



La sostenibilitat del recurs hídric a Andorra enfrent al canvi climàtic



Cristina PESADO i PONS, Marc PONS i PONS, Juan-Ignacio LÓPEZ MORENO

Introducció

Les zones de muntanya són un dels ambients més fràgils del planeta (Diaz *et al.*, 2003). En aquest sentit és important avançar en el coneixement de l'impacte que està tenint i que pot tenir el canvi climàtic en els recursos hídrics, la biodiversitat o les activitats turístiques, i així afavorir la seva millor conservació i gestió en aquestes zones. Diferents estudis valoren, a partir de l'ús de projeccions climàtiques, l'exposició al canvi climàtic que tindran les zones de muntanya (Nogués-Bravo *et al.* 2007), però hi ha una mancança de treballs que abordin amb detall l'evolució recent del clima a partir de dades observades en estacions situades a altituds mitjanes i altes a causa de la dificultat de disposar de llargues sèries de dades (Esteban *et al.*, 2012).

En qualsevol estudi de canvi climàtic és imprescindible tenir un bon coneixement de l'evolució històrica del clima. Això pot ser una dificultat si fem referència a zones d'alta muntanya del Pirineu, on escassegen les sèries de dades i en major mesura les dades de qualitat (Pons *et al.*, 2014).

Fins al moment s'han realitzat diversos estudis a escala internacional i més concretament al Pirineu (per exemple, López-Moreno *et al.* 2013, 2014; García-Ruiz *et al.*, 2011; Nogués-Bravo *et al.*, 2007; Viviroli, 2003; Beniston, 2012) que analitzen el efectes del canvi climàtic en el recurs hídric en zones de muntanya. No obstant això, no hi ha cap estudi científic que analitzi la influència del canvi climàtic en el recurs hídric a Andorra i ho relacioni amb els impactes socioeconòmics que pot generar.

L'objectiu general de la tesi és explorar de forma multidisciplinària i holística el recurs hídric d'Andorra. Mitjançant el desenvolupament d'un model integral del recurs hídric d'Andorra, es pretén analitzar diferents escenaris futurs combinant canvis en diferents variables tant climàtiques, de canvis en els usos del sòl com canvis socioeconòmics (evolució de la població, del turisme, d'urbanisme, entre d'altres). A més a més, es pretén aprofundir en la contribució

del recurs neu en el balanç hídric ja que és el punt que a dia d'avui se'n coneix menys els seus mecanismes i un dels quals es veurà més afectat pel canvi climàtic.

Per primer cop s'analitzarà amb detall l'efecte el canvi climàtic sobre aquest recurs a Andorra. A més la xarxa hidrològica i nivometeorològica d'Andorra fa que sigui un marc de muntanya ideal per estudiar aspectes de la hidrologia nival poc abordats en la literatura internacional.

Tot i que la situació actual del recurs hídric a Andorra és remarcable, entendre l'evolució futura dels diferents components del cicle hidrològic serà clau per millorar la planificació i avançar-se a possibles conflictes en la gestió de l'aigua.

Per tant, a part d'entendre com el clima pot variar en un futur, també serà clau caracteritzar l'evolució de la demanda, com també aquells altres factors socioeconòmics que generaran pressions sobre el recurs hídric per tal de poder dissenyar de forma adequada polítiques de gestió de l'aigua i estratègies d'adaptació al canvi climàtic.

Per tant, la gestió sostenible de l'aigua s'enfrontarà a grans reptes de futur a causa de les creixents pressions sobre el recurs, d'una banda pel canvi climàtic i de l'altra per l'anomenat *canvi global* (canvis d'usos del sòl i model social de consum, el qual ha comportat un constant augment de la demanda hídrica (Mas-Pla, 2010). Per tant, a part d'entendre com el clima pot variar en un futur, també serà clau caracteritzar l'evolució de la demanda, com també aquells altres factors socioeconòmics que generaran pressions sobre el recurs hídric per tal de poder dissenyar de forma adequada polítiques de gestió de l'aigua i estratègies d'adaptació al canvi climàtic.

Recentment, algun estudi ha començat a abordar com el canvi climàtic i els d'usos del sòl poden afectar algunes zones de muntanya del Pirineu (López-Moreno *et al.* 2013). No obstant, encara no existeix cap estudi en la literatura científica que abordi en detall el cas d'Andorra, ni el vincle amb el model socioeconòmic i els usos de l'aigua.

Tot i que la situació actual del recurs hídric a Andorra és remarcable, diferents agents implicats en la gestió preveuen possibles conflictes i dificultats en la gestió futura com a conseqüència del canvi climàtic i l'increment en la pressió sobre el recurs com a conseqüència de factors com la més gran necessitat de produir neu artificial o l'increment de l'aprofitament hidroelèctric planificat pel Govern, totes aquestes activitats amb un pes important dins del desenvolupament del país i que presenten grans pressions i alhora una gran dependència d'aquest recurs.

En aquest context, tant el darrer informe bianual del Govern d'Andorra en el marc del conveni marc de les Nacions Unides sobre canvi climàtic (BUR,2014) com el del procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC, 2014), remarquen que a causa de la seva importància, els impactes sobre el recurs hídric seran un dels eixos prioritaris per analitzar amb detall i del qual s'hauran de començar a dissenyar i desenvolupar mesures i estratègies d'adaptació el més aviat possible.

Recurs hídric i canvi climàtic

En les darreres dècades, s'ha detectat un canvi climàtic inequívoc d'origen principalment antròpic que està comportant, i es preveu que ho faci en major mesura en un futur, múltiples impactes en diversos àmbits i esferes, entre els quals els associats al recurs hídric han estat

identificats com un dels més importants i que més vulnerabilitats poden comportar en un futur tant en ecosistemes com en la societat humana (IPCC, 2013; Mas-Pla, 2010).

