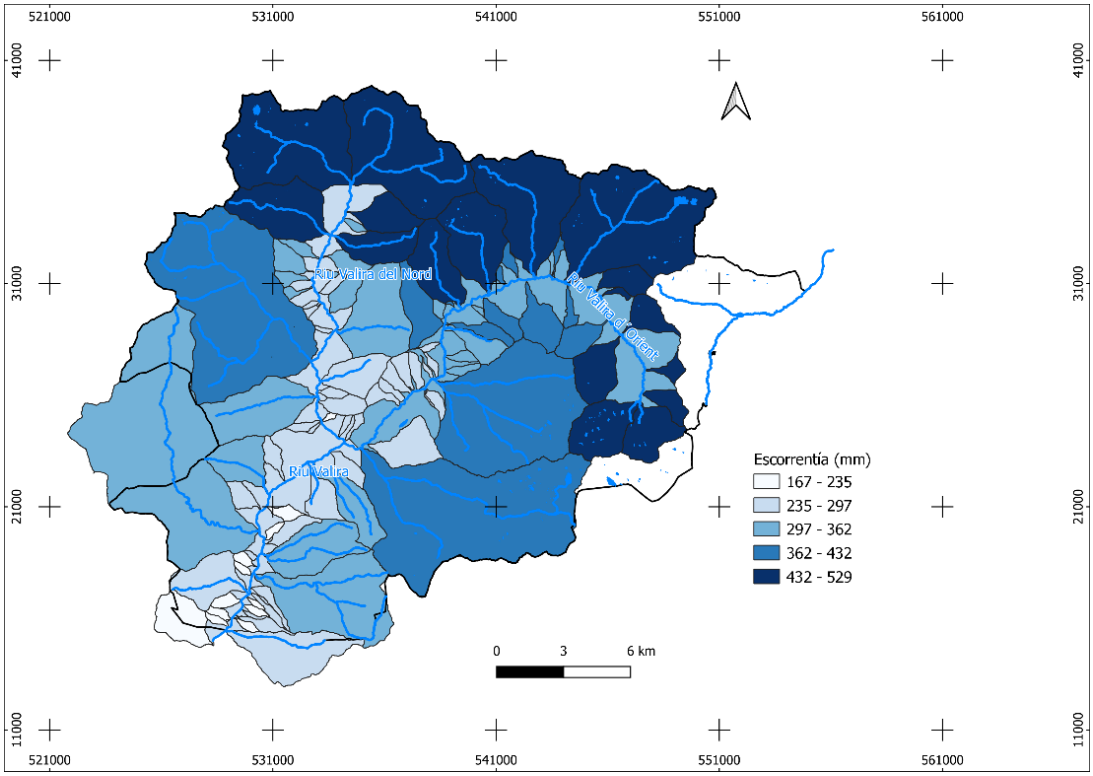


Figura 23. Generación anual de escorrentía modelizada en el periodo de referencia 1981-2010

La escorrentía, más los flujos de percolación del agua en el suelo, son los responsables de generar el caudal superficial. En este sentido, las aportaciones anuales actualmente oscilan entre los 0,003 y los 21,62

hm^3, siendo estos volúmenes de agua ligeramente proporcionales a la superficie de la cuenca (ver Figura 24).

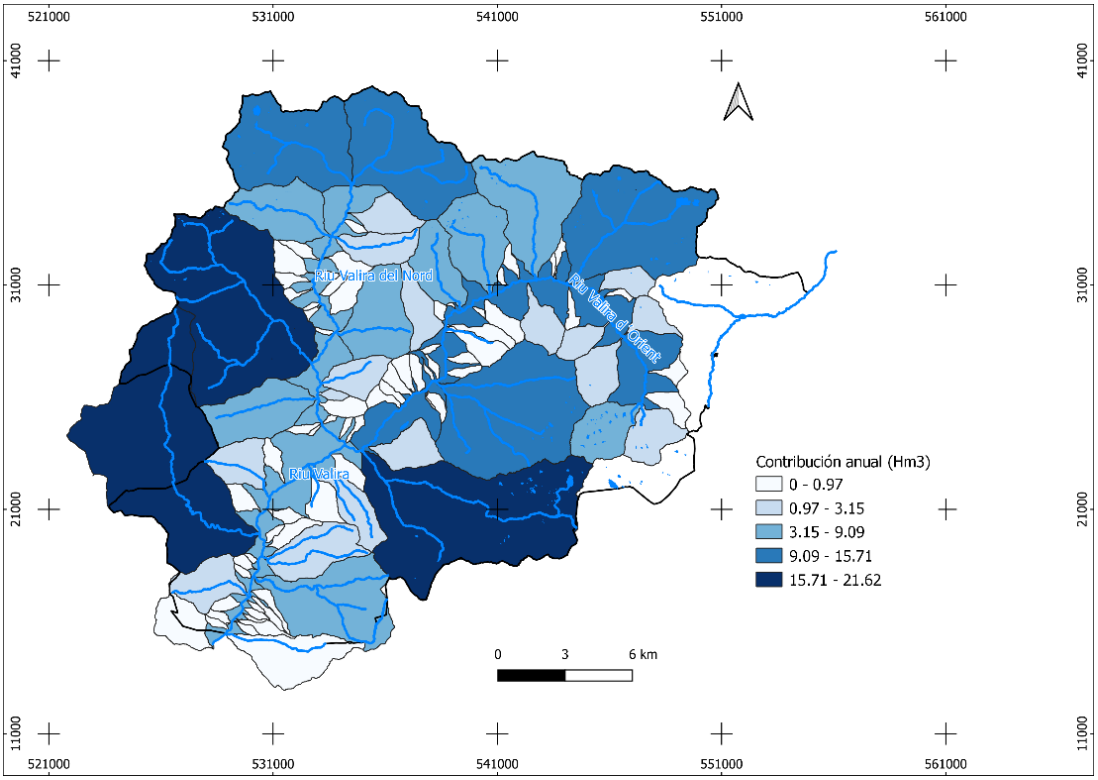


Figura 24. Contribución anual de caudal superficial modelizada en el periodo de referencia 1981-2010 (hm^3)

En los escenarios futuros se prevé una disminución del caudal acorde con los resultados ya expuestos en los apartados anteriores. En este sentido, la disminución de caudal prevista en el escenario Cambio climático tiene una transferencia directa sobre el caudal superficial generado en cada cuenca de grado dos. En concreto, se puede observar una pérdida de entre el 2,1 y el 7% del caudal superficial en el escenario Cambio climático en el año 2050 respecto a la actualidad (ver Figura 25).

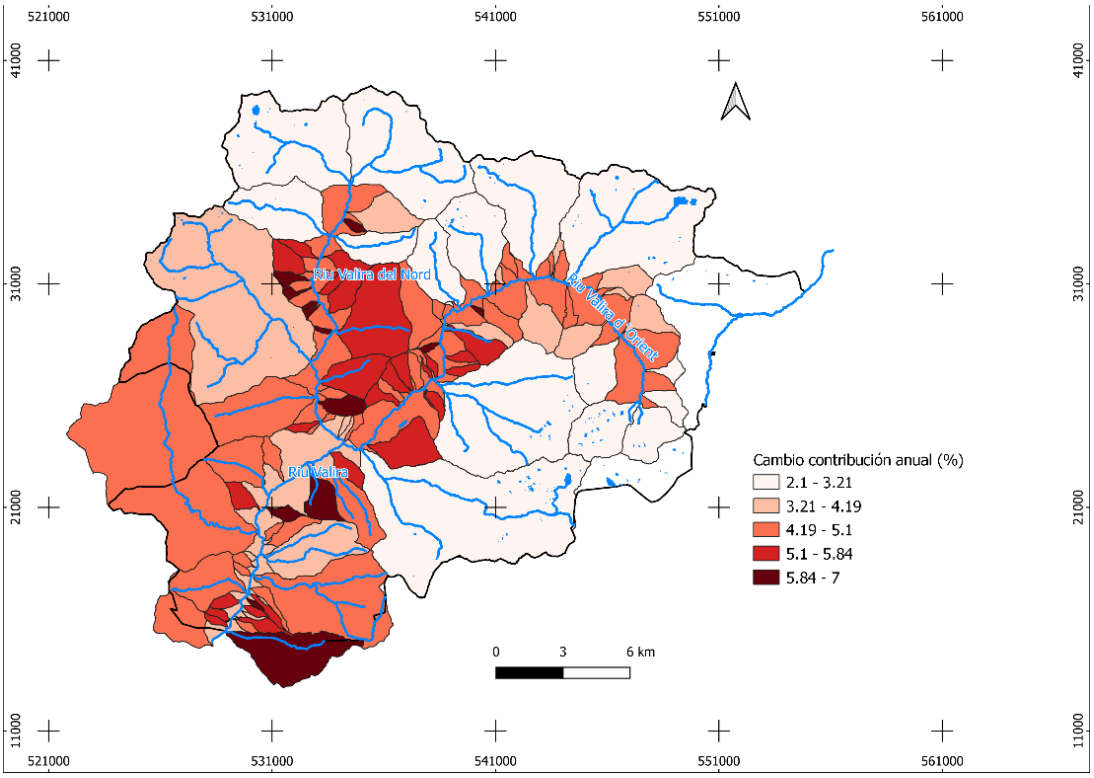


Figura 25. Cambio (disminución) modelizado en el caudal superficial (%) en el año 2050 (escenario Cambio climático respeto el periodo de referencia 1981-2010)

Fusión de nieve

En la Figura 26 se presenta el flujo de deshielo (fusión de la nieve). El modelo, lógicamente, produce mayor deshielo en las zonas más elevadas del dominio en contraposición a las cuencas de fondo de valle o más meridionales. Los valores oscilan entre los 33,97 y los 331,58 mm, siendo el 133,53 mm el valor promedio de las cuencas estudiadas.

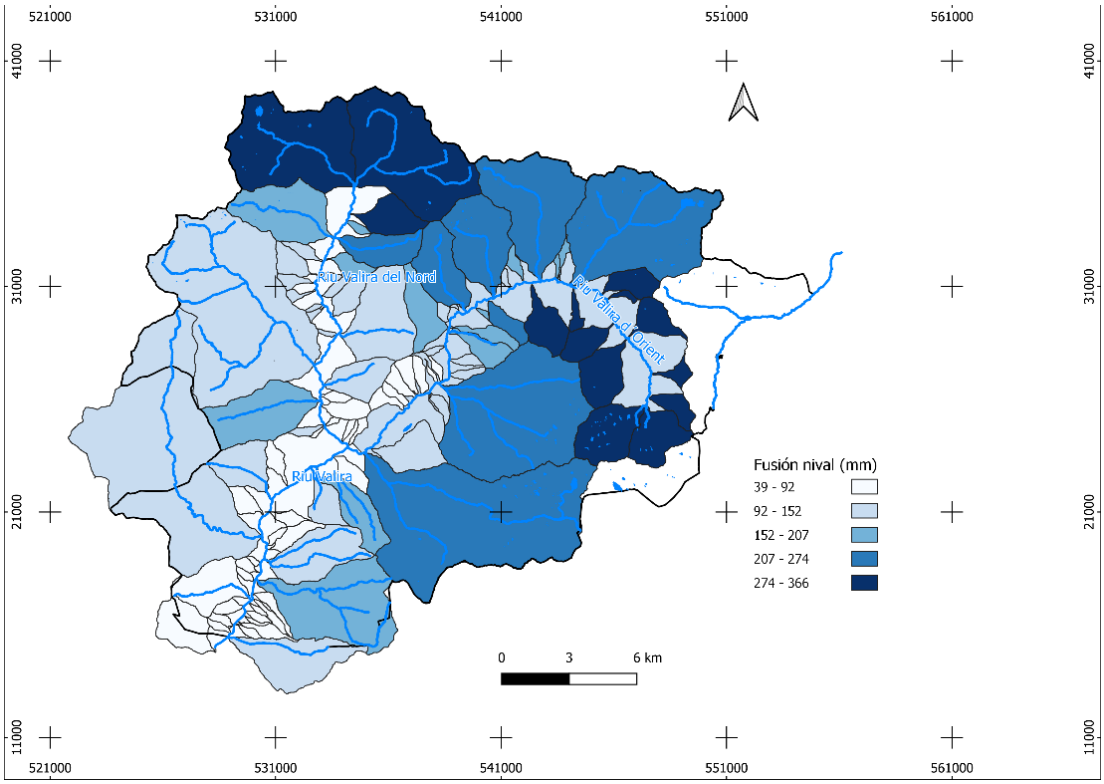


Figura 26. Fusión nival media anual modelizada en el periodo 1981-2010

Evapotranspiración

La variable evapotranspiración, tanto real (ET) como potencial (ETP), es difícil de estimar y tiene asociado un grado de error destacable. No obstante, WEAP permite su cálculo con el método de Penman Monteith (Etapa, 2006), uno de los más usados, reconocidos y recomendado por la FAO.

