

XXXIII UNIVERSITAT D'ESTIU D'ANDORRA
DEL 29 D'AGOST A L'1 DE SETEMBRE DEL 2016

Sessió del 31 d'agost del 2016

**LA IMPORTANCIA DEL CLIMA Y DE LA NIEVE
EN EL PIRINEO:
¿QUÉ PODEMOS ESPERAR DEL CAMBIO CLIMÁTICO?**

Juan Ignacio López Moreno

Climatóleg – Climatólogo – Climatologue
Instituto Pirenaico de Ecología
Centro Superior de Investigaciones Científicas

Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article :

LÓPEZ MORENO, Juan Ignacio. « La importancia del clima y de la nieve en el pirineo: ¿Qué podemos esperar del cambio climático? » [en línia], a: Universitat d'Estiu d'Andorra (33a : 29 d'agost - 1 set., 2016 : Andorra la Vella). *Transformar el nostre món, l'agenda 2030 per al desenvolupament sostenible = Transformar nuestro mundo, la agenda 2030 para el desarrollo sostenible = Transformer notre monde, l'agenda 2030 pour le développement durable*. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior. Universitat d'Estiu d'Andorra, 2018, p. 90-101 (978-99920-0-856-0) <<http://www.universitatestiu.ad/UEA2016>>

La importancia del clima y de la nieve en el Pirineo: ¿Qué podemos esperar del cambio climático?

1. Introducción

Las montañas poseen un altísimo valor ambiental y económico que justifican su estudio, más aún si se tienen en cuenta los actuales escenarios de cambio global. Las montañas ocupan poco más del 25 % de la superficie del planeta, pero en ellas se genera más del 70 % de los recursos hídricos que utiliza la población mundial, de los que un 20 % procede directamente de la fusión de la nieve y de los glaciares (Viviroli *et al.*, 2007). Además son espacios aún habitados, en los que sus pobladores son particularmente sensibles a las duras condiciones climáticas y a las dificultades del terreno que existen para obtener los recursos necesarios para su sustento. De hecho, las montañas sólo han podido ser habitadas gracias a un ingente esfuerzo por transformarlas para poder cultivarlas y alimentar al ganado; y para poder sobrevivir en un ambiente intrínsecamente peligroso. Muchas zonas de montaña se enfrentan a la ocurrencia de grandes inundaciones y desbordamientos de lagos de alta montaña, como consecuencia de la rápida fusión de los glaciares. Además, las fuertes pendientes junto a precipitaciones intensas dan lugar a deslizamientos del terreno o a la ocurrencia de avalanchas. Por último, su gran valor estético hace que sean espacios cada vez más visitados, siendo el turismo uno de los principales ingresos económicos para sus habitantes.

Todo lo enunciado en el párrafo anterior puede aplicarse al Pirineo. A modo de ejemplo, las cabeceras del Pirineo central español, ocupan únicamente un 11 % de la superficie de la cuenca del río Ebro, pero producen un 60 % de sus caudales, sirviendo para regar el 75 % de sus tierras de cultivo y producir un 60 % de la energía hidroeléctrica. Además, es un territorio que no es ajeno a los riesgos naturales, siendo las avalanchas, deslizamientos del terreno y avenidas torrenciales fenómenos naturales frecuentes que causan numerosas pérdidas económicas y daños personales. También el turismo es un elemento fundamental de la economía del Pirineo, representando únicamente el esquí un 10 % del producto interior bruto de las principales regiones pirenaicas. Generación de escorrentía, ocurrencia de eventos climáticos e hidrológicos extremos y la viabilidad del turismo, fundamentalmente el basado en estaciones de esquí,

dependen directamente del clima y de la nieve. Por tanto, no es de extrañar que sean un motivo de preocupación las posibles consecuencias que el cambio climático ha tenido y puede tener en las próximas décadas. El retroceso que han mostrado los glaciares en las últimas décadas es un claro ejemplo de que algo sucede en el clima de nuestras montañas, pues sólo podría explicarse por un incremento reciente de las temperaturas o un descenso de la precipitación. Al cambio climático, hay que sumar el enorme cambio en los usos del suelo y de la vegetación que ha sucedido en nuestras montañas desde la segunda mitad del siglo xx. Estos cambios se desencadenaron al producirse una migración masiva desde muchos pueblos de montaña a zonas urbanas. Las montañas pasaron de ser intensamente cultivadas y de sufrir una explotación intensiva de sus bosques, a representar un espacio abandonado en el que la vegetación ha crecido de forma natural, o donde campañas de repoblación forestal han acelerado notablemente el proceso.