Pel que fa als estudis més recents analitzant projeccions del clima, s'espera un increment continuat de les temperatures, especialment durant els mesos d'estiu, i una disminució de la precipitació total mitjana, tot i que amb un grau elevat d'incertesa en funció del model climàtic analitzat, l'època i l'horitzó (Dequé, 2012). Per a la temperatura, tots els models projecten una tendència constant cap a condicions més càlides (Gibelin i Deque, 2003; Giorgi, 2006; Goubanova i Li, 2007; Alpert *et al.*, 2008; Hertig i Jacobeit, 2008; Sánchez-Gómez *et al.*, 2009; Brunetti *et al.*, 2004; Pons *et al.*, 2016), a més d'una major variabilitat espacial de la temperatura (López-Moreno *et al.*, 2008b). La magnitud prevista del canvi per al pròxim segle varia entre 1 ° C i 6 ° C, depenent del model i l'emissió de gasos d'efecte hivernacle de l'escenari utilitzat (Nogués-Bravo *et al.*, 2007, 2008; Garcia *et al.*, 2011; Pons *et al.*, 2016).

Els escenaris climàtics projecten un major augment de la temperatura en zones d'alta muntanya que en zones menys elevades (Giorgi *et al.*, 1994; Bradley *et al.*, 2006; Nogués-Bravo *et al.*, 2007; Giorgi, 2006).

Les zones d'alta muntanya són la principal font d'aigua per a molts dels rius del món (Viviroli *et al.*, 2003; Beniston, 2003). La forta dependència dels recursos hídrics de muntanya a les fluctuacions en el clima i les característiques d'ocupació del sòl afecta directament la quantitat total i la distribució temporal del cabal, i per tant té importants implicacions per a la gestió de l'aigua (López-Moreno *et al.*, 2008).

Segons les projeccions de diversos models de canvi climàtic, si la temperatura en el futur augmenta entre 2 i 4 °C, és probable que s'observi una disminució dels cabals d'entre 4 i 21% (Frederick, 1997) i una disminució de l'emmagatzematge d'aigua mitjana anual i de la producció d'energia (López-Moreno *et al.*, 2008).

D'altra banda, la hidrologia alimentada per les conques de neu és notablement més sensible a la variabilitat climàtica i als canvis, ja que la neu i el gel responen ràpidament a lleugeres variacions en la precipitació i la temperatura (Nesje i Dahl, 2000; Carrivick i Brewer, 2004; López-Moreno i García-Ruiz, 2004; López-Moreno, 2008). Una marcada disminució en l'acumulació de neu i la durada de la capa de neu (López-Moreno *et al.*, 2009), i una disminució generalitzada en la precipitació (Ragab i Prudhomme, 2002; Giorgi i Lionello, 2008), encara que aquesta última predicció s'associa a variacions espacials i estacionals (López-Moreno *et al.*, 2008 i 2008a; Nogués-Bravo *et al.*, 2008) i una incertesa substancial.

A més de l'augment mitjà de temperatura, s'espera una major ocurrència d'esdeveniments càlids extrems (Beniston, 2004; Diffenbaugh *et al.*, 2007; Giorgi i Lionello, 2008). Aquestes projeccions climàtiques suggereixen una menor capacitat de generació d'escorrentia a causa de l'augment de temperatura i com a conseqüència un augment de l'evapotranspiració i una disminució de la precipitació (López-Moreno *et al.*, 2011; Lespinas *et al.*, 2010; Liuzzo *et al.*, 2010).

En les zones de muntanya l'augment de la temperatura també ha causat una disminució en l'acumulació de neu en latituds mitges i elevades, que sovint ha estat amplificat per les tendències negatives en la precipitació durant l'hivern. El resultat és una reducció del pic de flux durant la fosa de neu a la primavera (Christensen i Lettenmaier, 2007; Barnett *et al.*, 2008;

Dawadi i Ahmad, 2012), i un inici més primerenc de la fusió de la neu i una disminució de l'escorrentia durant la primavera, amb el consegüent inici més primerenc del període de dèficit hídric (López-Moreno i García-Ruiz, 2004; López-Moreno, 2005; Senatore *et al.*, 2010; García-Ruiz *et al.*, 2011).

L'evolució de la precipitació està subjecta a una gran incertesa i variabilitat, però la majoria dels estudis preveuen una tendència general cap a una disminució de la precipitació en el pròxim segle (Ragab i Prudhomme, 2002; Gibelin i Deque, 2003; Giorgi *et al.*, 2004a, b.; Goubanova i Li, 2007; Giorgi i Lionello, 2008; Evans, 2009; López-Moreno *et al.*, 2014b).

El cabal és una resposta integral a les entrades en la conca (clima), la transferència d'aigua, les pèrdues d'aigua per processos d'emmagatzematge per evapotranspiració i els efectes de les activitats humanes en els fluxos d'aigua naturals (López-Moreno *et al.*, 2013). Abans d'arribar a la xarxa una gran proporció de precipitació s'emmagatzema en diversos subsistemes hidrològics (inclosos la capa de neu, la humitat del sòl, reserves d'aigües subterrànies, magatzems de dipòsit) que responen a les condicions climàtiques en diferents escales de temps (Vicente-Serrano i López-Moreno, 2005; McGuire i McDonnell, 2006). Estudis anteriors han demostrat que el temps de resposta de la conca a les condicions climàtiques precedents és molt variable entre les regions, ja que depèn de les característiques físiques de les conques de captació (geologia, topografia, sòls i vegetació), de les condicions climàtiques (taxes d'evapotranspiració, la capa de neu, intensitat de la pluja) i les construccions de preses (Post i Jakeman, 1996; Soulsby *et al.*, 2006; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2010; McDonnell *et al.*, 2010; Fleig *et al.*, 2011).