El mapa de evapotranspiración real media (Figura 27) muestra un patrón de distribución espacial, donde toma valores superiores en las cuencas de menor altitud, de mayor tamaño y con influencia occidental y meridional.

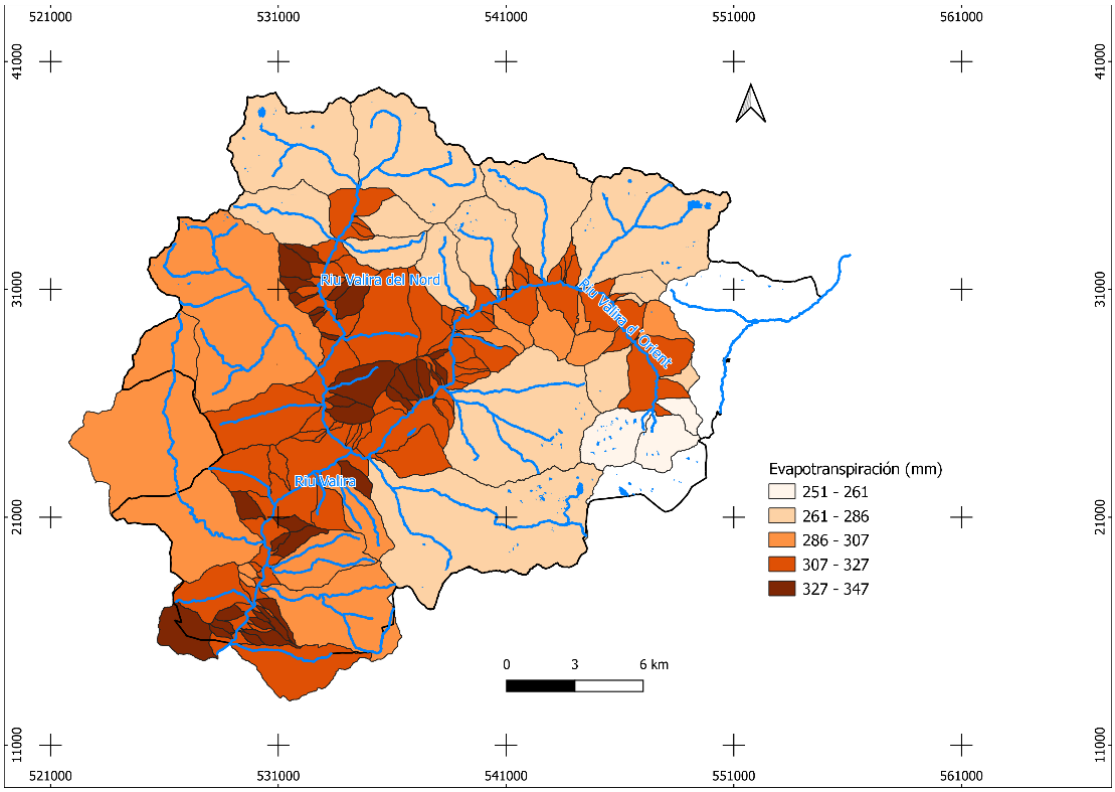


Figura 27. Evapotranspiración media anual modelizada en el periodo 1981-2010

El intervalo de valores obtenido (251-347 mm) es coherente con otros estudios en los Pirineos (Quintana-seguí et al., 2022). Los valores son un rango inferior a los obtenidos en el informe "*Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídric d'Andorra"* (Govern d'Andorra, 2020b). Cabe destacar que el método de cálculo de la evapotranspiración (ET) difiere en ambos informes, siendo el de *Penman Monteith* el utilizado por el WEAP, y el de Thornthwaite el utilizado en el citado informe.

Si se compara la ET obtenida en el periodo de referencia (1981-2010) y en el escenario Cambio climático, se observa como esta augmenta de promedio un 8,81%, siendo las cuencas orientales y las de más altitud, las que podrán tener aumentos más acusados (Figura 28).

Este aumento es debido a la respuesta del incremento de temperatura proyectado en los escenarios de cambio climático.

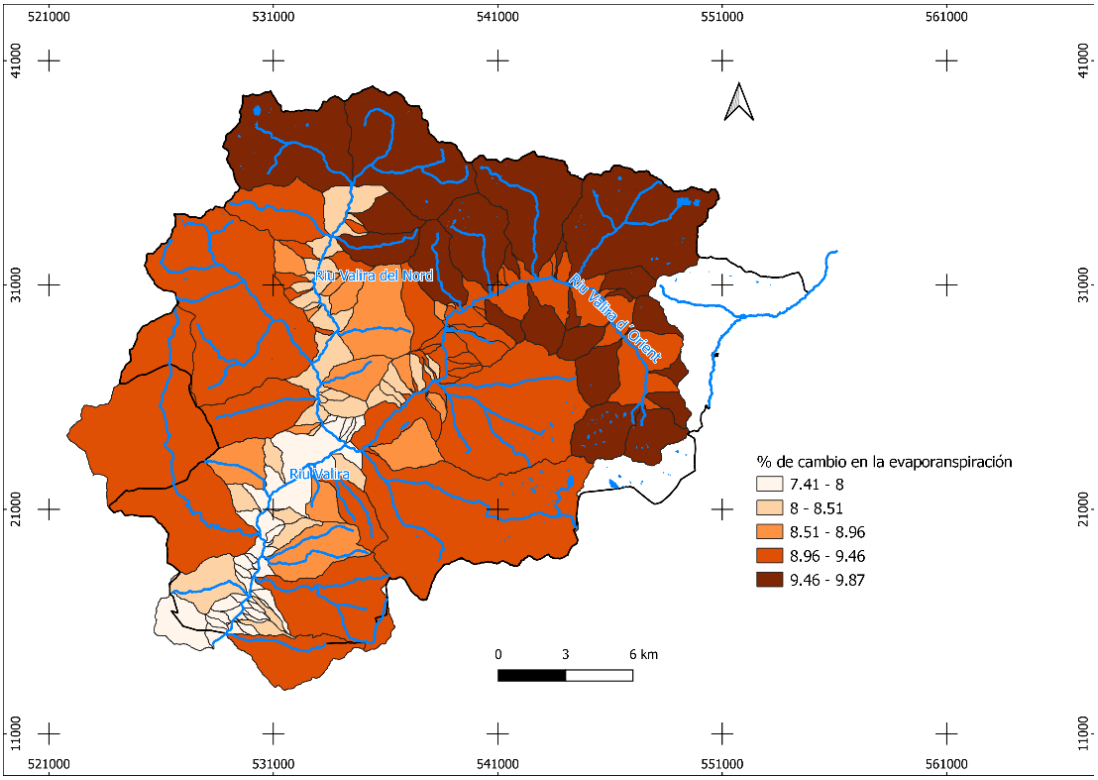


Figura 28. Cambio en la evapotranspiración modelizado en el año 2050 y en escenario de Cambio climático respeto al periodo de referencia 1981-2010

Balance hídrico

El balance hídrico se puede obtener como la diferencia entre la precipitación anual y la demanda atmosférica de humedad. Este balance aporta información para conocer el grado de humedad o aridez del clima. En el caso del Pirineo, el balance hídrico climático es eminentemente positivo indicando ausencia de aridez y un claro excedente hídrico, con valores que superan los 1000 y los 1500 mm anuales en un amplio sector (Quintana-seguí et al., 2022), sobre todo cerca de la divisoria y en la vertiente norte. En esta estimación calculada en el proyecto PIRAGUA se observa como Andorra se estima como una sola cuenca y con un balance hídrico alrededor de los 500 mm (Figura 29).

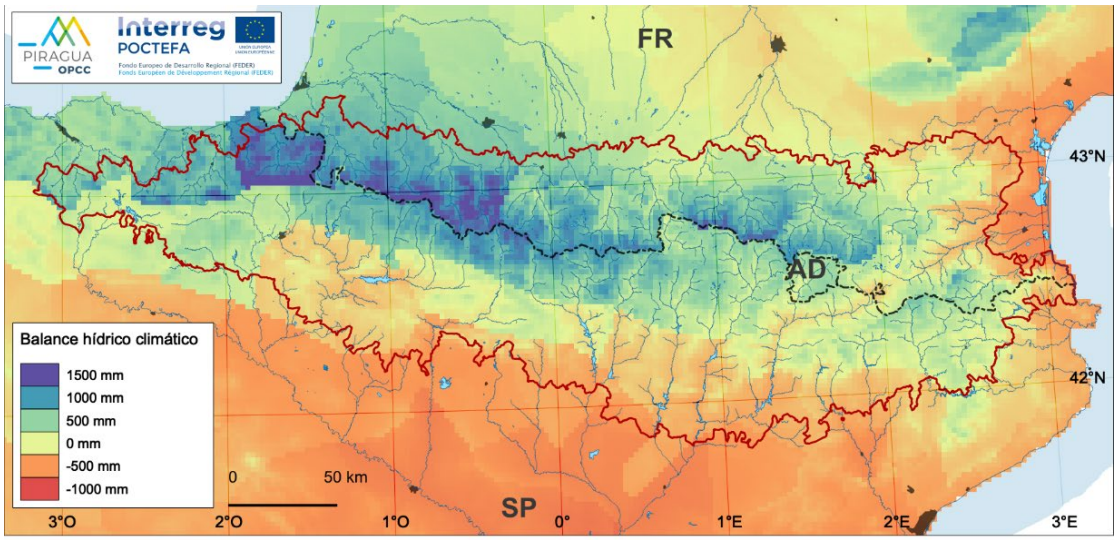


Figura 29. Balance hídrico climático (precipitación anual menos evapotranspiración potencial anual), promedio para el periodo 1981-2010. (Fuente: SAFRAN-PIR, 2021, extraído del proyecto PIRAGUA[21])

WEAP permite calcular el balance hídrico como la diferencia entre la precipitación media anual y la evapotranspiración media anual (ET[22]) de Andorra. Por ejemplo, y en el periodo de referencia (1981-2010), para la media anual andorrana, se obtiene un balance positivo de 678,46 mm, siendo la precipitación media de 988,35 mm, y la ET de 309,88 mm.

La distribución geográfica del balance muestra valores superiores en las cuencas de mayor altitud y más septentrionales (Figura 30), siendo esta distribución espacial muy similar a la del informe titulado "*Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídric d'Andorra"* (Govern d'Andorra, 2020b).