El objetivo de esta presentación es mostrar los indicios de cambio global que han sucedido, y las proyecciones que existen para las próximas décadas en el Pirineo, con especial interés en el país de Andorra y los posibles impactos en la disponibilidad de agua y en el sector del esquí.

2. Cambios en el clima en el Pirineo

Estudios ya realizados por el Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) han mostrado que entre 1955 y 2006 la temperatura anual ha subido de forma significativa en el conjunto del Pirineo, mientras que la precipitación anual no ha mostrado cambios relevantes (López-Moreno *et al.*, 2011). Estos cambios anuales esconden importantes matices en las series mensuales. Así, el incremento térmico se concentra en los meses de febrero, marzo, junio, julio y agosto; mientras que la precipitación de los meses de febrero, marzo y junio sí ha descendido de una forma estadísticamente significativa (López-Moreno *et al.*, 2008). Estos cambios han llevado a un descenso significativo del manto de nieve en los meses de marzo y abril (López-Moreno, 2005), afectando de forma muy clara a la estacionalidad de los ríos pirenaicos (Morán-Tejeda *et al.*, 2014).

El Pirineo no es ajeno a las proyecciones de calentamiento que existen para la mayor parte del planeta durante las próximas décadas. Como ejemplo, la Figura 1 muestra los cambios medios y la variabilidad entre los modelos del IPCC (experimento IPCC) para Andorra en el horizonte de mediados del siglo xx.

En término medio, los modelos indican un incremento aproximado de 1,5°C, siendo éste más intenso en verano y más moderado en invierno. La precipitación anual muestra un ligero descenso (próximo al 5 %) pero enmascara una grandísima incertidumbre entre los distintos modelos. Así, algunos modelos indican un fuerte descenso, mientras otros sugieren pocos cambios o incluso un incremento de la precipitación. En general, los principales descensos de precipitación se esperan también para los meses de verano.

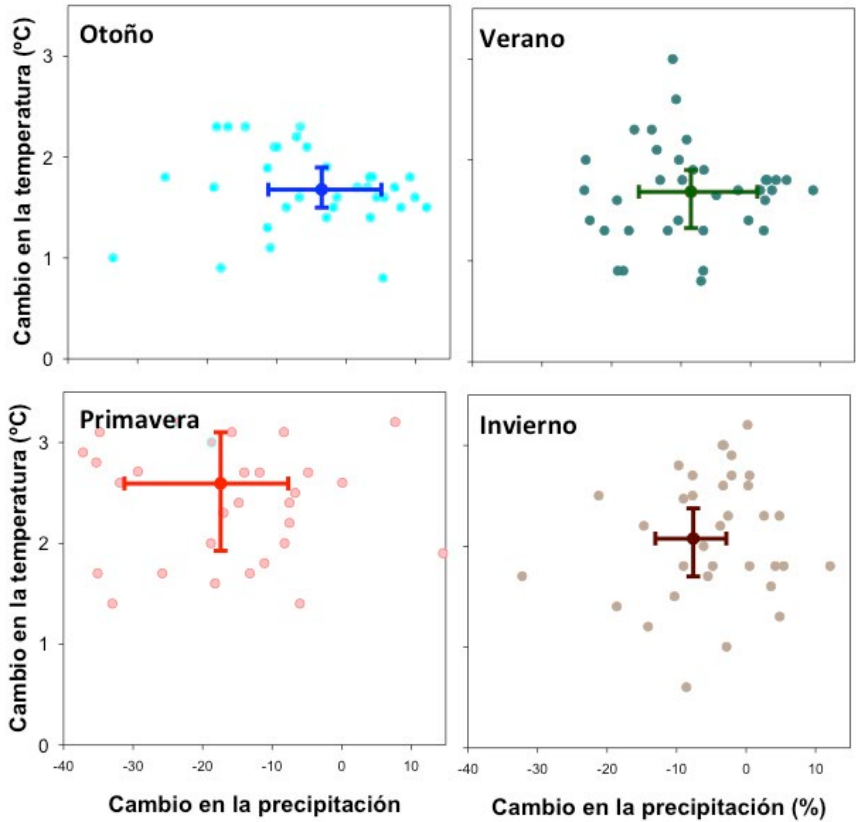


Figura 1. Cambios en precipitación y temperatura proyectados por los modelos del IPCC en Andorra para el horizonte 2050. Los puntos gruesos indican el promedio de los modelos; los extremos de las barras representan los percentiles 25 y 75.

