

Estudi d'elements neotectònics i glacials a la cubeta d'Andorra

Autor: Eric Crespo Salas

Tutora: Maria Ortuño Candela (Universitat de Barcelona)

Cotutor: Ramon Copons Llorens (IEA – CENMA)

Master de Recursos Minerales y Riesgos Geológicos

Especialidad: Riesgos Geológicos

27 de Julio 2016



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

UAB

Universitat Autònoma
de Barcelona



Índex:

0. Abstract	Pàg. 1
1. Introducció	Pàg. 1
1.1. Interès del treball	Pàg. 1
1.2. Objectius	Pàg. 2
1.3. Antecedents	Pàg. 2
1.3.1. Estudis de glacialisme a la cubeta d'Andorra	Pàg. 2
1.3.2. Estudis de neotectònica, sismologia i risc sísmic a la cubeta d'Andorra	Pàg. 3
1.4. Estudis de neotectònica en alta muntanya	Pàg. 5
1.4.1. Reptes de l'estudi	Pàg. 5
2. Context geològic i geomorfològic	Pàg. 5
3. Context neotectònic: Pirineus zona de deformació lenta	Pàg. 7
4. Metodologia	Pàg. 8
4.1 Anàlisi bibliogràfic	Pàg. 8
4.2 Fotointerpretació i model digital del terreny	Pàg. 9
4.3. Treball de camp	Pàg. 10
5. Resultats	Pàg. 11
5.1. Cartografia geològica i geomorfològica	Pàg. 11
5.2. Anàlisi geomorfològic	Pàg. 13
5.2.1. Elements no tectònics	Pàg. 13
5.2.2. Elements de possible origen neotectònic	Pàg. 18
6. Discussió	Pàg. 21
6.1. Possibles falles neotectòniques	Pàg. 21
6.2. Evolució de la cubeta d'Andorra: glacialisme i tectònica	Pàg. 22
6.3. Recomanacions posteriors	Pàg. 23
7. Conclusions	Pàg. 23
8. Agraïments	Pàg. 24
9. Bibliografia	Pàg. 24
10. Annex	Pàg. 26

Abstract

This study is located in Principat d'Andorra, between the countries of Spain and France, situated within the axial zone in the Pyrenees. It has been chosen the zone of Andorra basin to make it a geomorphological, geological study. Mainly, the study zone has focused on the northern part of the basin, which shows a passible morphologies to neotectonic origin. The main objective is to give an interpretation of the faults origin to the north of Andorra basin (neotectonic or glacial) and give an interpretation about the formation of Andorra basin. These has been realized using different methodologies: photointerpretation, digital model, topographic analysis and fieldwork. With the digital model has realized different illuminations to highlight each of geomorphological elements. Once mapped, these have classified as non-tectonic elements (glacial or gravitational) or elements of possible neotectonic origin. It has analyzed the elements with signs of having been affected by the activity of the faults (fluvial channels, triangular facets, moraines, fault escarpments and fault planes and grooves), detecting a number of anomalies, that show a different slope changes, displacements and different forms as a result of the activity of a possible neotectonic faults. From these results it has decided, which is the most probably origin of the triangular facets and once decided, mapping the possible neotectonic faults. Finally has detailed what would be the evolution of the Andorra basin through glacial and tectonic processes.

1. Introducció

1.1. Interès del treball

Els Pirineus, en un principi poden semblar una regió amb una activitat sísmica quasi inactiva tectònicament, però no és així. Aquests pateixen una deformació molt lenta que a través dels registres històrics de sismicitat és molt difícil d'observar. Els últims grans - moderats terratrèmols històrics al Pirineu (on es troba la zona d'estudi) són: el de la Ribagorça 1373 ($M=6.2$) i el de Vielha 1923 ($M=5.2$) localitzats prop de la falla del nord de La Maladeta, una falla considerada activa actualment (Ortuño, 2008). Tanmateix, la cubeta d'Andorra (zona d'estudi), presenta uns elements geomorfològics similars a d'altres com: la fossa de la Cerdanya o el graben de l'Urgellet, que són zones actives sísmicament, també situades als Pirineus i molt properes entre elles. Aquests elements serien: facetes triangulars, elements lineals d'origen neotectònic, canals fluvials afectats per l'activitat de la falla, etc.

Per tant, existeix la necessitat d'avaluar el potencial sismogenètic d'aquesta zona d'estudi que pot contenir falles neotectòniques. Aquest fet és important degut a que la major part de la població del Principat d'Andorra es troba situada a la cubeta i per tant el risc sísmic seria molt important.

Fins al moment, no s'ha realitzat cap tipus d'estudi específic dedicat a aquesta tasca. No obstant, s'han realitzat diversos treballs de microsismicitat i de risc sísmic a tot el Principat d'Andorra González, (2010) i Macau, (2008), mostrant que la zona on aquest està situat és una zona dels Pirineus que encara conté una certa activitat sísmica.