[21] Pendiente de publicación
[22] WEAP calcula la ET a partir de Penman Monteith

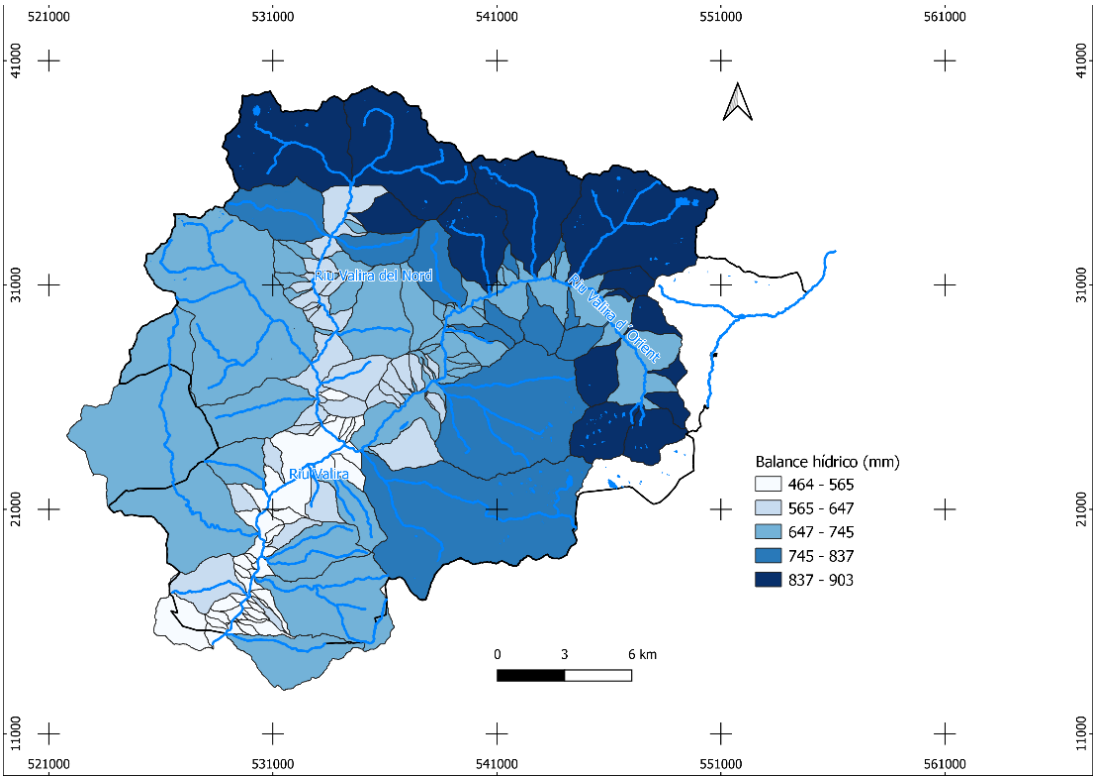


Figura 30. Balance hídrico modelizado en el periodo de referencia 1981-2010, precipitación menos evapotranspiración

Es importante añadir que la evapotranspiración es el flujo más complejo de validar, ya que presenta una elevada variación entre los diferentes modelos y metodologías de cálculo, y además existe muy poca información sobre datos de campo observados.

Variables de estado

Paquete nival (snow water equivalent)

Esta variable de estado corresponde al almacén de agua en forma de nieve (Figura 31). Los resultados de esta variable en WEAP se mantienen dentro del intervalo estimado con SWAT (100-500 mm), para cuencas principales del Pirineo (Quintana-seguí et al., 2022). Como cabe esperar, el factor altitud es relevante, incrementando la cobertura de nieve en las cuencas de más altitud.

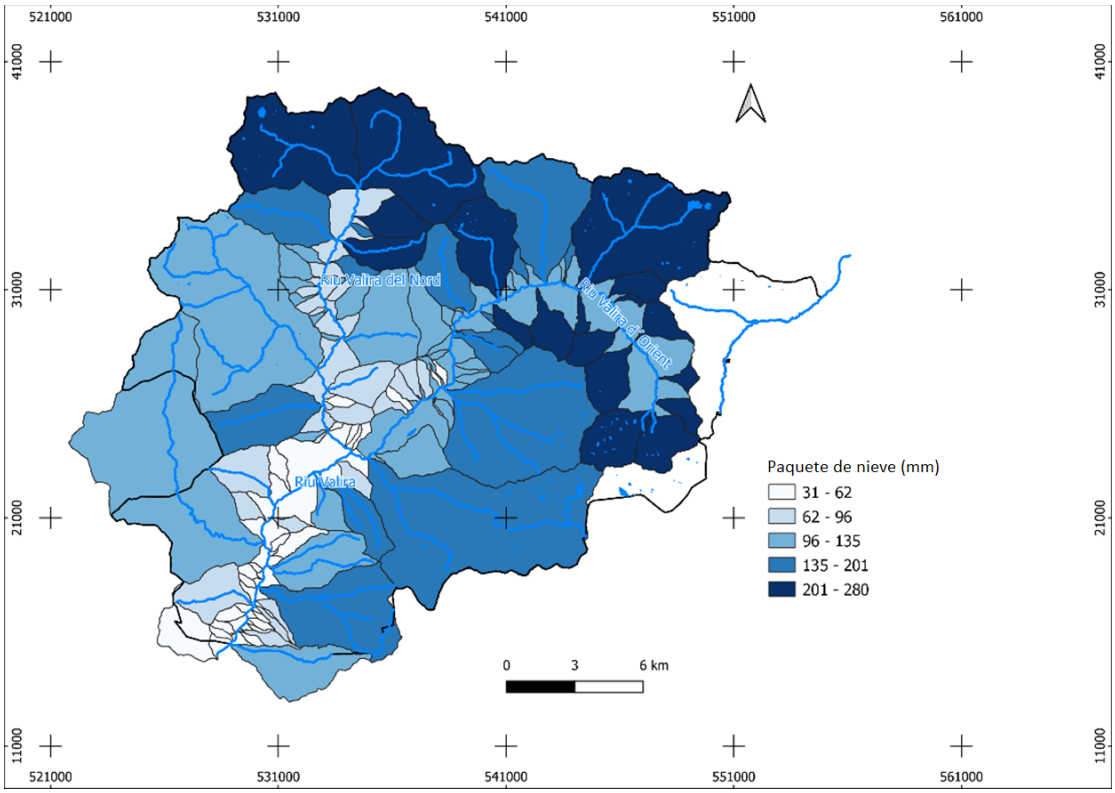


Figura 31. Paquete de nieve (snow water equivalent) en el periodo de referencia 1981-2010 para la estación hibernal (modelización WEAP)

La disminución mensual del agua en el compartimiento de nieve se prevé que disminuya notablemente en el año 2050 (52,86%). Esta reducción será más marcada en las cuencas del fondo de valle y en las meridionales (Figura 32).

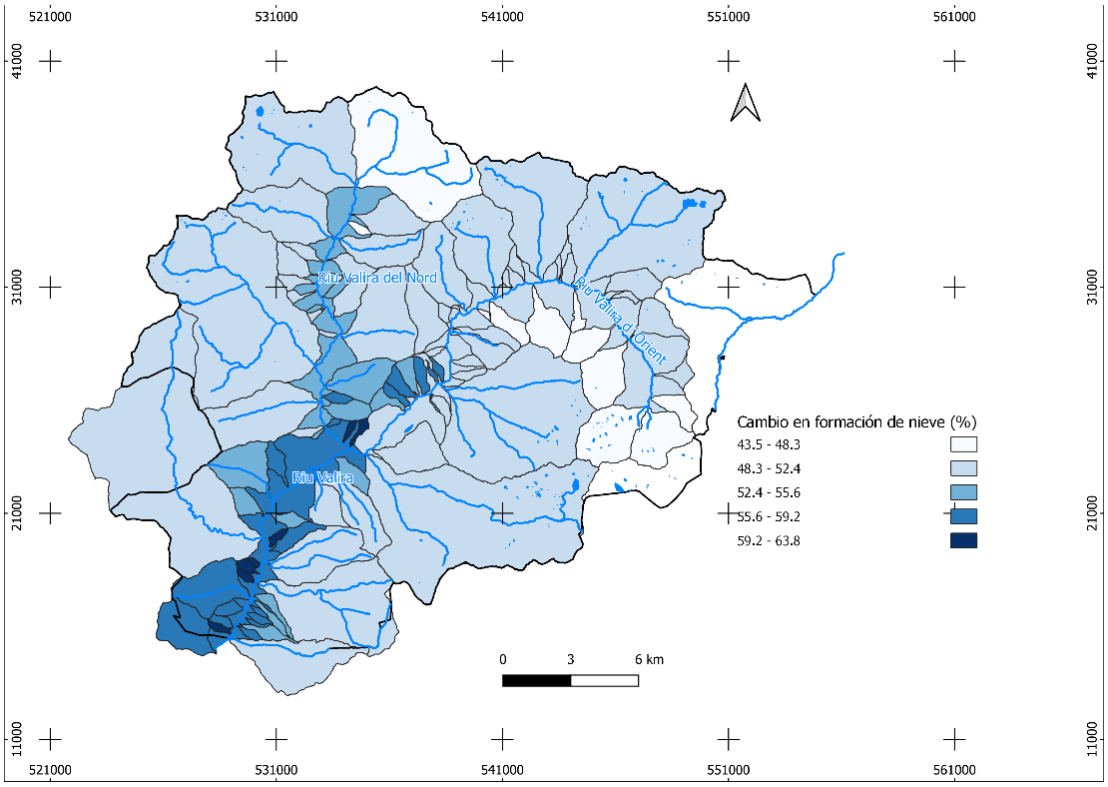


Figura 32. Cambio en el volumen de agua en el compartimiento de nieve en el año 2050 y en escenario de Cambio climático respeto al periodo de referencia 1981-2010 (modelización con WEAP)

Otras variables

Uno de los índices de aridez que se utilizan para caracterizar el clima en relación con el agua disponible para los ecosistemas es la ratio entre evapotranspiración real (ET) y la potencial (ETP). Los resultados para este estudio del índice muestran valores por encima del límite de disponibilidad de agua para la producción primaria en los hábitats afectados (Figura 33). Valores inferiores a 0,6 empezarían a indicar cierta condición de aridez, y este no es el caso de Andorra, donde los valores de ET y de ETP son parecidos y por tanto su ratio cercana a la unidad.

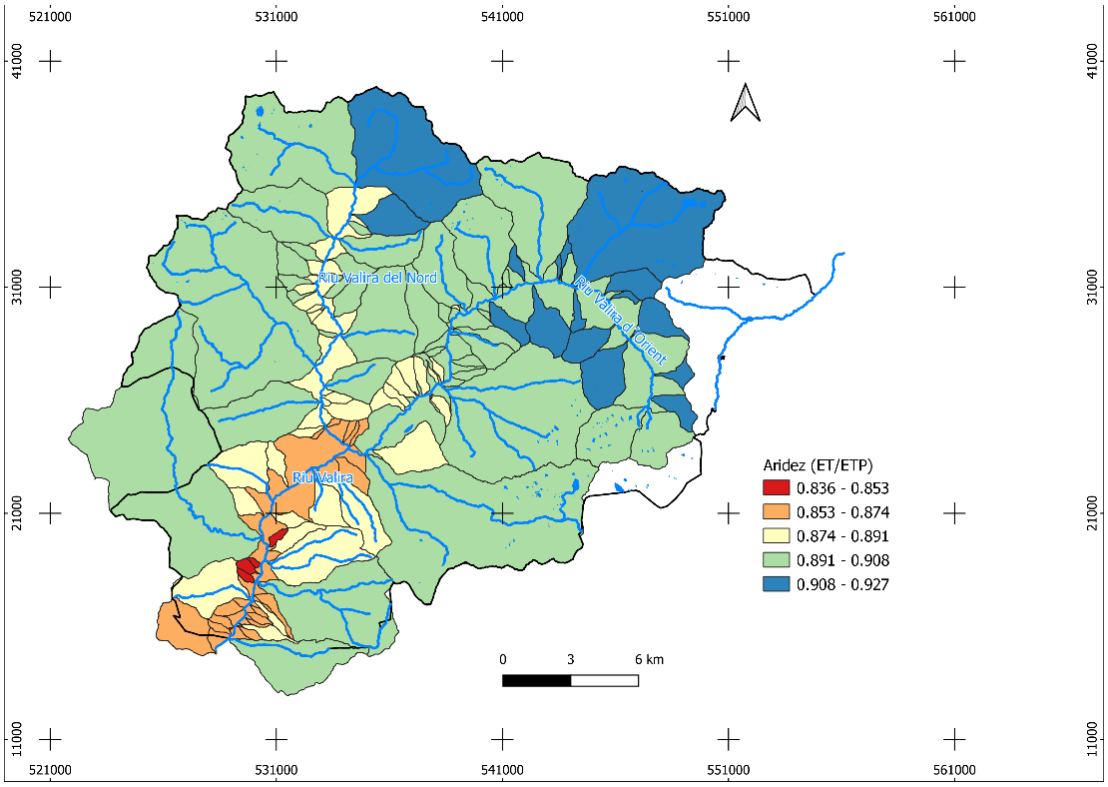


Figura 33. Índice de aridez (ratio entre evapotranspiración real y potencial) en el periodo de referencia 1981-2010 (modelización con WEAP)

Otro de los índices utilizados habitualmente es el índice de aridez de la UNEP, que representa la ratio entre la precipitación media anual y la ETP. En este caso los resultados de este índice para Andorra indican claramente clima húmedo con resultados superiores a 0,65 (En et al., 2019).

ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO GLOBAL

En este apartado se resume la legislación y estrategias asociadas en relación con la adaptación al cambio climático en Andorra, y se detallan los resultados de las actividades participativas desarrolladas para conocer la identificación y percepción social de las medidas adaptativas.

Estrategias de adaptación identificadas

La capacidad de adaptación tiene una componente social muy arraigada. Las medidas de adaptación fomentadas tienen que estar en línea con la aceptación social y la de los sectores económicos implicados. En este sentido, durante el proyecto se realizaron diferentes actividades participativas, para, entre otros aspectos, valorar la percepción del recurso agua en Andorra, sus amenazas en el contexto del cambio climático y las posibles medidas adaptativas. Estas actividades han permitido enriquecer este estudio con la visión y voluntad de la ciudadanía.

A continuación, se detallan los resultados de las dos actividades participativas.

Talleres participativos

Se han dirigido a grupos de personas vinculados con la temática del agua y los recursos naturales, o con ciertas inquietudes o sensibilidades con la temática. Estos talleres se desarrollaron en el marco de la "Nuit des Idées", promovido y organizado anualmente por la embajada francesa en Andorra. La "Nuit des Idées" tiene como propósito acercar el conocimiento a la población y fomentar su saber, inquietud y creatividad. El taller, realizado durante el mes de enero de 2020, constó de dos sesiones interactivas dinamizadas por los investigadores de Andorra Recerca + Innovació.

En la sesión-taller organizada durante la Nuit des Idées[23] participaron un total de treinta y cuatro personas repartidas en las dos sesiones (Figura 34).

Figura 34. Sesión del taller participativo "Nuit des Idées" celebrada en el marco del proyecto Piragua en Andorra

La percepción general de los participantes del taller muestra que, en el contexto de cambio climático, los principales impactos sobre el recurso hídrico son, en primer lugar, el riesgo de grandes avenidas y, en segundo lugar, la disminución del recurso hídrico.

Ante un supuesto escenario de escasez de agua, los asistentes priorizarían el sector hidroeléctrico, seguido por el sector doméstico y el sector servicios, mientras que el sector turístico de nieve

[23] Resultados de la primera sesión del taller participativo "Nuits des Idées" en: https://bit.ly/sesion_nuit_des_idees

(producción de nieve de cultivo) quedaría en el último lugar de la priorización (Figura 35).

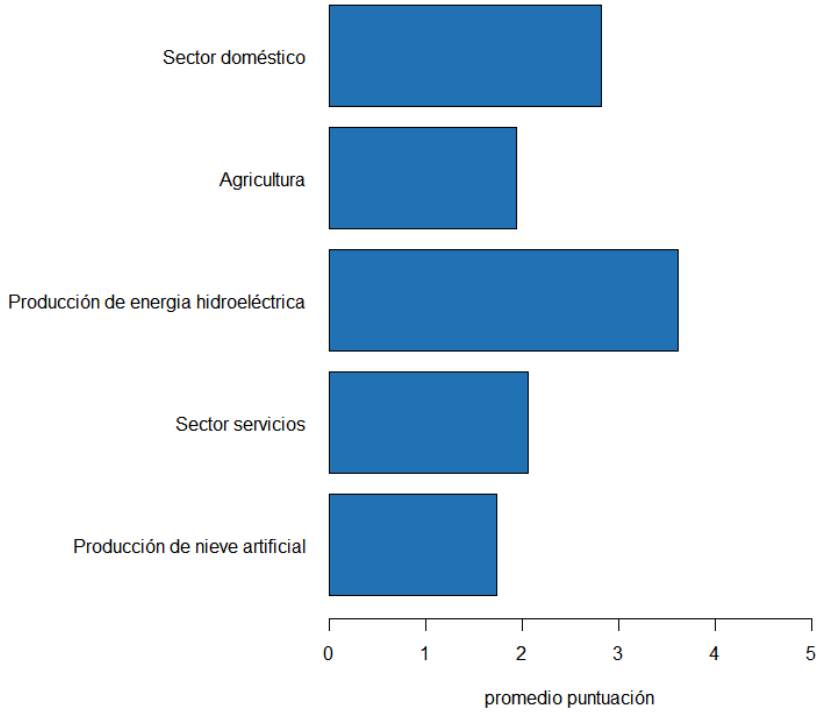


Figura 35. Resultados del taller participativo sobre la priorización de sectores en caso de tensiones por el uso del agua. El valor 5 representa la máxima puntuación

Encuesta en línea

La encuesta en línea, efectuada durante los meses de octubre y noviembre de 2020, se ha enfocado a conocer la percepción de la población en general.

La encuesta ha permitido profundizar en la percepción del cambio climático y en la aceptación de medidas de adaptación potenciales entre la ciudadanía andorrana[24]. En total respondieron la encuesta 98 personas de perfiles generalistas muy variados.

Además de evidenciar que la población considera que ahora es el momento de actuar para combatir el cambio climático, la encuesta

[24] Resultados completos de la encuesta en https://bit.ly/piragua_results

refleja también que un 91% de las personas encuestadas desconoce el precio del m^3 de agua, un 84% desconoce la cantidad que utiliza en casa, y el 61% no sabe lo que paga por este concepto. En un hipotético contexto de escasez, las personas consultadas consideran que se debería dar prioridad de acceso al agua al sector doméstico, seguido de la agricultura, la producción hidroeléctrica, el sector servicios y la producción de nieve (Figura 36).

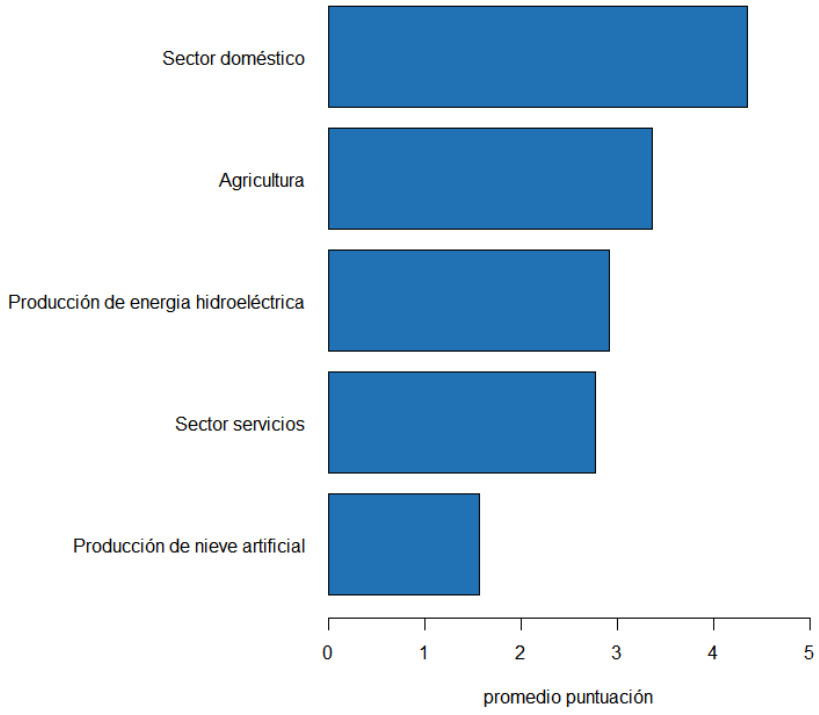


Figura 36. *Resultados de la encuesta en línea sobre la priorización de sectores en caso de tensiones por el uso del agua. El valor 5 representan la máxima puntuación*

Reducir las pérdidas de agua de la red y fomentar el ahorro en todos los sectores, limitar el crecimiento urbano o fomentar la educación sobre el cambio climático y los recursos hídricos encabezan el ranking de las estrategias de adaptación que la población considera prioritarias. Más lejos quedan, pero también con un fuerte apoyo, promover una gestión activa de los bosques para evitar los impactos

de las sequías estivales, diversificar las actividades turísticas de montaña para ser más independientes de la nieve, fomentar la recolecta de agua de lluvia para el riego, limitar el crecimiento turístico o fomentar el ecoturismo. La Figura 37 presenta las estrategias de adaptación planteadas en la encuesta y el nivel de priorización de cada una de ellas por las personas encuestadas.

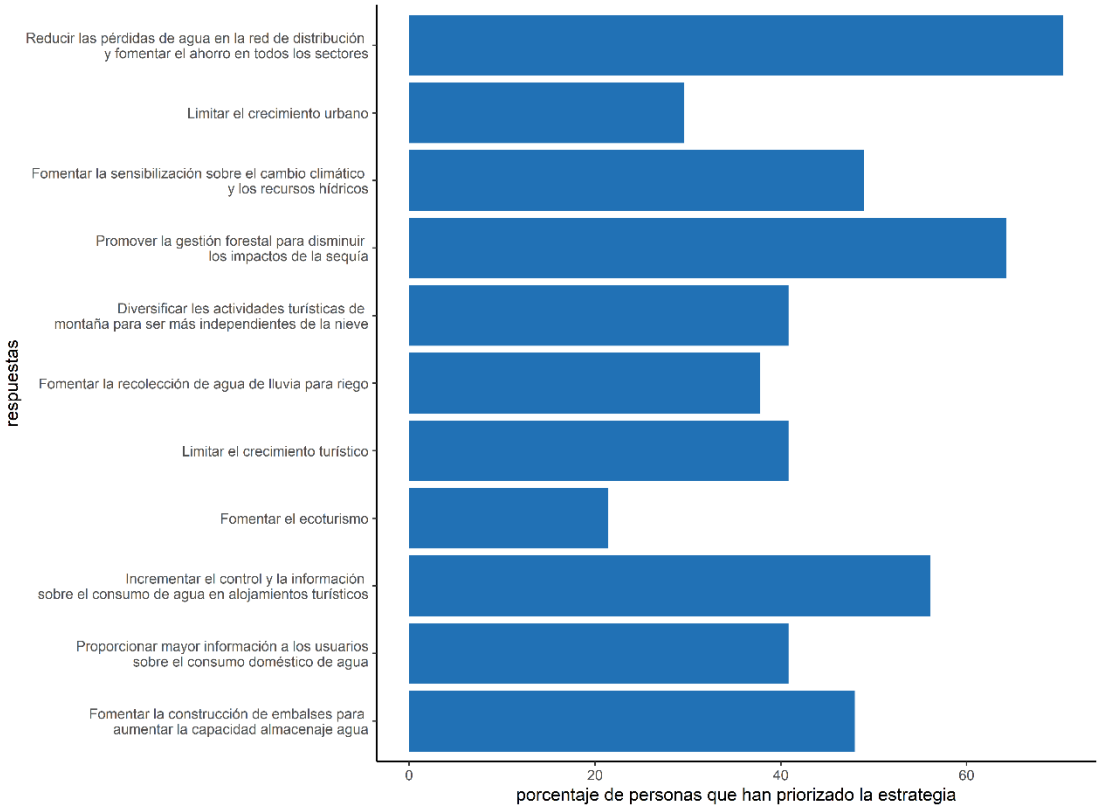


Figura 37. Resultado de la encuesta en línea sobre la priorización de las estrategias de adaptación al cambio climático

Potencial de las estrategias de adaptación

Según la modelización realizada, la demanda de agua en el escenario Cambio global incrementa de los 21,63 hm^3 actuales hasta los 36,49 hm^3 (un 68,70%). Tal como se observa en la Figura 38, la distribución mensual de la demanda se mantiene muy similar en todos los escenarios, siendo julio, agosto y enero los meses de mayor demanda, y octubre el de menor.