Molts estudis han revelat una disminució constant del cabal del riu al llarg de gairebé tota la conca mediterrània a causa, d'una banda, a un augment en el consum d'aigua degut a les activitats humanes (noves urbanitzacions, estacions d'esquí, dispositius generadors de neu, etc.) i d'altra banda, per intenses modificacions en la coberta vegetal i usos del sòl en àrees on la pressió humana ha disminuït, i el pasturatge i el cultiu han desaparegut. Aquests tipus de canvis en la coberta del sòl han ocorregut principalment en les capçaleres de muntanya, on es generen la major part dels recursos d'aigua (García-Ruiz *et al.* 2011; López-Moreno *et al.* 2011; García-Ruiz i Llana-Renault, 2011; Vicente-Serrano *et al.*, 2004; Weatherhead i Howden, 2009; Warburton *et al.*, 2012). Aquests canvis en la coberta vegetal afecten el balanç hídric, la reforestació provoca una disminució en la generació d'escorrentia i una resposta atenuada a esdeveniments de tempesta (Ranzi *et al.*, 2002; Beguería *et al.*, 2003; Gallart i Llorens, 2003; Andréassian, 2004) a causa dels efectes sobre l'evapotranspiració i les taxes d'intercepció o infiltració (Joffre i Rambal, 1993; Llorens *et al.*, 1995, 1997; Cosandey *et al.*, 2005; David *et al.*, 2006; López-Moreno i Latron, 2008; Beguería *et al.*, 2006; Llorens i Domingo, 2007), la dinàmica de la humitat del sòl (Correia, 1999; Maestre i Cortina, 2004) i la recàrrega d'aqüífers (Callegari *et al.*, 2003). Per tant, podem dir que els efectes combinats de la regeneració dels boscos i el canvi climàtic poden reduir els cabals anuals (López-Moreno *et al.* 2014b).

No obstant això, la magnitud de l'impacte del canvi de cobertura del sòl en la resposta hidrològica depèn de les característiques de la conca, el tipus de vegetació i l'edat dels boscos, la intensitat de les precipitacions i els efectes d'escala espacial (Bunte i MacDonald, 1995; Andreassian, 2004; Calder, 2007).

La investigació sobre el canvi ambiental i el funcionament hidrològic dut a terme als Pirineus durant diverses dècades ha portat un avançat coneixement dels canvis hidrològics en diverses escales espacials, a escala de la conca (Beguería *et al.*, 2003; Lasanta *et al.*, 2006; García-Ruiz *et al.*, 2008). Malgrat això, hi ha molts components del sistema hidrològic que segueixen sent poc coneguts, com a conseqüència de la manca de dades hidrometeorològiques (especialment a l'alta muntanya) i les dificultats associades amb l'estimació actual de l'evapotranspiració, l'equivalent en aigua de la neu i la recàrrega d'aigua subterrània a escala de conca (López-Moreno *et al.* 2011).

Les decisions de planificació del recursos hídrics futurs s'han de basar no només en la demanda d'aigua, sinó també en els escenaris futurs del clima i de cabal. Les incerteses inclouen com els canvis ambientals afectaran la quantitat i qualitat dels recursos d'aigua i els règims fluvials, i com els nous escenaris afectaran la gestió de l'aigua (García-Ruiz *et al.* 2011).

Recurs hídic i canvi climàtic a Andorra

Per al cas d'Andorra, no hi ha cap estudi, a excepció de BUR-Miquel (2014), que analitzi els impactes del canvi climàtic sobre el recurs hídic. En aquest estudi, a partir de l'increment que s'ha detectat en la temperatura mitjana anual de 0,2 °C/dècada entre 1931 i 2013, Esteban *et al.* (2012) han observat una disminució de la precipitació mitjana anual (44 mm/dècada). També s'ha observat un increment de l'evapotranspiració i una disminució del recurs hídic total (Miquel, 2012; BUR, 2014).

S'espera que aquests canvis en la temperatura també afectin de manera significativa la cobertura de neu del Principat, tant en la distribució com en els gruixos i l'estacionalitat (Pons *et al.*, 2012, 2014; López-Moreno *et al.*, 2014).

A causa del fort paper que juga la neu en el règim hidrològic en les nostres latituds, aquesta dinàmica tindrà un fort impacte tant en la quantitat del recurs disponible com en la seva temporalitat (López-Moreno i García-Ruiz, 2004; Tague i Peng, 2013). A més, els processos hidrològics en zones de muntanya són especialment sensibles al canvi climàtic a causa dels abruptes canvis de temperatura i precipitació a curtes distàncies com a conseqüència de l'orografia (Beniston, 2005).

Per tant, la gestió sostenible de l'aigua s'enfrontarà a grans reptes de futur per les creixents pressions sobre el recurs, d'una banda pel canvi climàtic i de l'altra, per l'anomenat *canvi global* (canvis d'usos del sòl i model social de consum), el qual ha comportat un constatat augment de la demanda hídrica (Mas-Pla, 2010).

El 2007, el Grup intergovernamental d'experts sobre canvi climàtic (IPCC) va identificar les zones de muntanya com a espais especialment sensibles al canvi climàtic. Segons l'escenari A1B de l'IPCC, per al final del segle XXI s'espera un augment de la temperatura de 3,6 °C i una disminució de la precipitació del 16,8% al país. S'espera un augment mitjà de +0,29 °C per dècada en les temperatures i una variació anual de la precipitació de -1,4 mm. També es veuran afectats els recursos hídrics d'Andorra, estimats en 282 hm³/any de mitjana per al període 1961-1990, i s'esperen canvis en els horitzons futurs de -42 hm³ per al període 2021-2050 (-14,9%) i -106 hm³ per al període 2071-2100 (-37,6%). Els cabals dels rius ja estan sentint

aquest efecte, amb una reducció general dels valors de les mitjanes decennals del 33% per al Gran Valira a partir del 1951-1960 (BUR, 2014).