3. Cambios hidrológicos e impactos en los recursos hídricos

Estudios previos han evidenciado que los caudales del Pirineo han descendido un 30 % desde 1955. Las razones han sido tanto climáticas como debidas al incremento de la superficie cubierta por bosque y matorral que ha afectado casi un 30 % de la superficie de la vertiente surpirenaica (Beguería *et al.*, 2003). El descenso en los caudales ha afectado ya de forma profunda la entrada de agua a los principales embalses del Pirineo, y ha obligado a los gestores a modificar de forma muy profunda los patrones de gestión del agua (López-Moreno *et al.*, 2004 y 2008). Dichos cambios básicamente se han basado en reducir de forma drástica los caudales aguas debajo de las presas, fundamentalmente en verano y principios de invierno, aumentando los niveles de embalsado de forma más prematura a la que se realizaba en décadas anteriores. Este hecho ha reducido de forma notable la capacidad de laminar las crecidas primaverales (López-Moreno *et al.*, 2002). El problema es que, en la mayor parte de los embalses del Pirineo, la capacidad de continuar reduciendo las salidas de agua en los tramos inferiores a las presas resulta ya muy limitada, pues éstas se aproximan actualmente a los actuales caudales ecológicos diseñados para cada río (García-Ruiz *et al.*, 2011). Por tanto, resulta muy preocupante que los escenarios de cambio climático y de usos del suelo puedan indicar una continuada tendencia negativa en la capacidad de generación de escorrentia de las zonas de cabecera.

Para conocer los cambios en el clima y los usos del suelo que se esperan para un futuro próximo en el Pirineo, la modelización hidrológica se revela como una herramienta de gran utilidad. Un modelo hidrológico permite simular los caudales que se producen en una cuenca a partir de información de su geología y suelos, cubierta vegetal y series climáticas disponibles. El Instituto Pirenaico de Ecología ha realizado simulaciones para los caudales del Pirineo, mediante la utilización del modelo ecohidrológico RHESSys (Tague *et al.*, 2004; López-Moreno *et al.*, 2014). La figura 2 muestra un ejemplo de los resultados de cómo cambios en el clima y en los usos del suelo pueden modificar los caudales del río Valira aguas debajo de Andorra la Vella. Asumiendo un incremento de la temperatura de 2°C, el caudal medio anual disminuiría un 14 %, siendo los caudales del mes de junio los más afectados. Dicho cambio refleja el efecto de un incremento de la evaporación potencial y una menor importancia del manto de nieve en los caudales primaverales. Además se muestra cómo

pueden responder los caudales ante un calentamiento de 2°C, pero incluyendo la incertidumbre de un 20 % de cambio en la precipitación que muestran las proyecciones climáticas para el Pirineo central (véase sección 2).

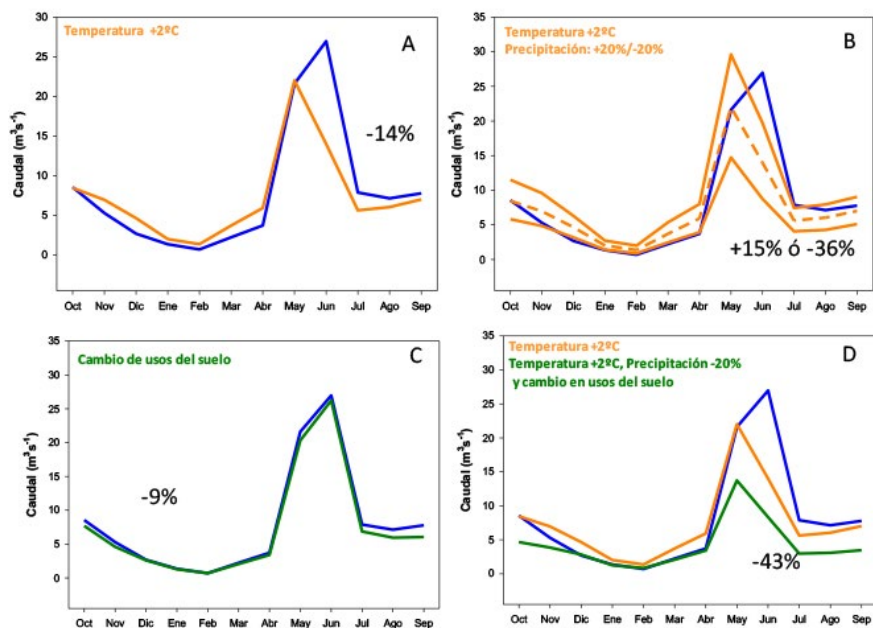


Figura 2. Cambio hidrológico simulado por el modelo RHESSys para distintos escenarios de cambio climático y de los usos del suelo.