Aquest treball es basa en la hipòtesis que la zona del nord de la cubeta d'Andorra que presenta uns elements geomorfològics amb expressió a la superfície, podrien ser indicis d'una zona de tectònica activa, en particular la presència de falles actives reportades per Turu, *et al* (2005). Amb això, es vol contribuir al coneixement de la perillositat sísmica en una zona on no s'han realitzat quasi estudis en la matèria.

1.2. Objectius

El treball té com a finalitat la identificació i la caracterització de falles actives a les poblacions d'Andorra la Vella i Escaldes, mitjançant un estudi geològic i la proposta d'un model d'evolució de la cubeta. Per arribar a obtenir aquest objectiu, s'han realitzat una sèrie de diferents subobjectius:

1. Anàlisi bibliogràfic de diferents treballs realitzats a la cubeta d'Escaldes - Andorra la Vella.
2. Cartografia i identificació tant geològica com geomorfològica dels elements del paisatge afectats (formes i dipòsits):
 - a. Generats per l'activitat de les falles postorogèniques
 - b. Generats a causa de l'activitat glacial durant últim màxim glacial
3. Anàlisi dels elements de paisatge afectats per la deformació activa de la zona mitjançant l'aplicació de criteris per determina quins són d'origen neotectònics i glacial.
4. Discussió de l'afectació dels processos glacials envers els processos neotectònics en la cubeta d'Andorra, tenint en compte l'evolució geodinàmica de la zona.

1.3. Antecedents

En aquest apartat s'han recollit tots els estudis referits al glacialisme de la cubeta d'Andorra, ja que aquesta té un origen glacial. Per altra part també s'han recollit tot d'estudis sobre neotectònica, sismologia i risc sísmic, pel fet de la zona que s'estudia presenta unes falles que podrien ser neotectòniques, a més Andorra està situada als Pirineus que es una zona amb una activitat sísmica dèbil, però activa.

1.3.1. Estudis de glacialisme a la cubeta d'Andorra

La cubeta d'Andorra s'ha caracteritzat per la gran quantitat d'estudis de glacialisme. Els primers estudis realitzats per Bladé, J.F., (1875) descriuen vestigis del període glacial a Andorra, citant roques estriades i grans morrenes laterals. Aquest mateix autor cita un dels principals moviments en massa que va afectar una d'aquestes morrenes situades prop d'Andorra la Vella que va destruir tot el poble del Fener. Diferents autors han situat l'extensió màxima del glaciari del Valira sobre els 1080 metres d'alçada Durrocher (1843). El moviment de massa anomenat anteriorment li va servir per donar una extensió màxima del glaciari d'uns 28 km. Però, no és fins que Nussbaum (1934) que aquest situa la morrena terminal a uns 950 metres prop de la població de La Margineda.

Vilaplana, (1984) realitza un estudi de tota la conca glacial del Valira del Nord que arriba fins a la Vall principal del Valira, on dona una màxima extensió de les glaceres en alçada d'uns 1700 metres. Aquest resultat l'obté a través de les morrenes presents a Engolasters que estan dipositades a uns 1650 – 1700 metres d'alçada. Per altra banda Turu, *et al* (2016), marca una alçada màxima de la glacera a uns 2000 metres, aquesta màxima altura està referida al Würmià i no l'últim màxim glacial (LGM). Turu, *et al* (2016), també realitza un mapa de l'extensió màxima dels glaciers durant LGM al Principat d'Andorra (figura 1).