D'altra banda, el 2 de març del 2011 Andorra es va adherir a la Convenció marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic, i està, per tant, subjecta a obligacions específiques, com ara presentar un inventari de les emissions de gasos d'efecte hivernacle i establir programes nacionals o regionals per mitigar el canvi climàtic i facilitar-ne l'adaptació adequada (BUR, 2014). Recentment, algun estudi ha començat a abordar com el canvi climàtic i els d'usos del sòl poden afectar algunes zones de muntanya del Pirineu (López-Moreno *et al.*, 2013). No obstant, encara no hi ha cap estudi en la literatura científica que abordi en detall el cas d'Andorra ni el vincle amb el model socioeconòmic i els usos de l'aigua. Tot i que la situació actual és positiva, diferents agents implicats en la gestió preveuen possibles conflictes i dificultats en la gestió futura com a conseqüència del canvi climàtic i l'increment en la pressió sobre el recurs a conseqüència de factors com la necessitat més gran de produir neu artificial o l'increment de l'aprofitament hidroelèctric planificat pel Govern.

En aquest context, tant el darrer informe bianual del Govern d'Andorra en el marc del Conveni marc de les Nacions Unides sobre canvi climàtic (BUR, 2014) com el del procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC, 2014), remarquen que, a causa de la seva importància, els impactes sobre el recurs hídic seran un dels eixos prioritaris a analitzar amb detall i del qual s'hauran de començar dissenyar i desenvolupar mesures i estratègies d'adaptació al més aviat possible.

Contribució del recurs neu sobre el balanç hídic i l'efecte del canvi climàtic

Conèixer el paper del mantell de neu sobre els recursos hídrics és un requisit per entendre la vulnerabilitat de les diferents conques hidrogràfiques als canvis que s'esperen en l'acumulació i durada del mantell de neu (Garcia *et al.*, 2011).

La capa de neu exerceix un fort control sobre l'ecologia, l'agricultura, la disponibilitat dels recursos hídrics, l'operació d'una àmplia gamma d'activitats econòmiques i riscos associats a regions muntanyoses i d'alta latitud (Beniston, 1997; Barnett *et al.*, 2005).

Les condicions climàtiques necessàries per a l'acumulació de neu són ben conegudes: temperatura per sota de zero, precipitació en forma de nevades i la persistència de baixes temperatures per mantenir la capa de neu (Morán-Tejeda *et al.*, 2013).

La major part dels estudis que s'han realitzat anteriorment posen de manifest la probabilitat que en les pròximes dècades hi hagi un fort descens de la neu acumulada, una reducció de la disponibilitat de la neu per arribar a cobrir la temporada i una disminució de la crescuda dels recursos hídrics durant la primavera (Rasmus *et al.*, 2004; Dankers i Christensen, 2005; Keller *et al.*, 2005; Merritt *et al.*, 2006; Hantel i Hirtl-Wielke, 2007; Mellander *et al.*, 2007; Mote 2003; Barnett *et al.*, 2005).

També s'ha detectat un augment significatiu de la temperatura a la majoria de les regions muntanyoses del món en les últimes dècades (Pepin i Seidel, 2005; Díaz i Eischeid, 2007; Pepin i Lundquist, 2008; Ohmura, 2012). Aquest canvi en la dinàmica de la capa de neu és una conseqüència de la gran sensibilitat de la neu a l'augment de la temperatura, la qual cosa provoca una disminució de les nevades en relació amb les precipitacions i un augment de

l'energia disponible per a la fusió de la neu (Rood *et al.*, 2008). Segons López-Moreno *et al.* 2013 un canvi d'1 °C causaria una reducció del 20% de l'equivalent d'aigua en neu acumulada i un escurçament notable de la temporada de neu en una conca petita als Pirineus.

Les muntanyes juguen un paper crític en la disponibilitat dels recursos hídrics a les zones baixes de les conques hidrogràfiques. Els gradients altitudinals de la temperatura i la precipitació asseguren que les capçaleres reben més precipitacions i tenen una taxa d'evapotranspiració inferior que les zones adjacents més baixes (Viviroli *et al.*, 2004; De Jong *et al.*, 2009; López i Justribó, 2010). En aquestes regions de muntanya de latituds altes i mitjanes una gran quantitat de precipitació cau en forma de neu i és durant la fosa de la neu a la primavera que provoquen elevats fluxos en els rius, fins i tot en les zones on el clima presenta una alta variabilitat interanual (López-Moreno *et al.*, 2004; Barnett *et al.*, 2005).

La dependència de la neu a la temperatura estacional fa que la capa de neu a latituds mitjanes sigui altament vulnerable a l'escalfament climàtic (Morán-Tejeda *et al.*, 2013). No obstant això, les condicions per a l'acumulació de neu a les muntanyes estan invariablement vinculades a l'altitud i la topografia, i per tant la dependència de la coberta de neu al clima és difícil de determinar (Hantel *et al.*, 2000). Així doncs, l'altitud és un dels factors geogràfics més importants que influeixen en els canvis en la temperatura i la humitat a escales espacials petites (Morán-Tejeda *et al.*, 2013).

Morán-Tejeda *et al.* (2013) indiquen que hi ha una relació lineal entre l'altitud i la correlació de la temperatura amb el gruix de la capa de neu i la seva durada. Identifiquen una altitud lliardar d'aproximadament 1.400 m snm (\pm 200 m, depenent de l'índex de neu considerat), per sota del qual la temperatura és la principal variable explicativa i per sobre del qual la precipitació és un millor predicador de la variabilitat de la capa de neu. Els resultats també destaquen que a mesura que el clima és més càlid augmenta l'altitud a la qual la temperatura és la principal limitació en l'acumulació de neu (Morán-Tejeda *et al.*, 2013; López-Moreno *et al.*, 2009; Jefferson, 2011; Wi *et al.*, 2012).

Segons les projeccions climàtiques, el lliardar d'altitud augmentarà i en resultaran més problemes econòmics per a les nombroses estacions d'esquí que es troben per sota d'aquesta altitud crítica. Altres possibles conseqüències d'un canvi en el lliardar de l'altitud inclouen els canvis en els règims hidrològics i els canvis en el comportament i el funcionament dels ecosistemes de muntanya (Morán-Tejeda *et al.*, 2013).