En este caso, las simulaciones hidrológicas indican que los caudales podrían incrementarse en un 15 % o reducirse en un 36 %, dependiendo de que la precipitación aumente o disminuya un 20 % respectivamente. Para valorar cómo los cambios de cubierta vegetal afectarían los caudales del río Valira, hemos asumido un escenario en el que las actuales zonas de matorral se convierten en formaciones boscosas, los campos abandonados se transforman en matorral y la parte inferior del piso subalpino (hasta 2.200 m s.n.m.) se matorraliza. Un cambio en la vegetación como el mencionado implicaría, según el modelo, un descenso de los caudales del 9 %, disminuyendo fundamentalmente los caudales de verano y otoño. Si bien se trata de un cambio modesto, resulta particularmente preocupante la posibilidad de que dicho cambio en la precipitación se superpusiera a un escenario de calentamiento y de descenso de

la precipitación. En tal caso, los caudales podrían llegar a descender hasta un 43 %, lo que comprometería seriamente el suministro actual y la demanda de agua en la cuenca.

4. Cambios en el manto de nieve y efecto en las estaciones de esquí

Trabajos conjuntos del Instituto de la Sostenibilidad de Andorra (OBSA) y el Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) han revelado que las condiciones climáticas, desde los años 60 hasta la actualidad, han llevado a que el espesor y la duración del manto de nieve hayan descendido de forma estadísticamente significativa en las estaciones de esquí del Pirineo Central (España y Andorra). Lógicamente, dicha tendencia está sobreimpuesta a numerosas oscilaciones anuales y decadales, característica de la dinámica climática de los zonas con clima mediterráneo (Gilaberte *et al.*, 2017). Si bien los cambios climáticos proyectados para las próximas décadas (véase sección 2) parecen modestos, un incremento térmico de tan sólo 1°C es suficiente para que la acumulación de nieve en Andorra a 2.000 m s.n.m. descienda casi un 23 % (López-Moreno *et al.*, 2017).

	LADERAS NOROESTE						LADERAS SURESTE					
	Nieve natural			Producción de nieve artificial			Nieve natural			Producción de nieve artificial		
	1850m	1980m	2125m	1850m	1980m	2125m	1850m	1980m	2125m	1850m	1980m	2125m
Actual	141	150	159	156	158	161	134	149	160	145	149	160
+2°C	92	116	132	127	135	147	36	56	71	88	97	108
+4°C	20	32	81	43	60	96	9	13	26	24	32	43

Tabla 1. Número de días anuales simulados con más de 30 cm de espesor en la estación de esquí Ordino-Arcalís bajo las condiciones actuales y dos escenarios de calentamiento. Se consideran distintas orientaciones de ladera y franjas altitudinales.

Frente a la irregularidad interanual en la innivación y los escenarios de cambio climático, las estaciones de esquí del Pirineo han sido equipadas con sistemas muy avanzados para la producción de nieve artificial, permitiendo mejorar los dominios esquiables amplios incluso durante años de escasa innivación

natural (Pons *et al.*, 2012). Por ello, se han realizado simulaciones sobre la posibilidad de la práctica de esquí en una estación del Pirineo de Andorra (Ordino Arinsal) bajo condiciones de calentamiento térmico, incluyendo en las simulaciones la posibilidad de producir nieve artificial. Los resultados de dicho ejercicio se resumen en la Tabla 1. Las simulaciones revelan que la esquiabilidad en la estación está fuertemente condicionada por las cotas de altura a la que nos refiramos y a la orientación de sus pistas (distinguiendo entre laderas norte y sur). Dichos contrastes también se plasman en la reducción de los días esquiabiles bajo escenarios de calentamiento térmico. Así, se puede observar que un calentamiento de 2°C y sin producir nieve artificial haría prácticamente imposible la práctica del esquí en las cotas más bajas de la estación orientadas al Sur, mientras que en cotas medias y altas la práctica del esquí quedaría muy limitada. Incluyendo en las simulaciones la producción de nieve artificial, las cotas medias y altas de la estación (sobre todo las orientadas al Norte), mantendrían más de 100 días esquiabiles al año. Las cotas más bajas e insoladas, mejorarían en esquiabilidad pero aún quedarían por debajo del umbral de los 100 días anuales. Asumiendo un calentamiento de 4°C, la práctica del esquí estaría por debajo de los 100 días anuales en todas las orientaciones y a cualquier banda altitudinal considerada.

