



Més càlid, més sec i més humit. Els llindars d'alerta meteorològica

Guillem MARTÍN i BELLIDO



Agraïxo als organitzadors d'aquesta 29a Diada que m'hagin convidat a parlar sobre el Servei Meteorològic i el canvi climàtic. Primer analitzarem les causes de l'efecte hivernacle, parlant de l'espectroscòpia, la branca de la física que estudia l'absorció de freqüències de l'espectre electromagnètic per part de l'atmosfera, i més concretament de l'absorció de la calor. Posteriorment explicarem com treballem al Servei Meteorològic per fer front a fenòmens meteorològics més extrems.

Més càlid, més sec i més humit

Cada any, l'Organització Mundial de la Meteorologia (OMM) escull una temàtica per debatre al voltant del Dia mundial de la meteorologia, el 23 de març. Aquest any el tema escollit és *Més càlid, més sec i més humit. Afronem el futur*. Durant la presentació del tema d'aquest 2016, el president de l'OMM, Petteri Taalas, va declarar, però, que "el futur ja és aquí". I és que els efectes del canvi climàtic ja s'han començat a notar, com ho demostren, entre altres efectes tant o més greus, els gràfics evolutius de la temperatura mundial. Com hem vist al llarg d'aquesta jornada, el canvi climàtic amenaça d'alterar la biodiversitat, la cobertura boscosa, els recursos i les necessitats energètiques i les zones habitables del nostre planeta. Centrats en els efectes del canvi climàtic a l'atmosfera ens fixem en l'augment de temperatures. Un augment de la temperatura atmosfèrica provoca que la temperatura del mar també augmenti i que hi hagi més energia a l'atmosfera per generar tot tipus de fenòmens meteorològics, amb més rapidesa i violència. Per posar un exemple, la formació d'huracans requereix una temperatura de l'aigua del mar de, com a mínim, 27 °C. Com més temperatura, més fàcil serà que es formin aquests fenòmens. En definitiva, el títol del tema escollit enguany reflecteix que l'augment de la temperatura planetària comportarà fenòmens meteorològics més extrems, ja siguin els que tenen a veure amb precipitacions fortes, com amb severes períodes de sequera.