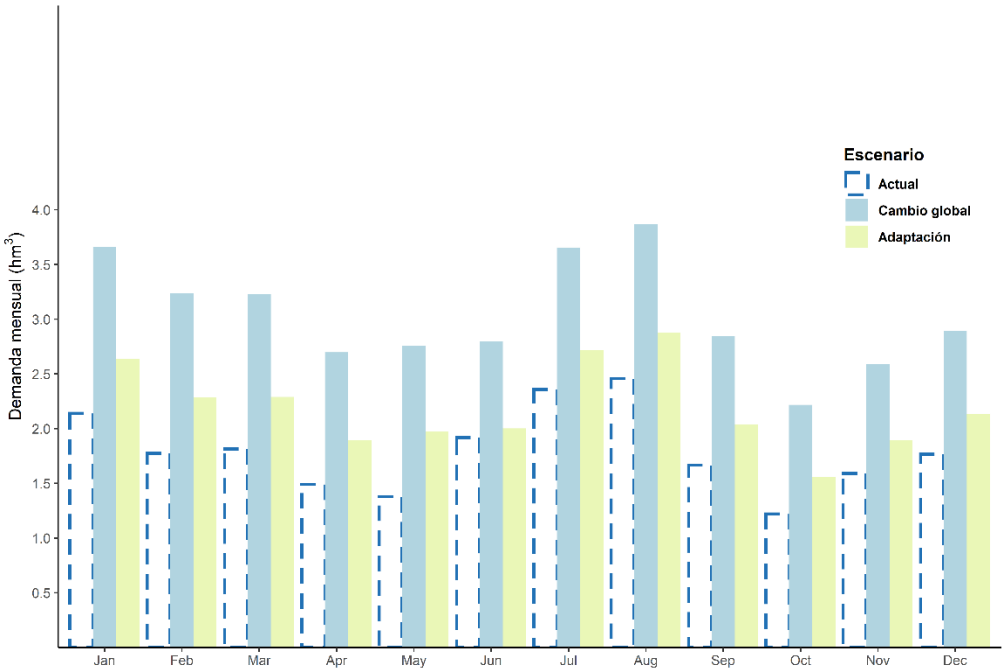


Figura 38. Demanda de agua mensual en la actualidad y los escenarios Cambio global y Adaptación en el año 2050

La distribución de la demanda mensual en los principales sectores (ver *Figura 39*) muestra complementariedad entre el sector agrícola y la producción de nieve, donde el primero aglutina la demanda de agua en los meses de primavera y verano mientras que la innivación artificial la concentra durante el invierno. Los sectores doméstico y turístico se mantienen bastante constantes durante todo el año, si bien es verdad que el sector turístico tiene una pequeña disminución del uso del agua en primavera y otoño.

La implementación de las medidas adaptativas propuestas en el escenario Adaptación (ver Tabla 7) reducen la demanda de agua para uso consuntivo un 27,87% respecto el escenario Cambio global.

Analizando la demanda sectorial, se observa que el volumen de agua en la actualidad para uso **doméstico** es de 15,43 hm^3, mientras que en el escenario Cambio global asciende a 27,08 hm^3 (un incremento del 72,7%). Las medidas adaptativas estudiadas disminuirían la

demanda hasta los 18,76 hm^3 (*Figura 39*), reduciéndose un 30% respecto al escenario Cambio global y llegando a valores cercanos a los actuales.

La demanda de agua para la **agricultura** en la actualidad es de 2,57 hm^3, mientras que en el escenario Cambio global se espera que aumente hasta los 2,85 hm^3. Con las medidas adaptativas implantadas, la demanda del sector disminuiría un 15%, tal y como se ha establecido en la definición de los escenarios (Tabla 10).

En el escenario Cambio global se prevé que el uso de agua destinado a producción de **nieve artificial** en las estaciones de esquí de Andorra aumente hasta 1,76 hm^3, un incremento del 15% respecto la actualidad que se conseguiría compensar con las medidas adaptativas propuestas.

Actualmente, la demanda de agua para abastecer los alojamientos **turísticos** y la infraestructura de SPA Caldea es de 2,08 hm^3 al año, mientras que en el escenario de cambio global se espera que aumente hasta 4,72 hm^3. Con las medidas adaptativas implantadas la demanda sería de 3,59 hm^3. Los meses de mayor demanda se mantienen en febrero y agosto, siendo este último un mes especialmente crítico en lo que a caudal se refiere en el contexto de cambio global.

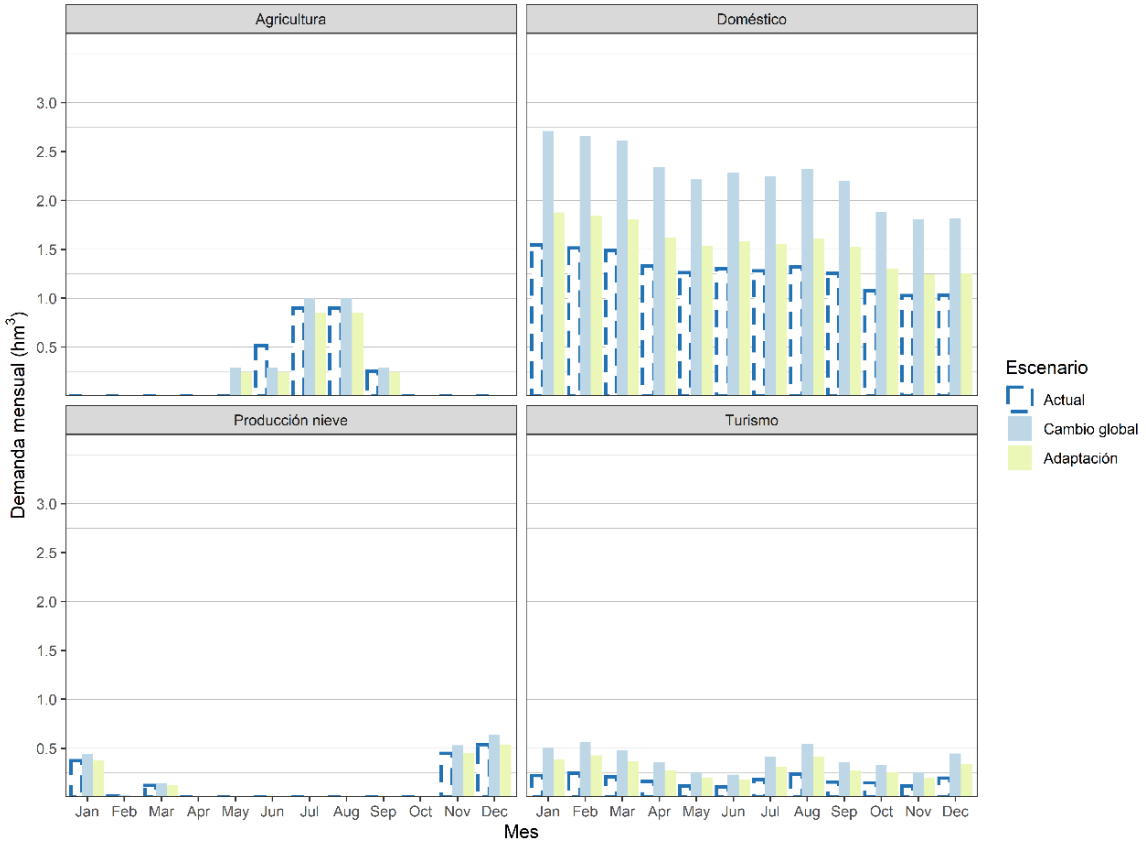


Figura 39. Demanda de agua mensual (hm^3) para usos doméstico, turístico, producción de nieve y agricultura en los escenarios considerados para el año 2050

La Tabla 10 presenta el potencial de ahorro de agua de cada sector estudiado, mostrando que el sector doméstico es el que dispone de un mayor potencial, con un 22,84% de potencial de ahorro respecto el total de usos consuntivos en el escenario Cambio global. En el otro extremo se encuentran las estaciones de esquí que, a pesar de su peso en la economía andorrana, su potencial de ahorro a escala de país a través de medidas de eficiencia es limitado (0,74%). A pesar del potencial limitado a escala de país, es importante remarcar que la mayor parte de captaciones de las estaciones de esquí se encuentran en la cabecera de los ríos donde los caudales son especialmente bajos en determinadas épocas del año.

Sector	Potencial de ahorro (hm^3)	Potencial de ahorro (%)*
Doméstico	8,32	22,84
Turístico	1,13	3,1
Estaciones de esquí	0,27	0,74
Sector agrícola	0,43	1,18
TOTAL	10,15	27,87

*Tabla 10. Potencial de ahorro (hm^3 y %) de agua de los diferentes sectores de uso consuntivo del agua en Andorra aplicando las medidas adaptativas al escenario de Cambio global (*ahorro respecto el total de usos consuntivos).*

Las captaciones anuales destinadas a uso consuntivo del agua en Andorra suponen un 0,54% del caudal disponible. Añadiendo las captaciones de uso no consuntivo (en especial para uso hidroeléctrico) suponen un 23,71% del caudal. Las medidas adaptativas permitirían reducir el 27,87% del uso consuntivo del agua, aun así, sin suponer una mejora significativa en la conservación del caudal destinado a mantener las funciones ecosistémicas. En este sentido, deberán considerarse medidas de adaptación al cambio climático más enfocadas a la transformación socioeconómica y a las estrategias políticas que las estudiadas con el modelo implementado, que se centran en el incremento de la eficiencia del uso de recursos.

Según los resultados obtenidos, en el año 2050 y en el escenario más extremo (Cambio global), los usos domésticos, turísticos, agrícolas e hidroeléctricos actuales podrán ser abastecidos y, por tanto, la compatibilidad entre usos del agua no se verá directamente afectada. El reto será asegurar el mantenimiento de las funciones ecosistémicas durante todo el año, y en todos los tramos, y compatibilizarlo con la producción hidroeléctrica.

La regulación de los caudales ambientales como medida adaptativa se estima imprescindible especialmente en los tramos de captación de agua para uso hidroeléctrico. Esta tendrá un efecto significativo en la conservación de las funciones ecosistémicas de los tramos de río especialmente durante los meses que el hidrograma presenta caudales más bajos.

Optimización del uso de recursos en las estaciones de esquí

Las estrategias de adaptación al cambio climático centradas en el turismo hibernal se han puesto en práctica en las estaciones de esquí de Grandvalira y Vallnord durante las temporadas 2019-2020 y 2020-2021. En el caso de Vallnord, se han centrado únicamente en el seguimiento del espesor del manto nival evolucionando la prueba piloto inicial realizada en Grandvalira. Como resultado del proyecto piloto se ha desarrollado una plataforma destinada a los gestores de las estaciones para ser utilizada como centro de control. Esta permite acceder a las medidas de espesor realizadas por las distintas máquinas pisanieves en tiempo real, así como consultar el histórico de la temporada[25].

A continuación, se detallan los resultados de los pilotos realizados en Grandvalira y Vallnord.

Grandvalira (temporada 2019-2020)

La Figura 40 presenta los resultados[26] de la estimación del espesor del manto nival del día 09/12/2019 en la estación de Grandvalira mediante tecnología GNSS-RTK instalada en una máquina pisanieves. Además del espesor, cada punto de medida almacena las coordenadas (lat., lon.), la precisión (cm), el *pitch* (º) i el *roll* (º).