5. Conclusiones

Las zonas de montaña son áreas fundamentales para la producción de recursos hídricos, la entrada de ingresos por turismo y presentan un elevadísimo valor ambiental. La montaña mediterránea, incluyendo los Pirineos, está inmersa en profundos cambios ambientales que incluyen un proceso significativo de calentamiento y un incremento de la vegetación asociado a la despoblación acaecida a lo largo del siglo xx. Se espera que dichos cambios continúen en las próximas décadas y resulta preocupante cómo pueden afectar a dos recursos ambientales fundamentales: la producción de esorrentía y el manto de nieve.

Los escenarios disponibles indican que lo más probable es que continúe el descenso de los caudales en las zonas de cabecera. Sin embargo, la gran incertidumbre sobre cómo va a evolucionar la precipitación hace muy difícil prever la magnitud de tal descenso, que podría llegar a más de un 40 % en el peor de los escenarios. Independientemente de la evolución de la precipitación, un incremento térmico de 2°C puede causar un descenso muy importante en

la duración del manto de nieve en el Pirineo, afectando con mayor intensidad a las cotas inferiores de nuestra cordillera. Dicho descenso sería fatal para la práctica del esquí si no se pudiera producir nieve artificial. Sin embargo, esta tecnología se revela muy útil para hacer frente a la variabilidad y al cambio climático. A pesar de ellos, los escenarios climáticos indican que la esquiabilidad en las cotas más bajas e insoladas de la cordillera se vería seriamente comprometida. Por supuesto, cualquier simulación que se realiza para el futuro está sujeta a fuertes incertidumbres. Sin embargo, sí es una información que debe ser tenida en cuenta por los gestores del territorio para planificar los recursos y las líneas de actuación fundamental en nuestras montañas en un horizonte temporal relativamente cercano.

Referencias

- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Seeger, M. and García-Ruiz (2003). Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees, *Ambio* 32 (4): 283-286.
- García-Ruiz J.M., López-Moreno, J.I., Serrano-Vicente S.M., Beguería, S., Lasanta, T. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews* 105 (3-4): 121-139.
- Gilaberte-Búrdalo, M.; López-Moreno, J.I.; Morán-Tejeda, E.; Jerez, S.; Alonso-González, E.; López-Martín, F.; Pino-Otín, M.R. (2017). Assessment of ski condition reliability in the Spanish and Andorran Pyrenees for the second half of the 20th century. *Applied Geography* 70: 127-142.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., and García-Ruiz, J.M. (2002). Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (4): 753-762, 2002.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S. and García-Ruiz, J.M. (2004). The management of a large Mediterranean reservoir: storage regimes of the Yesa reservoir, Upper Aragón River basin, Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management* 34 (4): 508-515.
- López-Moreno, J.I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Artic, Antartic, and Alpine Research*, 37 (2): 253-260.
- López-Moreno, J.I., García-Ruiz, J.M. and Beniston, M. (2008). Environmental Change and water management in the Pyrenees. Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change* 66 (3-4): 300-312.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., García-Ruiz, J.M. (2011). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Science* 15: 311-322.
- López-Moreno, J.I. , Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M. Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M., Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo xx. *Pirineos* 169, e004.
- López-Moreno, J.I, Gascoin, S., Herrero, J., Sproles, E., Pons, M., Alonso-González, E., Hanich, L., Boudhar, A., Musselman, K. N., Molotch, N., Sickman, J., Pomeroy J. (2017). Different sensitivities of snowpack to climate warming in Mediterranean mountains. *Environmental Research Letters*.

- Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., Rahman, K., Beniston, M. (2014). Streamflow timing of mountain rivers in Spain: Recent changes and future projections. *Journal of Hydrology* 517:1114-1127.
- Pons-Pons, M., Johnson, P.A., Rosas-Casals, M., Sureda B, Jover, È. (2012) Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Climate Research* 54:197-207.
- Tague C., Band L. (2004). RHESys: Regional hydro-ecologic simulation system: an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water and nutrient cycling. *Earth Interactions* 8(1):42.
- Viviroli D., Dürr H.H., Messerli B., Meybeck M., Weingartner R. (2007). Mountains of the world water towers for humanity: typology, mapping and global significance. *Water Resour. Res.* 2007; 43 (7):W07447.