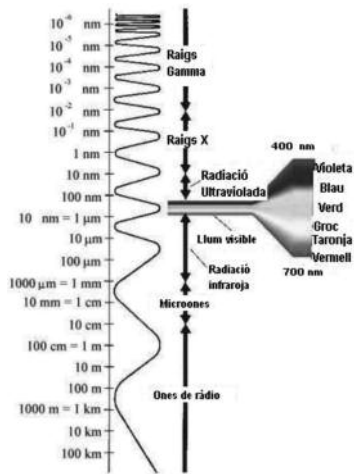
Les causes de l'efecte hivernacle

Com tots sabem, l'augment de la temperatura atmosfèrica és degut a l'efecte hivernacle. L'efecte hivernacle és un fenomen natural que garanteix que la temperatura no baixi excessivament durant les nits i d'aquesta manera garanteix la vida a la Terra. El motiu pel qual la temperatura baixa moderadament durant la nit és que alguns gasos que formen l'atmosfera s'encarreguen de retenir l'escalfor dins de la troposfera, que és la capa més baixa de l'atmosfera i on tenen lloc els fenòmens meteorològics. L'energia del Sol arriba a la Terra en forma d'ones de tot l'espectre electromagnètic, des dels rajos gamma fins a les ones ràdio, passant pels rajos X, ones ultraviolades, ones visibles, ones infraroges i microones, de menor a major longitud d'ona respectivament. Les diferents capes que protegeixen la Terra (l'atmosfera, la capa d'ozó, la ionosfera i la magnetosfera) no deixen passar, és a dir absorbeixen, algunes freqüències d'aquests espectre electromagnètic i això fa possible la vida a la Terra. Per exemple, les ones ultraviolades queden absorbides per la capa d'ozó; si no fos així aquestes ones cremarien les plantes i la pell dels éssers vius, com si d'un làser es tractés. Per entendre l'efecte hivernacle hem de saber que part de la radiació que rep la Terra també la torna a emetre en algunes de les freqüències de l'espectre electromagnètic. Per exemple, emet ones ràdio que poden ser detectades i descifrades per les naus espacials. També emet ones visibles, ja que la Terra es pot veure des de l'espai. Per tant no hi ha cap capa a l'atmosfera que filtri aquestes freqüències de l'espectre electromagnètic que emet la Terra. La Terra també emet ones infraroges, que es desprenen dels cossos calents de la mateixa superfície. Ara bé, aquestes ones infraroges emeses per la Terra són diferents de les que ens arriben del Sol. Les úniques ones infraroges que retornen a l'espai amb la mateixa longitud d'ona que han arribat del Sol són les que ha reflectit la Terra per l'efecte albedo.¹ Les ones infraroges emeses per la Terra tenen una longitud d'ona més llarga que les que ens arriben del Sol i la mateixa troposfera les reté sense que puguin retornar a l'espai. L'any 1861, el científic irlandès John Tyndall corroborava les prediccions de Fourier a través d'estudis espectroscòpics² i va arribar a la conclusió que els gasos formats per tres àtoms o més eren els encarregats de retenir l'escalfor dins de la troposfera. Aquests gasos tenen la característica de ser ressonants³ a les ones infraroges emeses per la Terra. El fet de ser ressonants fa que l'ona infraroja amb la longitud que l'emet la Terra reboti en topar amb aquests gasos; per tant part d'aquestes ones s'escaparan de l'atmosfera, però una altra part serà retornada cap a la superfície de la Terra. El retorn de part de les ones infraroges provoca que el balanç energètic de la Terra estigui desequilibrat i que l'atmosfera guanyi calor. Els gasos d'efecte hivernacle, per tant, són, entre altres, el diòxid de carboni (CO₂), l'ozó troposfèric (O₃),⁴ el metà (CH₄), el diòxid i el triòxid de nitrogen (NO₂), el vapor d'aigua (H₂O) i els clorofluorocarburs. D'entre aquests gasos, el vapor d'aigua es mereix una explicació més detallada perquè és el gas que permet el desenvolupament de fenòmens meteorològics i perquè és un gas que autoregula la seva concentració a l'atmosfera; si n'hi ha en excés es converteix en líquid i precipita en forma de pluja.

Per tant, per lluitar contra l'escalfament de la capa més baixa de l'atmosfera, la troposfera, no només n'hi ha prou de reduir les emissions dels gasos d'efecte hivernacle, sinó que també s'han de reduir les fonts de calor generades des de la Terra i evitar així l'emissió d'ones

infraroges d'ona llarga que ressonin amb els gasos de tres àtoms o més. En aquest sentit, cal evitar i limitar al màxim la captació de la calor provinent del Sol per part de superfícies encimentades, asfaltades i construïdes. De res no serviria reduir els gasos d'efecte hivernacle i augmentar l'emissió d'ones infraroges d'ona llarga, ja que aquestes no poden escapar de l'atmosfera.

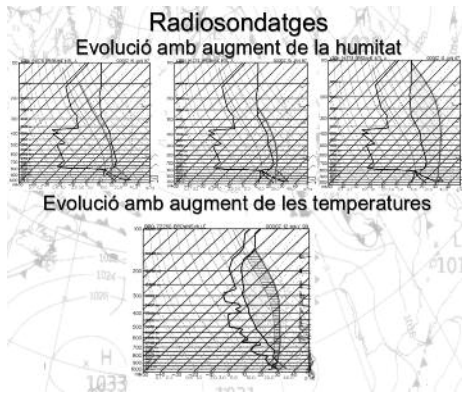
Sobre aquests últims espais, anomenats *illes de calor urbanes*, cal remarcar el doble rol a favor de l'escalfament global. El primer és el de crear superfícies que no es refriegeren naturalment ni absorbeixen CO₂, com sí que ho fan les zones naturals per la pròpia vegetació. El segon, i potser el més oblidat, és l'aportació calòrica no només a les illes de calor i al seu entorn, sinó també a l'atmosfera en forma d'ones infraroges d'ona llarga que ressonen amb els gasos d'efecte hivernacle. El primer rol fa pujar de manera local les temperatures i el segon les fa pujar a escala planetària. Tot plegat, sense parlar del deteriorament de la qualitat de l'aire a causa de les partícules emeses per la combustió, que a part d'emetre CO₂ fan disminuir l'albedo terrestre. En aquest sentit, els fons de vall d'Andorra emeten cada vegada més ones infraroges d'ona llarga, fet que es deixa notar la majoria de mesos amb l'anomalia de temperatures mitjanes⁵ de l'estació del Roc de Sant Pere. També s'ha de destacar el paper que juguen aquestes emissions amb l'alentiment del refredament nocturn als fons de vall, i plantejar els seus efectes amb la cobertura del mantell nival a les parts baixes de les estacions que arriben a zones urbanitzades (Soldeu, el Tarter, Pas de la Casa i Arinsal).