[25] Mayor detalle en https://snowplanner.tech/
[26] Resultados interactivos de distintos días en http://bit.ly/snow_depth_rtk

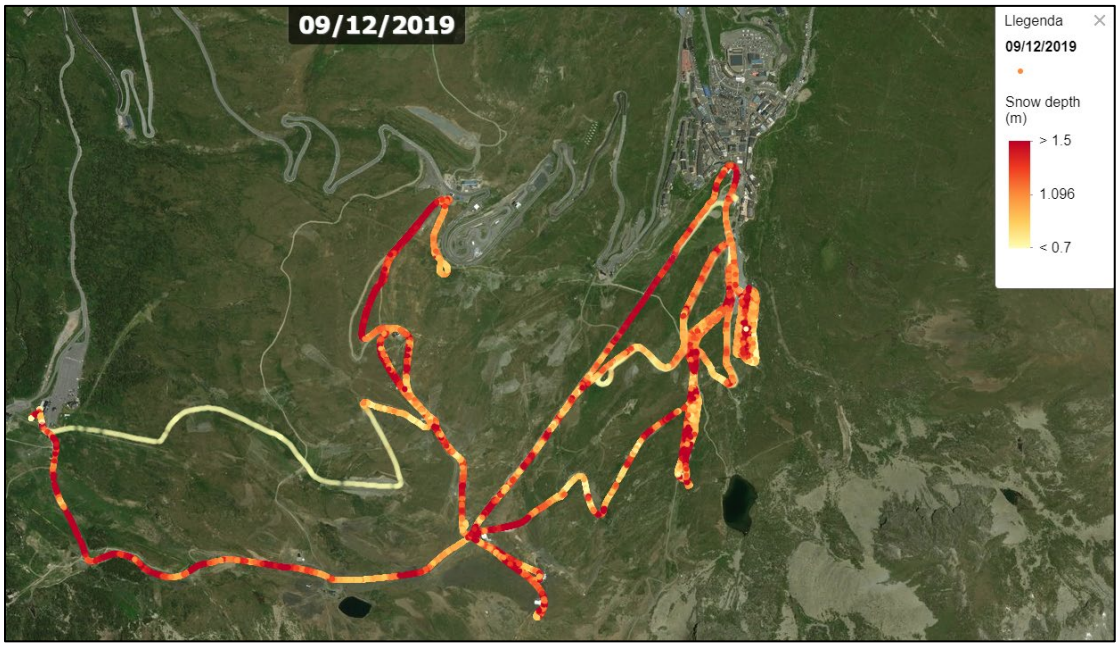


Figura 40. Resultados de la estimación del espesor del manto nival en la estación de Grandvalira mediante tecnología GNSS-RTK instalada en una máquina pisanieves (datos del día 9/12/2019)

Los resultados obtenidos se validaron en un entorno controlado mediante sondajes manuales. La validación se realizó fuera de pista y en tres zonas distintas (A, B, C) para disponer de nieve en distintas condiciones de compactación y pendiente. En cada una de las zonas se capturó el dato de espesor mediante el sistema GNSS-RTK instalado en la máquina pisanieves, además de apuntar manualmente la actitud de la máquina (ángulos de *pitch* y *roll* proporcionados en cabina). Posteriormente se retiró la máquina y se midió el espesor real mediante sondaje en cuatro puntos distintos dentro de las zonas analizadas (ver Figura 41).

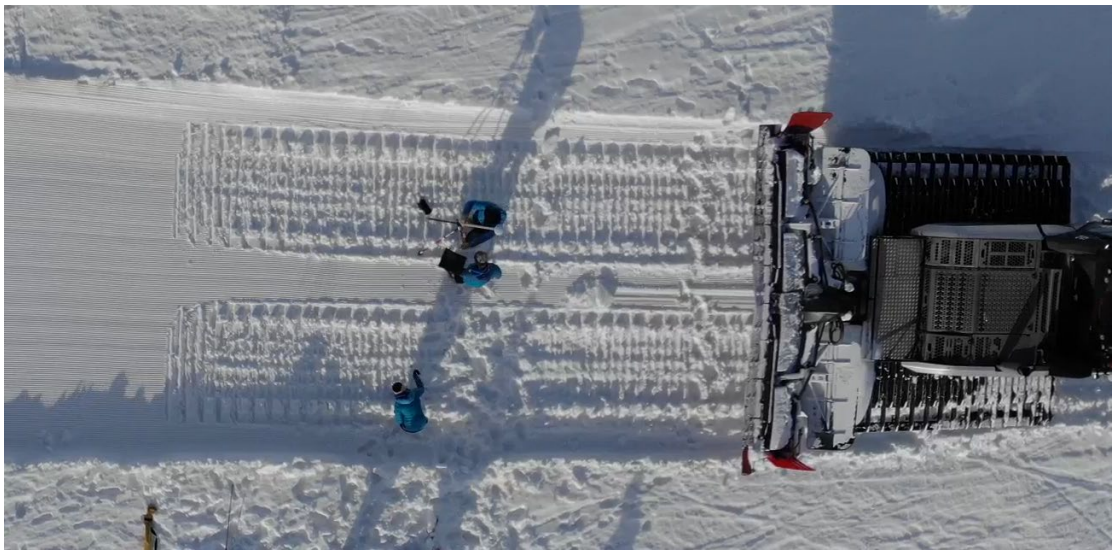


Figura 41. Medida real del espesor de nieve mediante sondaje en una de las zonas

A continuación, la Tabla 11 se presenta los resultados de las validaciones.

Zona A (sin fresar)	**Espesor de nieve real (cm)**	**Espesor de nieve calculado (cm)**
Punto 1	133	
Punto 2	132	
Punto 3	111	
Punto 4	104	
Promedio	120	145
	Actitud en cabina (º)	**Actitud calculada (º)**
Pitch (º)	-12,5	-11.91
Roll (º)	-5	-5,48
Zona B (fresada)	**Espesor de nieve real (cm)**	**Espesor de nieve calculado (cm)**
Punto 1	106	
Punto 2	108	
Punto 3	100	
Punto 4	101	
Promedio	103,8	132
	Actitud en cabina (º)	**Actitud calculada (º)**
Pitch (º)	-14	-13,43
Roll (º)	-4	-3,92
Zona C (sin fresar)	**Espesor de nieve real (cm)**	**Espesor de nieve calculado (cm)**
Punto 1	133	
Punto 2	132	
Punto 3	111	
Punto 4	104	
Promedio	120	115
	Actitud en cabina (º)	**Actitud calculada (º)**
Pitch (º)	11,5	13,16
Roll (º)	5	5,93

Tabla 11. Resultados de las validaciones de las medidas de nieve en entorno controlado

Las diferencias entre el espesor de nieve medido manualmente y el calculado de forma automática son del orden de magnitud de la diferencia de las medidas entre los cuatro puntos del sondaje manual. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que parte del error en el cálculo es introducido por la precisión altimétrica[27] (RMSEZ=0,0058 m) de la nube de puntos del terreno sin nieve.

De los resultados obtenidos y presentado en la Tabla 11 se desprende también que la actitud calculada presenta diferencias inferiores a los 2º respecto a la medida proporcionada en cabina.

La precisión de las medidas realizadas confirma que la aplicación de esta tecnología está justificada, presentando ventajas evidentes respecto a otras tecnologías utilizadas para esta finalidad. Entre ellas destacan el precio, la precisión y el buen comportamiento con distintos tipos de nieve.

Tal como se presenta en la sección "Seguimiento del espesor del manto nival", durante la temporada 2019-2020 se realizaron también medidas de espesor mediante tecnología LiDAR instalada en una aeronave no tripulada. La Figura 42 presenta los resultados[28] obtenidos el día 10/02/2020 en la pista *Pala Central* de la estación de Grandvalira. Tal como se puede observar, a diferencia de los datos capturados con la máquina pisanieves, en este caso se consigue cubrir un área mucho más pequeña pero las medidas son continuas y con una densidad de puntos muy superior.

[27] Informe del vuelo en: https://www.cartografia.ad/images/stories/cartografia/lidar/Informe_vol_LIDAR_2018.pdf

[28] Resultados interactivos de distintos días en http://bit.ly/snow_depth_drone

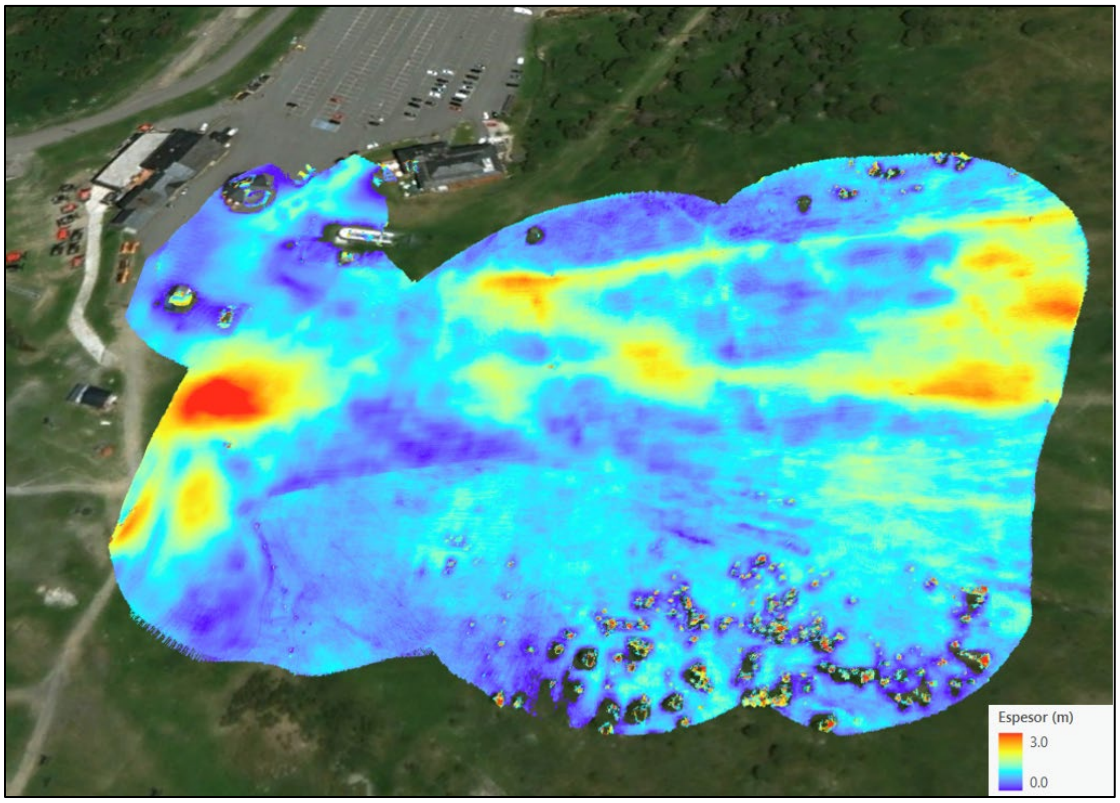


Figura 42. Resultados de la estimación del espesor del manto nival en la estación de Grandvalira mediante tecnología LiDAR instalada en drone (datos del día 10/02/2020)

Los datos capturados del vuelo mostrado en la Figura 42 se tomaron se validaron tomando dos puntos de control en la superficie de la nieve mediante GNSS-RTK obteniendo en ambos casos errores inferiores a los 10 cm (ver Tabla 12).

Punto de control	Lat.	Lon.	Error (m)
A	42,531800	1,700714	0,042
B	42,532019	1,700694	0,068

Tabla 12. Resultados de las validaciones de las medidas mediante tecnología LiDAR instalada en drone

En paralelo al seguimiento del espesor del manto nival, se monitorizaron los consumos de agua y energía de la estación con el objetivo de conocer en detalle el consumo de agua y energía. En esta línea, se proporcionó una herramienta visual a la estación recopilando

la información derivada de los datos disponibles de consumo de agua y energía. Las Figura 43 i la Figura 44 muestran los *dashboards* proporcionados a la estación.

