



## Laura Trapero i Bagué

Doctora en física,  
investigadora al CENMA  
(Centre d'Estudis de la  
Neu i la Muntanya  
d'Andorra), Institut  
d'Estudis Andorrans

Tot i que la meteorologia i la predicció del temps formen part del nostre dia a dia d'una forma molt natural, els reptes amb què es troba la comunitat científica en zones de muntanya, tant des d'un punt de vista aplicat com estrictament de recerca, són nombrosos.

La regió d'Andorra té un relleu molt marcat amb altituds compreses entre els 837 m, al fons de la vall més meridional, i els 2.942 m del seu pic més alt (el Comapedrosa); dades que el converteixen en el país amb l'altitud mitjana més elevada d'Europa (2.044 m). El Principat, a diferència de les regions pirinenques veïnes d'Espanya i França, va experimentar un creixement econòmic molt important durant la segona meitat del segle XX, afavorit per l'inici de les activitats comercials i turístiques. Aquest creixement ha convertit Andorra en la regió més exposada als riscos naturals de tot el Pirineu a causa del gran nombre d'infraestructures i la seva elevada densitat de població (>140 habitants per km<sup>2</sup>, comparable a la densitat mitjana de la regió dels Alps). Així doncs, quan els vessants muntanyosos amb pendents molt marcats presents a tot el país són afectats per precipitacions intenses, s'incrementa considerablement la probabilitat d'ocurrència d'episodis de risc natural com esllavissades, caigudes de blocs, allaus o inundacions sobtades que poden afectar la població (Gallego, 2003). En concret, a Andorra el risc natural més freqüent és la caiguda de blocs, però, en canvi, la catàstrofe natural més tràgica que ha viscut el país en el darrer segle ha estat l'episodi de precipitacions intenses i inundacions ocorregut el novembre de 1982, amb 13 morts, importants pèrdues econòmiques i marcats efectes en el terreny. Aquest episodi es recull en el catàleg de Barredo (2007), que comprèn el període 1950-2005 i inclou els episodis d'inundacions més catastròfics ocorreguts a Europa. Pel que fa a les allaus, tot i que no són el risc més freqüent al país, són el fenomen que més víctimes mortals ha causat: 15 morts en 35 anys (Gallego et al., 2011). Així doncs, aquests efectes posen de manifest la rellevància i la necessitat



Laura Trapero i Bagué

## Quins són els reptes de la predicció meteorològica en zones de muntanya?

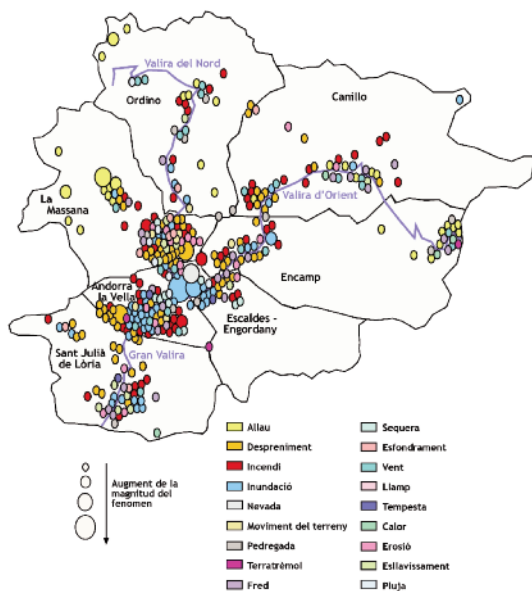


Figura 1. Mapa de localització d'alguns fenòmens de risc natural ocorreguts a Andorra entre els anys 1975 i 2002, a partir de la premsa del país. Font: Gallego, 2003

naturalesa diversa: precipitació orogràfica al vessant de sobrent, formació d'ones de muntanya a sotavent, formació del dipol orogràfic, bloqueig d'aire i forts vents paral·lels a la serralada a causa del gradient de pressió, pas de nevades intenses al sud del país, efecte foehn (la gavatxa o fogony), etc. Aquí és on entren en joc els models numèrics de predicció del temps i la seva capacitat de simular i predir el comportament (estat i evolució) de l'atmosfera, tant a escala global com local amb la millor exactitud possible. Per tant, el primer requisit necessari en zones de muntanya és un augment de l'escala de treball dels models que permeti una representació més detallada de l'orografia de la zona, com també de les seves característiques (tipus de sòl, albedo de la superfície, presència de neu al sòl, etc.); factors que juguen un paper fonamental en processos mesoescalars i en la generació d'efectes locals. Malauradament, els recursos computacionals augmenten considerablement quan s'incrementa la resolució. En aquesta línia, gràcies als avenços informàtics dels darrers anys, els serveis meteorològics d'arreu del món han pogut incorporar en la seva estructura operacional l'ús de models no hidrostàtics

d'una bona predicció meteorològica en països de muntanya com Andorra.