Imatge 1: Longituds d'ona de l'espectre electromagnètic

El vapor d'aigua

L'aire té la característica que, com més temperatura, més quantitat de vapor d'aigua pot contenir. Quan la temperatura de l'aire augmenta, té més capacitat d'absorbir el vapor d'aigua; per contra, si la temperatura de l'aire és baixa, l'aire podrà allotjar menys humitat i serà més fàcil que el vapor es converteixi en líquid. Per això, quan tenim aire fred en alçada augmenta la inestabilitat, perquè decreix la capacitat de l'aire per allotjar vapor d'aigua i l'única manera de desprendre's d'aquest vapor és precipitant. En aquest sentit, amb l'augment de la temperatura atmosfèrica hauria de ser més difícil que es formessin precipitacions ja que el vapor d'aigua es queda a l'aire i no es tradueix en líquid. Per contra, com que l'aire allotja més humitat, quan hi ha una aportació d'aire fred genera precipitacions més intenses i abundants perquè la quantitat de matèria primera per generar precipitacions (vapor d'aigua) és més elevada. En aquest punt ja podem comprendre la primera part del títol de la conferència; més càlid per l'augment de temperatures, més sec com a causa del mateix



Imatge 2: Amb els tres primers radiosondatges veiem com augmenta l'àrea que simbolitza el CAPE si augmenta la humitat atmosfèrica. Amb el quart veiem com encara augmenta més si la temperatura és més alta (línia de la dreta). A més, amb l'augment de la humitat, es veu clarament com el límit de la convecció se situa a més alçada, per tant els cumulonimbus podran ser més alts i produir amb més facilitat fenòmens més violents com la pedra i la calamarsa

augment de temperatures (a més d'augmentar l'evapotranspiració costa més que es produeixin precipitacions) i, per últim, més humit perquè quan precipita ho fa amb més intensitat i abundància.

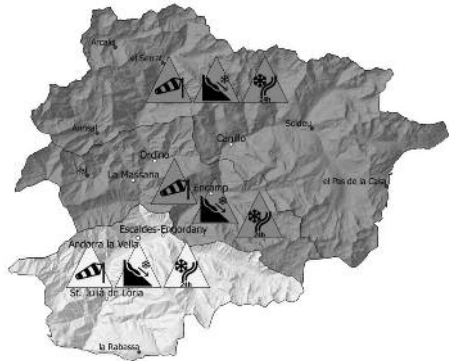
A l'atmosfera, el vapor d'aigua acaba formant núvols quan la pressió atmosfèrica permet la convecció de l'aire. Això significa que amb un augment de les temperatures (recordem que comporta un augment de la capacitat de l'aire per allotjar vapor d'aigua) el CAPE (*convective available potential energy*)⁶ augmenta. Si el CAPE augmenta significa que la convecció de l'aire serà més efectiva a l'hora de formar cúmuls de tempesta i altres fenòmens meteorològics com tornados o huracans, fet que es traduirà en un augment de la intensitat i de la violència d'aquests fenòmens. Els fenòmens convectius que ens afecten a Andorra són les tempestes, que tenen una afectació espaciotemporal

molt petita, ja que es formen amb poc temps (6 hores) i afecten una àrea de pocs quilòmetres quan parlem d'una escala planetària. Per tant, els models climàtics a gran escala no poden representar aquests fenòmens. Per representar la possible evolució d'aquests fenòmens amb el canvi climàtic són necessaris models climàtics d'alta resolució, com l'Arome Climat,⁷ de Météo France. A través d'aquest model ja s'ha arribat a la conclusió que els fenòmens convectius, entre els quals les tempestes, seran més severes en qualsevol dels escenaris possibles d'evolució de l'escalfament global.