Estudis anteriors (Beniston, 2012; Laternser i Schneebeli, 2003; Marty, 2008; Scherrer *et al.*, 2004) també informen sobre les tendències de la disminució del gruix i la durada de la capa de neu en llocs de baixa altitud associades amb l'augment de la temperatura. A elevades altituds les tendències no són significatives ja que les temperatures són encara prou baixes per permetre l'acumulació de neu a l'hivern i la primavera i sota aquestes condicions, la precipitació és un factor important determinant en el comportament de la capa de neu.

D'altra banda, a causa de la complexa topografia de les zones de muntanya, l'angle del pendent i el seu aspecte també és molt probable que influeixen en la sensibilitat de la capa de neu al canvi de temperatura (Uhlmann *et al.*, 2009).

Encara que se sap que l'orientació del pendent juga un paper important en la distribució de la neu (Elder *et al.*, 2000; Anderton *et al.*, 2004; Marofi *et al.*, 2011), l'estudi de López-Moreno

et al. (2014) presenta la primera anàlisi detallada de l'efecte de l'orientació del pendent a la resposta de la capa de neu a l'escalfament climàtic. Amb l'augment de la temperatura, l'efecte de l'aspecte del pendent en l'acumulació i fusió augmenta, i dona lloc a diferències més grans en la màxima acumulació de neu i la durada de la capa de neu. Per tant, la radiació solar entrant té un efecte creixent sobre la dinàmica de la capa de neu (McNamara et al., 2005).

La capa de neu amb pendents orientats al sud sembla particularment vulnerable a l'escalfament del clima; on els pendents estan més exposats a la radiació solar s'acumula menys neu i se sotmeten a una fusió anticipada (López-Moreno et al., 2013).

López-Moreno et al., (2009) detecten que l'impacte del canvi climàtic en l'acumulació total equivalent en aigua de la neu es caracteritza per forts gradients altitudinals i una variabilitat espacial horitzontal, i també observen que el gruix de neu en un lloc determinat està fortament afectat per les condicions locals (aspecte, els processos de la deriva del vent, etc.). L'acumulació i fusió de la neu juguen un paper determinant en la distribució estacional del cabal dels rius, especialment en conques de muntanya (García-Ruiz et al., 2011). Generalment, de novembre a final d'abril, la major part de la precipitació és en forma de neu i es reté en forma sòlida a més de 1.600 m snm (López-Moreno et al., 2004). El cabal és molt baix en les zones de capçalera i és encara menor a l'hivern que a l'estiu (García-Ruiz et al., 2001). Durant la primavera, la coincidència del període de fosa de la neu amb l'època de pluges augmenta ràpidament els cabals i es mantenen fluxos elevats durant un període de dos o tres mesos. L'esgotament de la capa de neu, juntament amb el final de la temporada de pluges, condueix a un període de baix flux durant l'estiu (López-Moreno et al., 2004).

No obstant això, l'escalfament global afecta directament l'acumulació i fosa de la neu, d'una banda, per l'augment progressiu de la temperatura que eleva la isoterma d'hivern de 0 °C, de manera que s'acumula menys neu a les capçaleres i cau més pluja a l'hivern; i, d'altra banda, la fosa es produeix més aviat i de forma més ràpida. Les dues respostes causen més canvis en els règims fluvials, descàrregues baixes i relativament constants a l'hivern, descàrregues altes i molt variables a la primavera i cabals inferiors durant l'estiu (Beniston et al., 2003; López-Moreno, 2004 i 2005; Adam et al., 2009).

Per tant, les precipitacions durant l'hivern es consideren el principal factor que controla l'acumulació de neu al Pirineu, i el seu declivi explica la major part de la reducció del gruix de neu observat en les últimes dècades (López-Moreno, 2004).

Una de les dificultats que existeixen és la falta d'informació hidroclimàtica i de neu de què es disposa en zones d'alta muntanya (Grabherr et al., 2005). A més, un dels problemes que afecta l'eficiència de la mesura de la precipitació és el vent, per la turbulència provocada pel mateix vent que es genera en la boca dels pluviòmetres. A temperatures més fredes que -2°C, on la quantitat de precipitació es pot subestimar fins a un 80% a velocitats del vent més altes que 5ms-1 (Buisan et al., 2016).

D'altra banda, estudis han posat de manifest el control de la topografia sobre la distribució de la neu en les zones de muntanya (Anderton et al., 2004; Erickson et al., 2005; Lehning et al., 2011; Mott et al., 2013), i la importància de la vegetació i l'exposició al vent (Erxleben et al., 2002; Trujillo et al., 2007).

La mesura en què les variables topogràfiques expliquen la distribució de la neu pot canviar

durant la temporada. La variabilitat de les característiques del terreny poden conduir a processos relacionats amb la variabilitat espacial de l'acumulació de neu (neu transportada pel vent, curvatura del terreny) (Lehning *et al.*, 2008; Revuelto *et al.*, 2014), o afectar l'intercanvi energètic entre el terreny i la capa de neu (temperatura, la radiació solar entrant (Molotch *et al.*, 2005).

Per tant, existeixen diferents variables que governen la distribució de la capa de neu entre zones com a conseqüència de les seves característiques i entorns geogràfics diferents. Aquestes diferències inclouen l'extensió de la superfície, els gradients altitudinals, la importància de la redistribució del vent, la presència o absència de vegetació i la complexitat topogràfica (Revuelto *et al.*, 2014).

Una altra de les dificultats en zones d'alta muntanya és arribar a separar la contribució de l'aigua provinent de la pluja de la que prové de la fusió del mantell de neu en l'escorrentia igual que els processos que es produeixen des que comença la fusió del mantell de neu fins que aquesta aigua apareix en l'escorrentia superficial. Per analitzar aquests aspectes existeixen una sèrie de tècniques com les mesures contínues del mantell de neu combinant mesures manuals del contingut d'aigua del mantell de neu i una monitorització amb làser escàner terrestre; mesures dels isòtops estables dels àtoms que formen la molècula d'aigua discriminant la diferent composició isotòpica per conèixer quanta aigua prové de la precipitació líquida, quanta per la fusió del mantell de neu i fins a quin moment del final de la primavera o inici de l'estiu perdura el senyal nival en l'aigua acumulada a la conca (diferents valors d'oxigen i deuteri) (Laudon *et al.*, 2004).