La complexitat dels fenòmens meteorològics que tenen lloc en zones de muntanya, a diferència d'altres regions amb menys relleu, és considerable. Primer de tot hem de destacar la complexitat de la interacció dels fluxos d'aire amb l'orografia, com per exemple els vents de component nord amb els Pirineus. Sovint aquests episodis a l'hivern s'associen a vents forts i nevades només al vessant nord. Però els fenòmens que pot generar un flux d'aquest tipus depenen de la combinació de múltiples factors i poden ser de

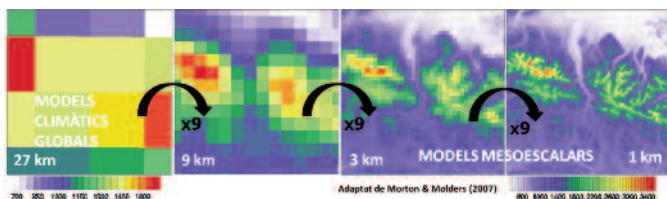


Figura 2. Topografia representada pel model amb diferents resolucions horitzontals (27,9,3 i 1 km). Adaptat de Morton i Molders (2007)

de predicció del temps a alta resolució amb passos de malla de pocs quilòmetres (3-1 km). Aquests models, tot i que han demostrat l'habilitat de simular processos atmosfèrics i sistemes de precipitació realistes, encara mostren diferents limitacions i aspectes en què cal aprofundir i millorar.

El primer fa referència als aspectes computacionals, tant a l'alta demanda de recursos i memòria durant la fase de processament de la modelització com a l'hora de fer el tractament de la informació obtinguda. Les simulacions d'alta resolució generen centenars de gigabytes de dades que han de ser generades i analitzades en temps limitats per poder donar resposta a les prediccions meteorològiques diàries.

El fonament dels models meteorològics es basa en la consideració de l'atmosfera com un fluid i en la descripció del seu estat i evolució a partir de les equacions de Navier-Stokes, en què s'apliquen els principis de conservació de la mecànica i la termodinàmica. Per tant, a l'hora d'obtenir les solucions numèriques del model, quan es treballa a alta resolució i en zones de muntanya, hi intervien diferents aspectes numèrics que s'han de tenir en compte i les seves problemàtiques. Aquests elements són: la precisió obtinguda de la resolució de les equacions diferencials, els criteris d'estabilitat numèrica, com per exemple els aplicats a les equacions que governen l'advecció, la difusió tant implícita com explícita, i, finalment, el sistema de coordenades escollit per tal de tenir en compte la topografia (Arnold et al., 2012).

Un tercer aspecte fa referència a la descripció física dels processos que tenen lloc a l'atmosfera. Depenent de la resolució del model, aquests processos poden ser resolts explícitament o bé de manera parametritzada en el cas que es tracti de processos que tenen lloc en una escala inferior al pas de malla. Tot i que els esquemes que representen alguns d'aquests processos són cada vegada més sofisticats, també presenten limitacions importants. Per a la predicció de la

precipitació ens trobem amb una doble casuística: per una banda, els moviments convectius per passos de malla 3-1 km poden ser resolts explícitament pel model, però, en canvi, la microfísica de núvols i la predicció dels diferents tipus d'hidrometeors és descrita per esquemes nuvolosos molt complexos i amb un alt cost computacional. A més, aquest esquema és molt sensible a les observacions i les condicions inicials, de manera que petits errors poden generar la formació d'estructures atmosfèriques poc exactes. Uns altres processos físics que veuen compromesa la seva representativitat, a mesura que s'augmenta la resolució i el pas de malla del model, són els processos turbulents i radiatius, com també la parametrització de la capa límit planetària.

Tots els models d'alta resolució necessiten dades atmosfèriques i superficials com a condicions inicials i de contorn, com també informació estàtica/estructural de la zona de treball. Les condicions inicials (CI) i de contorn (CC) són proporcionades per models globals (o d'àrea limitada) mitjançant l'acoblament als dominis niats. La informació estàtica defineix l'estat i les característiques de la superfície, com la topografia, la textura del sòl, l'albedo, la fracció de vegetació o el tipus de cobertura. Aquestes dades sovint tenen una resolució de com a màxim 1 km, i les CI/CC fins i tot una resolució inferior (9-3 km). Per tant, la inicialització del model habitualment es fa amb dades amb una resolució horitzontal molt inferior a la pròpia de la simulació, com també amb una variació temporal gairebé inexistent. Per exemple, l'albedo és un paràmetre que pateix variacions temporals molt marcades (i.e. presència o no de neu al sòl), i en canvi això no es veu representat en els models, ja que utilitzen valors climatològics mensuals. Per resoldre algun d'aquests aspectes, els darrers anys s'està abordant d'una manera intensa l'assimilació de dades d'observacions, ja sigui informació de satèl·lit de radars meteorològics, com també informació derivada de GPS.

Tots aquests aspectes descrits són motiu de recerca, i nombroses campanyes experimentals es duen a terme per tal d'obtenir dades observacionals i així poder avaluar, comparar i validar tant els models existents com els nous. D'aquesta manera, podrem conèixer la seva capacitat per capturar i representar adequadament les propietats bàsiques dels fluxos en zones de muntanya, i els processos meteorològics induïts pel mateix relleu.

## Referències

- ARNOLD, D., D. MORTON, I. SCHICKER, P. SEIBERT, M. ROTACH, K. HORVATH, J. DUDHIA, T. SATOMURA, M. MÜLLER, G. ZANGL, et al., 2012: High resolution modelling in complex terrain: report on the HiRCoT 2012 Workshop, Vienna, 21-23 February 2012. Institut für Meteorologie, Univ. f. Bodenkultur.
- GALLEGO, N., 2003: Cadastre de riscs naturals a Andorra. *Horitzó*, 5, 16-27.
- GALLEGO, N., R. MAS, P. ESTEBAN I A. MARGALEF, 2011: Les allaus a Andorra (1975-2010): anàlisi estadístic. 4es Jornades tècniques de neu i allaus, maig 25-27, 2011, Vielha e Mijaran, Vielha, Spain.