El CAPE i l'alçada, la particularitat del país dels Pirineus

El valor de l'energia potencial disponible per a la convecció (CAPE) s'extreu a partir dels radiosondatges.⁸ Els radiosondatges expressen l'evolució de la temperatura de l'aire, la temperatura del punt de rosada i la pressió atmosfèrica, entre altres paràmetres, a la vertical d'un punt de la superfície de la Terra. Són gràfics que serveixen per analitzar les propietats de la columna d'aire que tenim a sobre nostre. En aquests gràfics, una vegada traçades les línies, bàsicament queden dos espais entre les línies que expressen l'evolució d'aquests paràmetres amb l'alçada i la corba d'estat resultant de la combinació entre l'evolució de la temperatura del punt de rosada i la temperatura de l'aire. L'àrea que queda a la part superior d'aquests gràfics expressa l'energia disponible a l'atmosfera perquè es produeixi la convecció. D'altra banda, l'àrea que queda a sota expressa la possibilitat que aquesta energia quedi inhibida. A més, l'extensió d'aquestes àrees també ens indica fins a quina alçada es pot produir la convecció i,

per tant, l'alçada que poden arribar a tenir els núvols de tempesta. Les columnes d'aire que analitzem en terrenys situats a una certa alçada sobre el nivell del mar, com és el cas d'Andorra, tindran uns gràfics més curts, és a dir que les línies de temperatura de l'aire i del punt de rosada començaran més amunt. Aquest fet afecta directament la facilitat de desenvolupament de fenòmens convectius. Això és degut al fet que la zona d'inhibició, que queda per sota de la zona de convecció, desapareix en bona part en augmentar l'alçada. En altres paraules, a Andorra i en general als terrenys elevats estem més a prop de la zona de convecció. A més, les tempestes generen corrents d'aire ascendents que no només afecten l'interior del núvol, sinó també el seu entorn. El flux d'aire convectiu crea grans diferències de pressió atmosfèrica a pocs quilòmetres de distància i genera unes turbulències que són més o menys fortes en funció de la magnitud de la tempesta.



Imatge 3: Mapa d'avisos meteorològics. Veiem que el nord i el centre estan en avis taronja per neu, vent i allaus, mentre que el sud està en nivell d'avis groc pels mateixos fenòmens

l'augment dels fenòmens convectius, però, no assegura la pluviometria necessària per als recursos hídrics existents per dos motius. El primer és que el mateix model també ha determinat que la precipitació anual, tal com ja estem experimentant les darreres dècades, serà inferior. Per tant, la pluviometria anual estarà cada vegada més influenciada pel comportament de les tempestes. El segon és que l'aprofitament dels recursos hídrics durant les tempestes és molt inferior a causa de les sobtades i efímeres avingudes d'aigua. Amb tots aquests canvis és clar que els registres meteorològics variaran durant les properes dècades, fet que marcarà la tendència climàtica de l'avenir. Si baixem l'escala temporal de la climatologia, que estudia el comportament de temps al llarg dels anys, ens trobem amb la meteorologia, que tracta els fenòmens individualment i tracta de preveure'ls amb la major precisió possible. Per això, sense ser una excepció, el Servei Meteorològic d'Andorra haurà d'estar preparat per anunciar amb l'antelació necessària possibles fenòmens extrems, ja siguin en forma líquida o sòlida: aigua o neu.

El flux d'aire convectiu crea grans diferències de pressió atmosfèrica a pocs quilòmetres de distància i genera unes turbulències que són més o menys fortes en funció de la magnitud de la tempesta. El flux d'aire convectiu crea grans diferències de pressió atmosfèrica a pocs quilòmetres de distància i genera unes turbulències que són més o menys fortes en funció de la magnitud de la tempesta.

El Servei Meteorològic i el canvi climàtic

Una vegada coneixem les projeccions climàtiques, arriba l'hora de preveure com es pronosticaran meteorològicament aquests nous fenòmens, alguns dels quals tot indica que seran més severs. Per això, des del Servei Meteorològic d'Andorra, amb l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic, s'està estudiant com es podrà informar d'aquests fenòmens. Es tracta d'informar amb més precisió tant meteorològicament com territorialment de fenòmens que sempre hem tingut però que poden ser més severs i més freqüents.

El Servei Meteorològic té tres eines principals per comunicar a la població els fenòmens