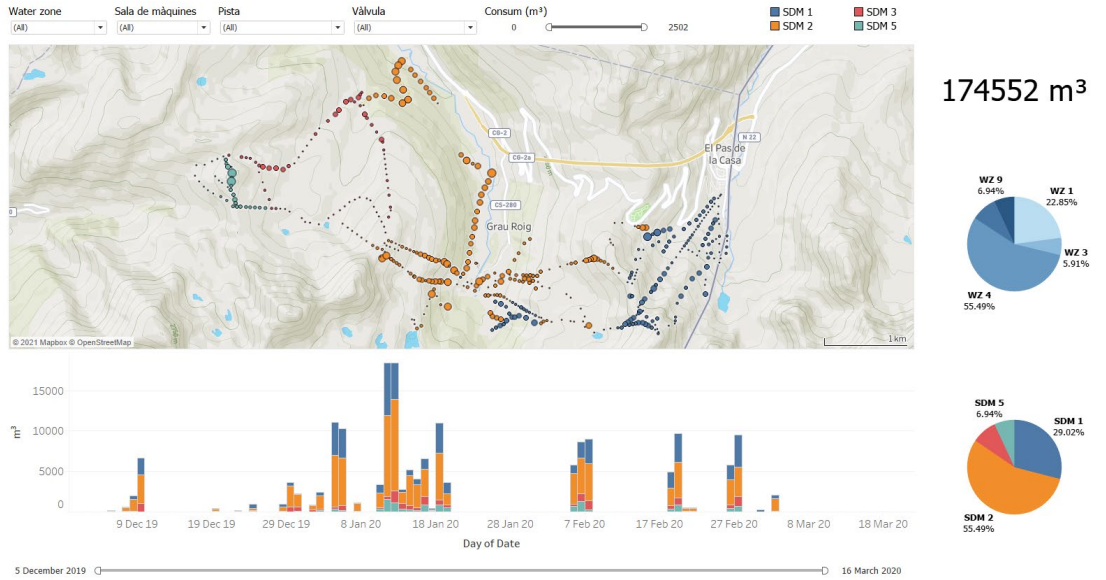


Figura 43. Dashboard para el monitoreo del uso de agua

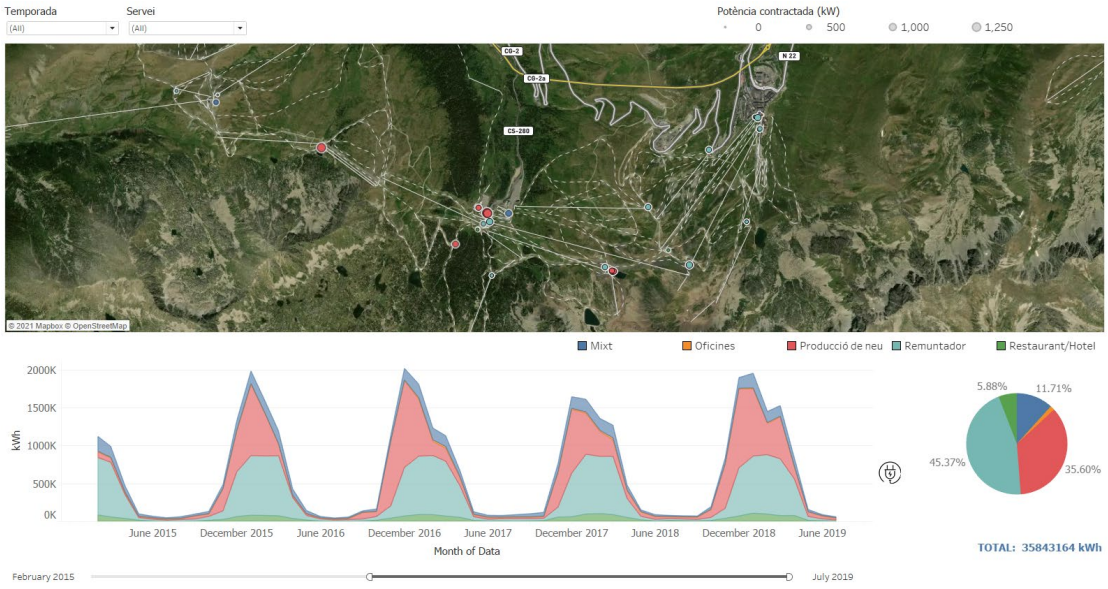


Figura 44. Dashboard para el monitoreo del uso de energía

Vallnord (temporada 2020-2021)

Durante la temporada 2020-2021 se ha realizado una segunda prueba piloto enfocada al seguimiento del espesor del manto nival en el sector de Pal del dominio de Vallnord. Esta ha servido para evolucionar en la comunicación de los resultados a los gestores de las estaciones. La prueba piloto en Grandvalira, presentada previamente, estaba enfocada a validar la tecnología GNSS-RTK para esta finalidad por lo que el cálculo de espesor y la comunicación de resultados a los técnicos de las estaciones se hacía a posteriori. En la presente prueba piloto se ha desarrollado el *hardware, el backend y el frontend* para poder realizar la comunicación en tiempo real y de forma amigable.

La Figura 45 muestra la versión beta de la plataforma destinada a los gestores de la estación para ser utilizada como centro de control. En ella pueden acceder a las medidas de espesor realizadas por las distintas máquinas pisanieves en tiempo real, así como consultar el histórico de la temporada. La información proporcionada puede filtrarse por sector, pistas o sección de pista, además de según fecha o espesor del manto nival.

Adicionalmente, se proporcionan una serie de métricas como el espesor mínimo, máximo y medio de cada área seleccionada, un histograma con la distribución del espesor y la evolución de los últimos 7, 14 o 30 días.

Figura 45. Versión beta del centro de control destinado a los gestores de la estación

Los buenos resultados obtenidos en las pruebas piloto realizadas han llevado a convertir el servicio en una solución comercial. Esta permite gestionar los espesores de nieve de las estaciones para mejorar la eficiencia en el uso de energía y agua, consiguiendo minimizar los costes de operación y mejorando la capacidad de éstas para hacer frente al cambio climático. El producto se comercializará a través de una empresa andorrana[29] que, en principio, será creada inicialmente con capital 100% de Andorra Recerca + Innovació.

[29] https://snowplanner.tech/

CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS TRABAJOS

Según los resultados de este trabajo, Andorra dispone de suficiente recurso hídrico para satisfacer las demandas de agua previstas de los principales sectores destinados a uso humano hasta el año 2050. En ocasiones y localizaciones puntuales, las elevadas demandas en diferentes sectores pueden entrar en competencia y provocar un conflicto de prioridades entre usos, en especial para mantener el uso ecológico del río, es decir, sus funciones ecosistémicas. Estas situaciones apuntan a ser más frecuentes y severas en escenarios futuros de cambio climático y cambio global. En este sentido, es importante remarcar que en el futuro se prevén más habituales los periodos de sequía, pudiéndose acentuar esta problemática. La modelización de periodos de sequía ha quedado fuera del alcance del presente estudio y centrará las investigaciones futuras realizadas en este ámbito.

El patrón de cambios en la distribución del caudal a lo largo del año en el contexto de cambio global en Andorra es ya conocido y representativo de la cordillera pirenaica y de los Alpes, con un avance

del deshielo y un aumento de caudal en los meses de invierno seguido de una reducción en primavera y verano.

A pesar de que los resultados y aprendizajes aportados en este informe se basan en un caso de estudio centrado en el Principado de Andorra, estos pueden servir de referencia y ser generalizables a otras zonas de los Pirineos, con un contexto geográfico y socioeconómico parecido.

A continuación, se resumen las principales conclusiones sectoriales basadas en los aprendizajes del caso de estudio de Andorra.

POBLACIÓN RESIDENTE Y TURISMO

En algunas zonas pirenaicas como Andorra, se prevé un aumento de la población residente que se sumaría al incremento del turismo previsto en verano, donde el intervalo de buenas temperaturas se extenderá en este periodo y además servirá de refugio para los visitantes (turistas) de las zonas llanas y de grandes ciudades que evitaran las canículas estivales.

Las medidas adaptativas al cambio global propuestas en base al presente caso de estudio se centran en:

- Reducir las pérdidas en la red de distribución del agua y monitorizar todas las captaciones y redes de distribución.

- Promover una gestión del agua más eficaz en los centros turísticos y dar a conocer manuales de buenas prácticas de gestión del agua tanto a usuarios como a promotores. Las mismas medidas se aplican también al consumo doméstico de agua.

- Promover una desestacionalización del turismo centrado en el mes de agosto hacía meses de baja demanda y disponibilidad de recurso favorable.

- Desplegar tecnologías destinadas a mejorar la eficiencia en la producción y la gestión de la nieve, como el monitoreo del uso de agua y el seguimiento continuo del espesor del manto nival.

- Desarrollo de un sistema de *labelling* para centros turísticos en los Pirineos ligado a un uso racional y eficiente del agua, y potenciando actividades turísticas, recreativas y de salud con menor consumo de agua.

AGRICULTURA

La demanda de agua destinada a agricultura en Andorra se concentra en los meses de verano cuando existe de forma natural el periodo vegetativo. La agricultura y la ganadería extensiva en los Pirineos permiten mantener la biodiversidad de los espacios abiertos, regulan los incendios, producen alimentos de corto recorrido, entre otros beneficios, por lo que es interesante mantener esta actividad y adaptarla al contexto de cambio climático.

Las medidas adaptativas planteadas a aplicar en Andorra son:

- Tecnificación del riego (automatización y seguimiento remoto).
- Implantación de sistemas de riego más eficientes.
- Elección de especies y variedades vegetales más adaptadas a las nuevas condiciones climáticas.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Los cambios previstos en el hidrograma en el horizonte 2050 incidirán en la disponibilidad mensual de agua destinada a producción hidroeléctrica. Las opciones de adaptación de la gestión hidroeléctrica dependerán, en gran medida, de la capacidad de acumulación y regulación de los embalses de cada región.

En el contexto de cambio global se prevé que la mayor reducción de caudal será en verano, siendo el periodo más vulnerable y en el que habrá que destinar mayores recursos para evaluar la afectación a las funciones ecosistémicas de ciertos tramos de río. La disminución del

recurso en verano hace que su gestión sea un desafío en un hipotético aumento de la demanda de agua y energía en esta estación (agricultura, turismo, climatización, etc.). Cabe añadir que, en verano, las temperaturas ambientales llegan a su máximo lo que contribuye a empeorar las condiciones ecológicas del agua.

Las regiones pirenaicas con mayor capacidad de almacenamiento de agua (lagos o embalses adaptados) tendrán mayor flexibilidad para compensar la escasez de agua prevista a finales de verano y satisfacer los caudales ambientales. En este contexto, las medidas de adaptación propuestas en relación con la producción hidroeléctrica son:

- Optimizar el aprovechamiento hidráulico mediante la tecnificación de sistemas de control remoto para controlar los caudales captados y los caudales ambientales en los tramos objeto de aprovechamiento.

- Disponer de herramientas de estimación de la cobertura de nieve a gran escala para la predicción de disponibilidad de agua proveniente de la fusión.

- Evaluar la capacidad real de almacenamiento de agua en cada cuenca pirenaica y las posibilidades futuras de gestión de almacenamiento.

- Adelantar el llenado de los lagos-embalses para asegurar un caudal ambiental apropiado río abajo en verano.

- Proponer un sistema de caudales ambientales adaptados al cambio global a nivel de cordillera pirenaica.

- Gestionar de forma conjunta el recurso hídrico y el sector energético mediante modelos de planificación integrada a escala pirenaica.

Paralelamente, la diversificación de la producción eléctrica, potenciando otras tecnologías de generación, es una medida

fundamental ya que permite disminuir la presión sobre el sistema hídrico e incrementar la resiliencia del sector energético.

FUNCIONES ECOSISTÉMICAS

Las funciones ecosistémicas son básicas para asegurar la resiliencia del sistema hidrológico en las zonas de montaña y en especial la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad. Los ingredientes de los sistemas riparios y sus funciones ecosistémicas quedan expuestos a fuertes cambios ambientales en el contexto de cambio global. Los caudales ambientales son la primera medida para asegurar un mínimo de estas funciones. Se debe entender el concepto de caudales ambientales como una medida de restauración y no como una restricción a aplicar en los regímenes hidrológicos. Algunas de las medidas adaptativas a considerar en esta línea son:

- Estudiar, valorar, y desplegar un sistema de caudales ambientales que cumpla con la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE conservando una calidad aceptable de los sistemas riparios y por consiguiente de sus funciones ecosistémicas. A su vez, el sistema propuesto debe ser compatible con el compromiso de abordar la transición energética en Andorra.

- Estudiar, valorar, y desplegar un sistema de caudales ambientales basado en índices hidrológicos robustos, integrando la variabilidad estacional, las diferentes tipologías de tramos de río y la totalidad de cuencas.

- Evaluar las funciones ecosistémicas de los ríos, especialmente en los tramos más vulnerables (tramos aguas abajo de captaciones, con elevado grado de artificialidad del cauce, con índices de biodiversidad bajos, con estructura poblacional de peces no adecuada, etc.), para seguir un sistema de control basado en caudales ambientales, entre otros índices, que garantice sus

funciones y la calidad del sistema acuático y, por consiguiente, la calidad del agua.

- Valorar la aplicación de índices holísticos de calidad ecológica en tramos de río especialmente vulnerables.

- Desarrollar planes de restauración de riberas y márgenes de los cauces para mejorar las condiciones ecológicas de los tramos de río de elevada vulnerabilidad.

- Promover planes de financiación, incluyendo inversiones sustanciales en concientización, educación, investigación e involucramiento político para asegurar el mantenimiento de las funciones ecosistémicas en paralelo a impulsar la transición energética.