La neu és una font important de riquesa econòmica en moltes regions de muntanya. Des d'una perspectiva econòmica, el turisme d'hivern, i la viabilitat de les zones rurals d'on està localitzat, són dependents d'hiverns amb neu abundant (Elsässer i Burki, 2002). La capa de neu també controla la quantitat d'escorrentia estacional en els rius alpins i té una influència directa en el sector de l'energia a través de l'energia hidroelèctrica (Rahman *et al.*, 2012), que és la principal font d'electricitat de la majoria dels països alpins (Romerio, 2002).

La majoria dels estudis relacionats amb la sensibilitat de la neu a un clima més càlid, i els seus impactes ambientals i socioeconòmics associats, posen en relleu la necessitat de considerar les característiques regionals i locals de determinades zones de muntanya (López-Moreno *et al.*, 2014). Per tant, els canvis en els patrons de precipitació poden equilibrar o accelerar la magnitud dels canvis en les característiques de la capa de neu provocats per augments de les temperatures (López-Moreno *et al.*, 2013).

Una de les principals dificultats en els estudis de la neu és l'obtenció d'informació fiable de les variables que descriuen la distribució de la neu, inclosos el gruix de neu (SD), l'aigua equivalent en la neu (SWE) i l'àrea coberta de neu (SCA) (Jost *et al.*, 2007; López-Moreno *et al.*, 2012a; Watson *et al.*, 2006). El mostreig manual no és factible per a grans àrees, a causa del temps implicat. En l'última dècada l'ús d'escàners làser aerotransportat (ALSs) (Deems *et al.*, 2006) i escàners làser terrestres (TLSs) (Prokop, 2008), tots dos basats en la tecnologia Lidar (*light detection and ranging*), han proporcionat grans avanços en l'obtenció de dades sobre la distribució de gruix de neu a resolucions espacials sense precedents (Revuelto *et al.*, 2014).

A més, les mesures d'alta densitat que ofereixen les tecnologies Lidar són un recurs valuós per a la investigació detallada de la vinculació entre la distribució de la neu i la topografia. En el

passat, aquesta vinculació s'ha estudiat sobretot amb l'ús de mesures manuals, i per tant generalment limitades en resolució espacial i temporal (López-Moreno *et al.*, 2010).

Com a complement a les observacions *in situ* i per observar la distribució espacial de la neu a la conca, també és útil l'ús de la teledetecció per satèl·lit per supervisar l'efecte del clima en la dinàmica de la neu. Es poden obtenir productes diaris de neu a partir del Modis (Terra / MOD10A1 i Aqua / MYD10A1), que són àmpliament utilitzats per generar climatologies de la coberta de neu (Gascoin *et al.*, 2015).

Els productes de neu amb Modis tenen una precisió suficient per als estudis hidroclimàtics a l'escala dels Pirineus. Utilitzant un algorisme *gap-filling (omplint buits)* es genera una capa de neu climatològica consistent, cosa que permet calcular la mitjana mensual de la durada de la capa de neu per elevació i aspecte (Gascoin *et al.*, 2015).

D'altra banda i per representar els processos climàtics de forma més detallada en regions geogràfiques limitades és útil emprar els models climàtics regionals (RCM) comparables als models de circulació atmosfèrics i terrestres (AOGCM) (Rummukainen, 2001).

Els models RCM simulen la temperatura i precipitació per a un període determinat de control i un període futur establint diferents escenaris de canvi climàtic i coberta del sòl. S'ha demostrat que aquest tipus de model reproduïx raonablement la precipitació i la temperatura observada per al període de control (López-Moreno *et al.*, 2014b). Cap altre model no ha demostrat que es reproduïxi millor el clima als Pirineus (López-Moreno *et al.*, 2014b).

Amb el temps, l'augment de la resolució espacial dels RCM, que s'ha habilitat per la ràpida evolució dels recursos computacionals, ha millorat la comprensió dels processos climàtics regionals i l'avaluació de l'evolució futura dels patrons climàtics regionals influïdes per un canvi climàtic global (Beniston, 2005).

Actualment, s'utilitzen simulacions detallades amb cel·les de 5 km o fins i tot 1 km per analitzar els detalls de la precipitació en relació amb l'escorrentia superficial, la infiltració i l'evaporació (per exemple, Arnell, 1999; Bergstrom *et al.*, 2001), els esdeveniments extrems com ara la precipitació (Frei *et al.*, 1998) i tempestes de vent perjudicials (Goyette *et al.*, 2001).

Finalment, en els últims anys, de molts models de balanç de massa i energia del mantell de neu el model CRHM (Cold Regions Hydrological Model) s'ha mostrat molt útil a l'hora de realitzar una modelització hidrològica d'una conca de muntanya gràcies a la seva flexibilitat en funció de la informació disponible i a l'escàs requeriment de parametrització que requereix ja que se centra en la simulació de processos (Ellis *et al.*, 2010).

Per aquest model, se simula el balanç energètic de la neu utilitzant dades d'estacions meteorològiques que mesuren la temperatura (T), la precipitació (P), la humitat relativa (Rh), la velocitat del vent (Ws), la radiació solar entrant ($K\downarrow$) i la profunditat de la neu en un interval temporal mínim d'una hora (López-Moreno, 2014).

Les dades meteorològiques s'utilitzen com a entrada per al model CRHM (Pomeroy *et al.*, 2007), per simular un seguit de processos hidrològics en regions muntanyoses i fredes (inclosos el transport de la neu pel vent, la intercepció, el balanç energètic de la fosa de neu, la infiltració d'aigua de pluja o de fusió dels sòls congelats) (Pomeroy *et al.*, 2012) en conques petites i de mida mitjana (Pomeroy *et al.*, 2007). Per tant, el model pot ser utilitzat tant per a la predicció, el diagnòstic i la comprensió dels processos hidrològics (López-Moreno *et al.*, 2014).