meteorològics que es poden produir i els perills que se'n poden derivar: el *Mapa d'avisos meteorològics*, el *Butlletí meteorològic* i el *Butlletí d'allaus*. Actualment el Servei Meteorològic està treballant amb Météo France, amb qui sempre ha treballat el Govern en matèria de meteorologia, per elaborar conjuntament aquests mapes d'avisos i butlletins amb la precisió que requereix el Principat d'Andorra (468 km²). Fins fa poc, la majoria de vegades els fenòmens meteorològics dels quals rebíem avis estaven estudiats des d'una òptica de probabilitat d'ocurrència en una superfície, com a mínim, de 1.000 km². En canvi, des de fa poc més d'un any s'emeten avisos meteorològics amb una probabilitat d'ocurrència de 500 km² i s'està treballant per reflectir-los diferenciadament en diferents zones meteorològiques del país. El canvi és substancial, i s'espera que es deixi d'avisar de fenòmens que no es preveu que afectin el nostre país, però en canvi s'avisí o es canví el nivell d'avis quan la previsió ho requereixi. És per aquest motiu que des del Servei Meteorològic s'està estudiant la manera més idònia per continuar servint-se de les eines, informacions i experiència d'un servei meteorològic de referència mundial com ho és Météo France alhora que puguem augmentar la precisió de la interpretació.

Un dels primers passos que s'està fent és elaborar un mapa d'avisos meteorològics amb tres zones meteorològiques (nord, centre i sud). La zona nord i la zona sud poden ser fàcilment diferenciables, mentre que la zona centre servirà per estendre l'afectació de l'avis més al nord o més al sud. El *Mapa d'avisos meteorològics* serveix per avisar la població de la intensitat de fenòmens meteorològics com la temperatura, el vent, la precipitació i la seva intensitat, l'activitat elèctrica i el risc d'allaus. S'expressa amb una escala de colors que van del verd al vermell passant pel groc i el taronja. Cada fenomen meteorològic té uns llistats específics per a cada zona meteorològica per indicar-ne la intensitat. Des del Servei Meteorològic fa dos anys que s'està treballant per definir els llistats meteorològics per a cada zona meteorològica

i des de fa pocs mesos ja s'estan beneficiant d'aquests nous avisos els serveis de Protecció Civil de Govern i dels diferents comuns.

Per posar un exemple, els llistats de temperatura càlida per diferents zones els podem diferenciar a la imatge 4.

	Tx nord	Tx sud	Tn nord	Tn sud	Dies rep.
Verd	<29°C	<32°C	<11°C	<15°C	1 dia
Groc	>26°C	>29°C	>10°C	>14°C	3 dies consecutius
Taronja	>29°C	>32°C	>11°C	>15°C	3 dies consecutius
Vermell	>29°C	>32°C	>11°C	>15°C	6 dies consecutius

Imatge 4: Diferents llistats meteorològics de temperatura segons la zona meteorològica

$$\text{Escalfament global} = (\text{gasos d'efecte hivernacle}) \times (\text{radiació infraroja ona llarga})$$

Imatge 5: Escalfament global = (gasos d'efecte hivernacle) X (radiació infraroja ona llarga)

La metodologia per estudiar els llandars meteorològics és la següent:

- 1er pas: fer un estudi estadístic de les sèries climàtiques més antigues per classificar diferents episodis meteorològics en funció de la intensitat.

- 2on pas: estudiar les conseqüències que han tingut les intensitats dels episodis a diferents zones del país.

- 3er pas: agrupar les conseqüències per zones i definir les zones meteorològiques, alhora que es defineixen els llandars meteorològics per a cada zona i fenomen.

- 4rt pas: estudiar permanentment l'evolució d'aquests llandars i determinar si s'han d'anar adaptant a les necessitats del país i a les possibles adaptacions que s'hagin fet per fer front al canvi climàtic. Per altra part, a mesura que van passant els anys les sèries climàtiques van guanyant antiguitat i poden entrar a formar part de l'estudi dels llandars meteorològics.

Amb la divisió del país per zones meteorològiques, els fenòmens convectius (activitat elèctrica i intensitat de precipitació) queden exclosos de diferenciar els nivells d'avis a diferents zones del país, a causa de la petita dimensió de les mateixes zones i al desenvolupament sobtat d'aquests tipus de fenòmens, que impedeix l'exactitud en aquesta escala de predicció quant a la formació de les tempestes i la seva afectació espacial. Per als altres fenòmens (temperatura, vent, acumulació de precipitació i allaus) sí que és possible determinar, bàsicament, dos nivells d'avisos diferents entre el nord i el sud, fet que no significa que no es pugui establir el mateix nivell d'avis meteorològic a tot el país per a aquests fenòmens si la previsió ho requereix. El *Mapa d'avisos meteorològics* de l'SMA permet establir la frontera del canvi de l'avis meteorològic més al nord o més al sud, en funció de les situacions, ja que hi ha una zona nord, una zona centre i una zona sud.