REFERENCIAS

Adamovic, M., & Després, J. (2020). *Seasonal impacts of climate change on electricity production*. https://doi.org/10.2760/879978

Agencia Catalana de l'Aigua. (2006). *Protocol d'avaluació de la qualitat biològica dels riu (BIORI)*.

Alcázar, A. P. and J. (2012). The basic flow method for incirporating flow variabulity in environmental flows. *River Research and Applications*, *28*(January), 93–102. https://doi.org/10.1002/rra

Alcazar Montero, J. (2007). El método del Caudal básico para la determinación de Caudales Mantenimiento Aplicada al Ebro. *Tesis*.

Amblar-Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M. A., & Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, *17*, 191–208. https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020

Améztegui, A., Brotons, L., & Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (Pinus uncinata Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, *19*(5), 632–641. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00550.x

Amin, A., Iqbal, J., Asghar, A., & Ribbe, L. (2018). Analysis of current and futurewater demands in the Upper Indus Basin under IPCC climate and socio-economic scenarios using a hydro-economic WEAP Model. *Water (Switzerland)*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/w10050537

Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A., Delgado, J., & Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(5), 2839–2865. https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018

Arnett, J. L. (1976). *Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: an assessment*.

Barceló Pons, B. (1995). *Geografia Universal - Andorra. Balears. Catalunya. País Valencià.* (Primera ed). Editorial 92.

Batalla, M., Ninyerola, M., Trapero, L., & Esteban, P. (2016). *ACDA: Atles climàtic digital d'Andorra (període 1981-2010). Servidor de mapes. Institut d'Estudis Andorrans (IEA), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)*. http://www.acda.ad

Batalla, Meritxell, Esteban, P., & Ninyerola, M. (2016). L'Atles climàtic digital d'Andorra (ACDA). *Revista Del CENMA*, 6–21.

Beniston, M. (2003). Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climatic Change*, *59*, 5–31. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7_2

Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, *412–413*, 291–296. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046

Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, *314*(1–4), 312–329. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.008

BOPA. (2005). *Reglament de protecció dels hàbitats aquàtics* (pp. 792–800).

BOPA. (2018). *Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc)* (pp. 1–33).

Brunner, M. I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, *666*, 1033–1047. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169

CENMA-IEA. (2012). *Sistema d'Informació Geogràfica i Mediambiental d'Andorra. Cartografia SIG*. https://www.iea.ad/cartografia/cartografia-sig

Cognard, J., & François, H. (2019). *Review of ski resort operating costs and market analysis (PROSNOW project)*.

CTFC, C. de C. i T. F. de C. (2021). *Catalunya, un país de boscos: indicadors*. Observatori Forestal Català.

Dep. de Geografia de la UAB. (2009). *Mapa de Cobertes i Usos del Sòl de Catalunya*. https://www.creaf.uab.es/mcsc/

Diaz, H. F., Eischeid, J. K., Duncan, C., & Bradley, R. S. (2003). Variability of Freezing Levels, Melting Season Indicators, and Snow Cover for Selected High-Elevation and Continental Regions in the Last 50 Years. *Climatic Change*, *59*(1/2), 33–52. https://doi.org/10.1023/A:1024460010140

Durán, J., & Salamanca, S. (2008). *Impacto del cambio climático sobre la producción agrícola española: ETP y necesiadades hídricas de los cultivos*.

En, C., Cuenca, L. A., Río, D. E. L., Almería, A., Halifa-marín, A., Torres-vázquez, M. Á., & Pérez-, P. (2019). Departamento de Geografía. Universidad de Murcia. 2 Grupo de Conservación de Suelos y Agua. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC). *Actas EAC*, 979–986.

Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., & Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, *25*(3), 319–329. https://doi.org/10.1002/joc.1103

Esteban Vea, P., Prohom Duran, M., & Aguilar, E. (2012). Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008). *Pirineos*, *167*(0), 87–106. https://doi.org/10.3989/Pirineos.2012.167005

Etapa, T. N. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*, *XXII*(31), 31–72.

Gallego, J.J; Barbarossa, R.A; Murray, F y Miñón, D. . (2010). Raigrás anual bajo riego. *Forrajes y Pastizales. Sitio Argentino de Producción Animal*, 21–24. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_verdeos_invierno/74-raigrass.pdf

García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta–Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, *105*(3–4), 121–139. https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2011.01.006

Gerbaux, M., Spandre, P., François, H., George, E., & Morin, S. (2020). Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures. *Revue de Géographie Alpine*, *108–1*, 0–20. https://doi.org/10.4000/rga.6724

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, *63*(2–3), 90–104. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Govern d'Andorra. (2007). *Les aigües subterrànies del Principat d'Andorra*. https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Cap1-Meteorologia-balanc-hidric.pdf

Govern d'Andorra. (2012). *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra*. http://www.energia.ad/images/stories/portada/LlibreBlanc_2012.pdf

Govern d'Andorra. (2014). *Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC)*.

Govern d'Andorra. (2016). *Estratègia nacional de la biodiversitat d'andorra (ENBA)*. https://www.mediambient.ad/biodiversitat

Govern d'Andorra. (2018a). *Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc)* (pp. 1–33).

Govern d'Andorra. (2018b). *Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra*.

Govern d'Andorra. (2018c). *Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra*.

Govern d'Andorra. (2019). *Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - El recurs*. https://www.mediambient.ad/el-recurs

Govern d'Andorra. (2020a). *Departament d'Estadística. Demografia i població*. https://www.estadistica.ad/serveiestudis/web/index.asp

Govern d'Andorra. (2020b). *Estudi per a l'elaboració anyal del balanç hídric del Principat d'Andorra. Any 2019*. https://www.mediambient.ad/el-recurs

Govern d'Andorra. (2021a). *Estudi per a l'elaboració anyal de*

l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra. Any 2019.

Govern d'Andorra. (2021b). *Projecte de llei d'economia circular (LEC) - (BCG 76/2021)*. http://www.consellgeneral.ad/aplics/Butlleti_Consell.NSF/d358b6a33e7b878f412566c100390c61/e2b7406d2b60691fc1256ba30024bdaf/$FILE/but23-2002.doc

Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System. *Water Resources Management*, *24*(13), 3591–3613. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z

Ignacio, J., & Moreno, L. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, *Volume 493*, Pages 1222-1231.

Kassam, D. and. (1979). *Irrigation and Agricultural Development* (S. Johl (ed.); Irak Perga). https://books.google.ad/books?hl=ca&lr=&id=dAfLBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA257&dq=Doorenbos+and+Kassam,+1979+pdf&ots=nRnq4CyQH-&sig=XTt0bz1ywP0mabOnRG7FOhWZiu4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Keith, D. M., Johnson, E. A., & Valeo, C. (2010). A hillslope forest floor (duff) water budget and the transition to local control. *Hydrological Processes*, *24*(19), 2738–2751. https://doi.org/10.1002/hyp.7697

Lespinas, F., Ludwig, W., & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change*, *99*(3–4), 425–456. https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1

Lewis, V. (2006). *The Wild Trout Survival Guide: Habitat and Fishery Management Guidelines* (The Wild Trout (ed.)).

Liuzzo, L., Noto, L. V., Vivoni, E. R., & La Loggia, G. (2010). Basin-Scale Water Resources Assessment in Oklahoma under Synthetic Climate Change Scenarios Using a Fully Distributed Hydrologic

Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, *15*(2), 107–122. https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000166

López-Moreno, J. I., Beniston, M., & García-Ruiz, J. M. (2008). Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, *61*(3–4), 300–312. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.004

López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Gilaberte, M., Morán-Tejeda, E., Pons, M., Jover, E., Esteban, P., García, C., & Pomeroy, J. W. (2013). The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees. *Theoretical and Applied Climatology*, *117*(1), 207–219. https://doi.org/10.1007/s00704-013-0991-0

López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, *477*, 175–188. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.028

López-Moreno, J. Ignacio, Beguería, S., & García-Ruiz, J. M. (2006). Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: Response to climatic factors or to land-use change? *Hydrological Sciences Journal*, *51*(6), 1039–1050. https://doi.org/10.1623/hysj.51.6.1039

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian streamflows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, *414–415*, 463–475. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023

Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009 (Ed.). (2009). *MEDSTAT II: 'Water and Tourism' pilot study 2009* (EUROMED). https://doi.org/10.2785/19709

Maw, B. W., Stansell, J. R., & Mullinix, B. G. (2009). *Soil-Plant-Water Relationships for Flue-Cured Tobacco*. *March*.

Miquel, C. (2012). *Étude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des Pyrénées : caractérisation et effets prévisibles sur la ressource en eau*.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.

American Society of Agricultural and Biological Engineers, *50*(3), 885–900.

Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, *20*(14), 1823–1841. https://doi.org/10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B

Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martínez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, *17*(3–4), 420–428. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.007

OECC. (2021). *Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050*. https://www.bopa.ad/bopa/033019/Documents/Memòria_GD20210204_16_16_19.pdf

OMA. (2019). *Clima - Tendències*. http://www.oma.ad/ca/tendencies

OPCC-CTP. (2018). *El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación*.

Palazón, L., Antigüedad, I., Barella-Ortiz, A., Caballero, Y., Cakir, R., Forey, I., Grusson, Y., Hakoun, V., Hévin, G., Jódar, J., Jung, M., Lambán, L. J., Lanini, S., Le Coent, P., Le Cointe, P., Llasat, M. del C., Llasat, M., Pardo, E., Quintana-Seguí, P., … Beguería, S. (2022). Water cycle and water resources of the Pyrenees under climate change: the PIRAGUA datasets. *European Geosciences Union General Assembly 2022*. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-7825.html

Pesado, C. (2021). *La sostenibilitat de l'aigua a Andorra: efectes a llarg termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs hídric*. https://www.tdx.cat/handle/10803/672544#page=1

Pons, M., López-Moreno, J., Revuelto, J., Alonso, E., Vilella, M., Travesset-Baro, O., Apodaka, J., Pesado, C., Margalef, M., & Iravani, P. (2018). Remote sensing techniques for helping decision-making in the management of ski areas. *International Snow Science Workshop 2018*, 548–552.

Pons, M., López Moreno, J. I., Esteban Vea, P., Macià, S., Gavaldà, J., García Olalia, C., Rosas Casals, M., & Jover, E. (2014). Climate change influence on winter tourism in the Pyrenees. Experience from the NIVOPYR. *Pirineos*, *169*(169), 1–12. https://doi.org/doi: http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169006

Quintana-seguí, P., Caballero, Y., Cakir, R., Clavera, R., Dewandel, B., Grousson, Y., Hevin, G., Jódar, J., Lambán, L. J., Lanini, S., Le, P., Llasat, C., Sauvage, S., Sánchez-pérez, J. M., & Palazón, L. (2022). *Estimation of the future water balance and water resources of the Pyrenees*. 4–5.

Recaño, J. (2021). *Projecció de la població d'andorra, 2021-2031*.

Stockholm Environment Institute. (2016). WEAP- TUTORIAL Water Evaluation And Planning System. *Weap*, *August*, 286.

Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, *1*(4), 6–10. https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:ifrffw>2.0.co;2

Van Vliet, M. T. H., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. F. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, *11*(12). https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124021

Velychko, S., & Dupliak, O. (2021). Estimation of the Ecological Flow of Mountain River in Ukrainian Carpathians for Small Hydropower Projects. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *100 LNCE*, 490–498. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_60

Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, *105*(3–4), 469–488. https://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4

Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2003). Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains. *Mountain Research and Development*, *23*(1), 32–40. https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0032:athsot]2.0.co;2

VVAA FAO. (2008). Sistemas de Riego. Factores que se deben considerar para seleccionar el sistema de riego mas adecuado. *Sistemas de Riego*, *148*, 29–37.

Wilson, D., Hisdal, H., & Lawrence, D. (2010). Has streamflow changed in the Nordic countries? - Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*, *394*(3–4), 334–346. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.010

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, *30*(4), 487–500. https://doi.org/10.1080/02508060508691893

Zabaleta, A., Haro-monteagudo, D., Antiguedad, I., & Beguería, S. (2022). *Past hydrological trends on the Pyrenees : towards a higher spatial heterogeneity*. 10370.