Conclusió

El canvi climàtic és una evidència inequívoca que afecta variables com la temperatura i la precipitació, reguladors imprescindibles del recurs hídic. Els impactes sobre el recurs hídic han estat identificats com un dels més importants i que més vulnerabilitats pot comportar en un futur tant en ecosistemes com en la societat humana. Per tant, les zones de muntanya, i Andorra no n'és una excepció, han estat identificades com a zones especialment vulnerables al canvi climàtic i on aquestes la seva magnitud es farà notar de forma més intensa.

La temperatura i la precipitació expliquen la variabilitat del gruix i la durada de la neu en la zona d'estudi i alhora la neu juga un paper clau en la regulació del balanç hídic tant en la seva temporalitat com en la seva quantitat.

El model socioeconòmic actual d'Andorra i els seus patrons de consum, fortament influenciats per l'activitat turística, fan que sigui especialment intensiu en el consum d'aigua. L'evolució tant demogràfica com socioeconòmica i en especial l'evolució del model turístic (per exemple, més dependència dels canons de neu per operar per part de les estacions d'esquí o la major necessitat d'explotar el recurs hídic per generar energia) fan que la pressió futura sobre aquest recurs es pugui veure incrementada en un futur.

Tal com remarca la directiva marc de l'aigua, per entendre les dinàmiques presents i futures del recurs hídic i la seva vulnerabilitat és necessari entendre i modelitzar de manera integral, sistèmica i holística la gestió de, per exemple, entendre els impactes i les repercussions a escala socioeconòmica dels canvis que s'esperen a escala climàtica.

L'aigua, a part de ser l'element clau del cycle hidrològic, té un valor fonamental tant per als ecosistemes com en l'àmbit socioeconòmic, i juga un paper clau en el desenvolupament sostenible. No obstant, canvis en el clima, la població, els models de consum, el canvi d'usos del sòl o la creixent urbanització dels ecosistemes està afectant i seguirà modificant de forma notòria el cycle hidrològic i la qualitat i disponibilitat futura del recurs hídic. En el cas d'Andorra, el recurs hídic gaudeix d'un estat de salut remarcable tant pel que fa a la qualitat com a la disponibilitat. No obstant, la confluència, d'una banda, d'un potencial canvi climàtic que podria afectar de forma significativa el recurs i, de l'altra, la preponderància d'un model socioeconòmic, amb un pes molt important del turisme, basat en un ús intensiu de l'aigua, podria posar en risc la futura sostenibilitat del recurs hídic.

Cristina Pesado i Pons,

geòloga i màster en gestió de l'aigua, doctoranda a l'OBSA

Marc Pons i Pons,

doctor en enginyeria de la sostenibilitat i investigador al CENMA,
director de l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra, OBSA

Juan-Ignacio López Moreno,

Instituto Pirenaico de Ecología IPE-CSIC

Bibliografia

- ARBUÉS, F.; BARBERÁN, R.; VILLANÚA, I. (2000) Water price impact on residential water demand in the city of Zaragoza. A dynamic panel data approach. Paper presented at the 40th European Congress of the European Regional Studies Association (ERSA) in Barcelona, Spain, 30–31 August.
- ARBUÉS F.; GARCÍA-VALIÑAS M. A.; MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2003) "Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review". *Journal of Socio-Economics*, 32, 81–102.

- BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; LORENTE, A.; SEEGER, M.; GARCÍA-RUIZ, J. M. (2003) "Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees". *Ambio* 32, 283–286.
- BENISTON, M. (1997) "Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcing". *Climatic Change* 36, 281–300.
- BENISTON, M. (2003). "Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts". *Clim. Change*, 59, 5–31.
- BENISTON, M. (2005). "Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps". *Pure and Applied Geophysics* 162: 1587–1606. DOI: 10.1007/s00024-005-2684-9.
- BOLAND, J. J. (1997). "Pricing urban water: Principles and compromises". Paper presented at the World Bank seminar on Pricing of Sanitation and Water Services, February 18–19.
- BOLAND, J. J.; WHITTINGTON, D. (1998). "The political economy of increasing block tariffs in developing countries". Paper Presented at the World Bank Sponsored Workshop on Political Economy of Water Pricing Implementation, Washington, DC, November 3–5.
- BUR (2014) *Premier rapport bisannuel de l'Andorre à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Departament de Medi Ambient. Govern d'Andorra.
- CASAL, A.; JORDANA, J. (2012) "Societat d'Aigües Potables del Poble de Canillo. Antoni Casal i Mandicó i Jordi Jordana i Rossell." In *L'aigua i Andorra*. 24 Diada Andorrana (vol. 166, p. 163–166). <http://doi.org/10.2436/15.0110.13.25>.
- CATTIAUX, J.; VAUTARD, R.; YIOU, P.: "Origins of the extremely warm European fall of (2006)". *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06713.
- CHICOINE, D. L.; RAMAMURTHY, G. (1986). "Evidence on the specification of price in the study of domestic water demand". *Land Economics* 62 (1), 26–32.
- Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra. (2012b). *Estudi per a l'elaboració anyal del balanç hídric del Principat d'Andorra -Any 2011- (període 2008-2012)*. <http://www.mediambient.ad/aigua>
- Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra. (2013). *Estudi per a l'elaboració* <http://www.mediambient.ad/aigues-subterrànies>
- Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra. (2015). *Balanç del servei i manteniment de les estacions depuradores d'aigües residuals d'Andorra i del servei d'explotació i manteniment dels sanejaments autònoms*. <http://www.mediambient.ad/pla-de-sanejament-aigues>
- DEQUE, M. M. (2012). *SCAMPEL: Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne: Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes*. Final Report. CNRS/URA GAME.
- DEYA TORTELLA, B.; TIRADO, D. (2011). "Hotel water consumption at a seasonal mass tourist destination. The case of the island of Mallorca". *Journal of Environmental Management* 92 (2011) 2568-2579.
- ELLIS C. R.; POMEROY, J. W.; BROWN, T.; MACDONALD, J. (2010). "Simulation of snow accumulation and melt in needleleaf forest environments". *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 925-940.
- ESTEBAN, 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: 89-108. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/>
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *EEA Technical Report*, 16 (2013). Assessment of cost recovery through water pricing, 128 p.
- GARCIA, J. M. (2003) *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*, 336 p.
- GARCÍA-RUIZ, J. M.; REGÜÉS, D.; ALVERA, B.; LANA-RENAULT, N.; SERRANO-MUELA, P.; NADAL-ROMERO, E.; NAVAS, A.; LATRON, J.; MARTI-BONO, C.; ARNÁEZ, J. (2008) "Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees". *J. Hydrol.*, 356, 245–260.
- GARCÍA-RUIZ, J. M.; LANA-RENAULT, N. (2011) "Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region - a review". *Agric Ecosyst Environ*;140 (3-4): 317–38.
- 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 Sci Rev* 105 (3-4):121–139.
- GARCÍA-VALIÑAS, M. A.; MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, F. (2010) "Affordability of residential water tariffs: Alternative measurement and explanatory factors in southern Spain". *Journal of Environmental Management*, 91, 2696-2706.
- GASCOIN, S.; HAGOLLE, O.; HUC, M.; JARLAN, L.; DEJOUX, J-F.; SZCZYPTA, C.; MARTI, R.; SÁNCHEZ, R. (2015) "A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2337–2351.
- GELABERT, D. (2012). "Evolució de la gestió de les xarxes d'aigua potable i residual de la parròquia de la Massana". In