Ara bé, igual que per a les projeccions climàtiques s'ha hagut d'utilitzar models climàtics d'alta resolució, per analitzar amb tanta precisió els fenòmens meteorològics per determinar els nivells d'alerta diferenciats dins del país també s'han d'utilitzar models meteorològics d'alta resolució. Els models meteorològics d'alta resolució són aquells que estudien l'atmosfera per columnes d'aire al més primes possibles, parlem d'un pas de malla curt. És a dir la longitud del costat de la columna ha de ser al més curta possible per augmentar la precisió del model. D'aquesta manera augmentem el nombre de columnes sobre un mateix territori, i com que cada columna representa un valor diferent, tenim més valors i més precisió.

En realitzar el *Mapa d'avisos meteorològics* amb aquesta nova metodologia, automàticament el *Butlletí meteorològic* guanya precisió i també es podrà diferenciar, de manera escrita, l'evolució meteorològica diària per a les diferents parts del país.

Conclusions

Per acabar, m'agradaria parlar de les conclusions que he extret a l'hora de preparar aquesta ponència. Com que és àmpliament conegut que reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle és primordial per lluitar contra l'escalfament global, parlaré de la reducció, control o limitació d'un altre tipus d'emissions: les emissions d'ones infraroges d'ona llarga. Amb llenguatge matemàtic, podem dir que l'escalfament global és un producte dels gasos d'efecte hivernacle i les radiacions infraroges d'ona llarga. Si reduïm els dos factors, la lluita contra el canvi climàtic serà molt més eficaç. Per reduir l'emissió d'ones infraroges d'ona llarga cal

augmentar l'albedo de la Terra, deixant de crear zones d'absorció de calor amb zones edificades, asfaltades i encimentades.

D'altra banda, per a l'estudi del fenomen del canvi climàtic, la seva evolució i preveure els efectes per protegir la població, és imprescindible tenir eines de gestió i estudi de les dades climàtiques. Alhora cal preservar les dades climàtiques històriques, com les de FEDA, i mantenir en la mesura del possible els entorns de presa de dades per garantir la qualitat i l'homogeneïtat de les dades.

Per últim, Andorra és un país petit i ha de promoure l'ús de l'alta resolució als models climàtics i meteorològics per així ser visibles dins dels models i tenir el màxim nombre de columnes d'aire representades dins del país.

Guillem Martín i Bellido,
físic i tècnic al Servei Meteorològic d'Andorra

Notes

- 1- Albedo: reflexió terrestre de les ones infraroges que arriben procedents del Sol.
- 2- Estudis espectroscòpics: anàlisi de les propietats físiques i químiques de la matèria mitjançant l'espectre de les radiacions que emet. A través d'aquests estudis es pot determinar quina longitud d'ona reflecteixen els gasos d'efecte hivernacle.
- 3- Ressonant: en termes físics, ressonància vol dir que les molècules vibren en ser travessades per una certa longitud d'ona, per tant, reemetem l'energia en totes direccions, per tant, també cap a la Terra.
- 4- Ozó troposfèric: la fórmula química de l'ozó troposfèric és la mateixa que la de l'ozó que es troba a la capa d'ozó, però té un altre origen. L'ozó troposfèric és d'origen antròpic i en trobar-se a la superfície de la Terra ressona quan és travessat per ones infraroges de longitud d'ona llarga.
- 5- CAPE: sigles en anglès de l'energia potencial disponible a l'atmosfera per a la convecció. Visualment, el CAPE es pot visualitzar a través dels radiosondatges (gràfics representatius de la temperatura, humitat, pressió i vent) a diferents alçades de l'atmosfera, com es veu a la imatge 2.
- 6- Anomalia de temperatures mitjanes: diferència entre la temperatura mitjana d'un mes en concret respecte a la normal climàtica. Vegeu butlletins climàtics publicats al web meteo.ad i elaborats conjuntament entre el Servei Meteorològic del Govern d'Andorra i el Cenma, de l'IEA.
- 7- Arome Climat: els models climàtics simulen les condicions climàtiques (temperatures mitjanes, precipitacions totals anuals o períodes de retorn d'esdeveniments meteorològics extrems, entre altres) durant un període de temps futur. A diferència dels models meteorològics, no estudien fenòmens concrets, sinó el comportament climàtic d'una àrea geogràfica.
- 8- Radiosondatges: gràfics termodinàmics representatius de la temperatura, humitat, pressió atmosfèrica i vent a diferents alçades de l'atmosfera.