- L'aigua i Andorra*, 24 Diada Andorrana (vol. 130, p. 129-130). <http://doi.org/10.2436/15.0110.13.18>.
- GÖSSLING, S.; PEETERS, P.; HALL, C. M.; CERON, J.-P.; DUBOIS, G.; LEHMANN, L. V.; SCOTT, D. (2012) "Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review". *Tourism Management* 33, 1-15.
- GRABHERR, G.; GURUNG, A. B.; DEDIEU, J.; HAEBERLI, W.; LOTTER, A. F.; PAULI, H.; PSENNER, R. (2005) "Long-term environmental observations in mountain biosphere". *Mount. Res. Dev.* 25:376-382.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis IPCC Working Group I Contribution to AR5.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; GARCÍA-RUIZ, J. M. (2004) "Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees". *Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques* 49: 787-802.
- LÓPEZ-MORENO, J. I. (2005) "Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees". *Arct. Antarct. Alp. Res.* 37 (2), 253-260.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; 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.; LATRON, J. (2008) "Influence of forest canopy on snow distribution in a temperate mountain range". *Hydrological Processes* 22 (1), 117-1266.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; GOYETTE, S.; BENISTON, M. (2008a) "Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and expected changes over the Pyrenees from a set of regional climate models". *Int. J. Climatol.*, 28 (11), 1535-1550.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; GOYETTE, S.; BENISTON, M. (2009) "Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: horizontal spatial variability and vertical gradients". *J. Hydrol.*, 374, 384-396.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; VICENTE-SERRANO, S. M.; MORÁN-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". *Hydrol Earth Syst Sci.* 15:311-22.
- 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.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; POMEROY, J.; REVUELTO, J.; VICENTE-SERRANO, S. M. (2013a) "Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees". *Hydrological Processes* 27 (18): 2637-2650.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; REVUELTO, J.; GILABERTE, M.; MORÁN-TEJEDA, E.; PONS, M.; JOVER, E.; ESTEBAN, P.; GARCÍA, C.; POMEROY, J. W. (2014) "The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees". *Theor Appl Climatol* 17:207-219. DOI 10.1007/s00704-013-0991-0.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; ZABALZA, J.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REVUELTO, J.; GILABERTE, M.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; TAGUE, C. (2014b) "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 Journal* 493:1222-1231.
- MAS-PLA, J. (2010) "Vulnerabilitat territorial dels recursos hidrològics al canvi climàtic". In: Llebot, J. E. (ed.) *Segon Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya*. Generalitat de Catalunya. CADS, Barcelona, p. 836-871.
- MENÉNDEZ, C.; CALLEJO, N. (2012) "La gestió de la xarxa i l'estació de tractament d'aigua potable (ETAP) d'Encamp". In *L'aigua i Andorra*. 24 Diada Andorrana (vol. 106, p. 95-106). <http://DOI.org/10.2436/15.0110.13.12>.
- MIQUEL, C. (2012) *Étude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des Pyrénées*. Mémoire Université de Montpellier II.
- MORÁN-TEJEDA, E.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BENISTON, M. (2013) "The changing roles of temperature and precipitation on snowpack variability in Switzerland as a function of altitude". *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 2131-2136, DOI:10.1002/grl.50463.
- NAUDI, T. (2012) "L'aigua en una estació d'esquí". In *L'aigua i Andorra*. 24 Diada Andorrana (vol. 189, p. 185-189). <http://DOI.org/10.2436/15.0110.13.29>.
- POMEROY, J. W.; GRAY, D. M.; HEDSTROM, N. R.; QUINTON, W. L.; GRANGER, R. J.; CAREY, S. K. (2007) "The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence". *Hydrol Process* 21:2650-2667.
- REYNAUD, A. (2008) "Social policies and private sector participation in water supply e the case of France". In: Prasad, Naren (ed.) *Social Policies and Private Sector Participation in Water Supply*. Palgrave. Basingstoke & New York, p. 37-69.

- REYNAUD, A. (2016) *Estimating a Household Water Demand in Andorra: Some Preliminary Results for Andorra la Vella*. IDEI - Toulouse School of Economics.
- 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 Interact*; 8 (1): 42.
- TAGUE, C.; PENG, H. (2013) "The sensitivity of forest water use to the timing of precipitation and snowmelt recharge in the California Sierra: implications for a warming climate". *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences* 118(2): 875–887.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; LASANTA, T.; ROMO, M. (2004) "Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central Pyrenees: role of human management". *Environ. Manage.* 34, 802–818.