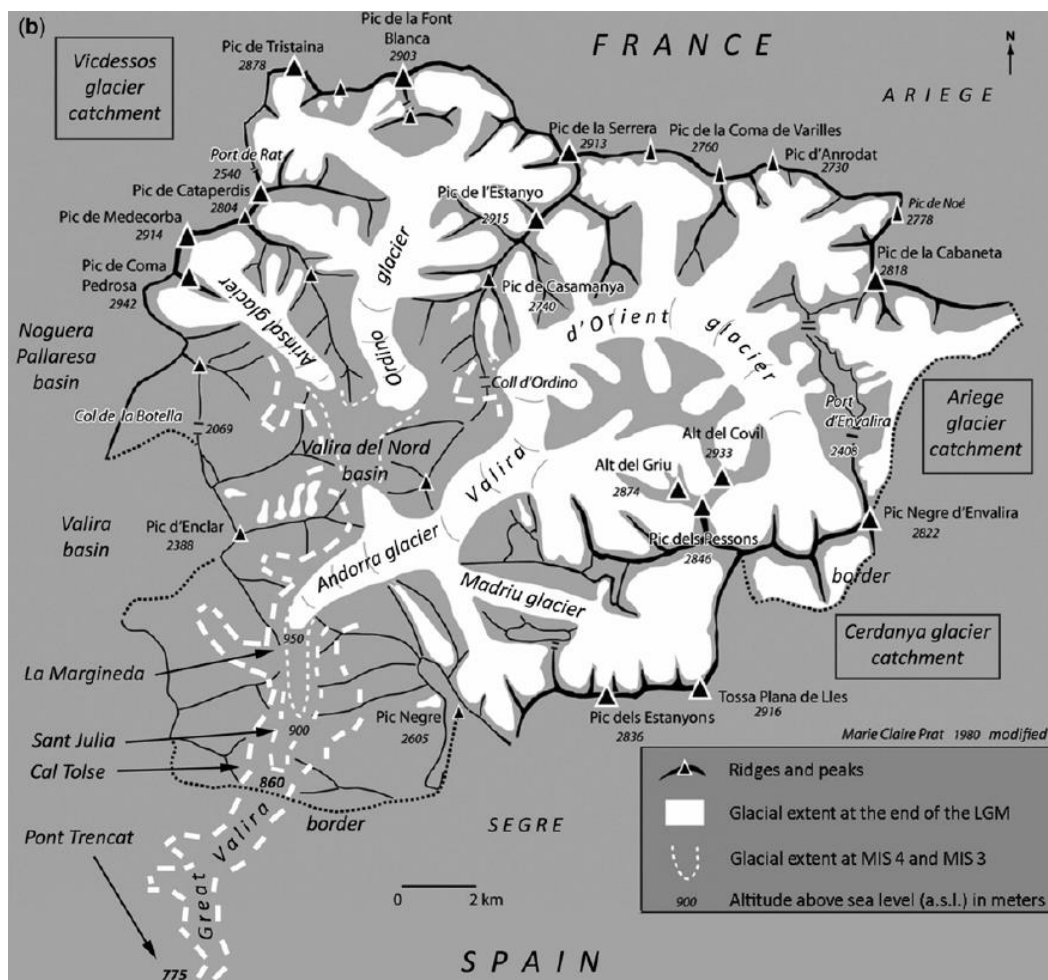


Figura 1. Mapa de la màxima extensió dels glaciers durant l'últim màxim glacial (LGM), realitzat per Turu, *et al* (2016)

1.3.2. Estudis de neotectònica, sismologia i risc sísmic a la cubeta d'Andorra

A la cubeta d'Andorra els estudis de neotectònica són quasi inexistent, ja que la majoria de possibles formes d'origen neotectònic haurien estat “esborrades” pels processos glacials o d'altres i que han estat interpretades com a formes glacials. Són els treballs de Turu, *et al.* (2006) i Turu, *et al.* (2005) els primers que demostren la possibilitat que a la zona del nord de la cubeta d'Andorra, zona amb gran quantitat de surgències hidrotermals, s'hi van detectar una sèrie de sediments de reompliment de la

cubeta que estarien afectats per fractures i falles. Aquestes es van detectar per mitjà de sondatges (figura 2). Aquests es van realitzar al Prat del Roure (figura annex: 1). Per altra part Teixidó, *et al* (2003) realitza una sèrie de perfils sísmics de refracció a la mateixa zona, mostrant una sèrie de fractures d'ordre mètric.

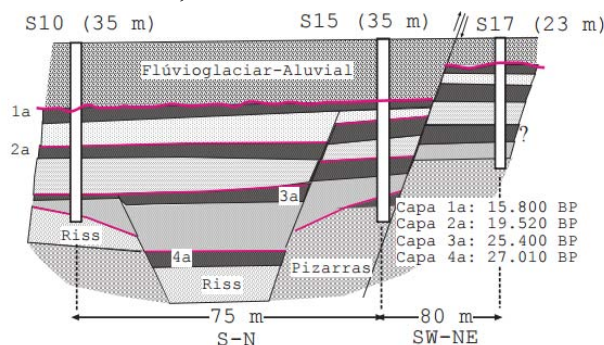


Figura 2. Sondajos realitzats al Prat de Roure; Escaldes. Aquests mostren com els materials del basament i del reompliment de la cubeta estan afectats per falles. Turu, V., *et al.* (2005)

Andorra al estar situada als Pirineus té un cert risc sísmic, ja que els Pirineus són una zona amb activitat sísmica. Per això Gonzalez, M., (2010) i Macau, A., (2008) van realitzar dues tesis en relació a la microsismicitat presenta a Andorra. Macau, A., (2008) realitza un treball principalment relacionat amb les acceleracions màximes del terreny en cas de terratrèmols, també té en compte la perillositat donada per desprendiments de vessants a causa de la vibració del terreny. Aquest obté una taula amb les diferents PGA obtingudes per a la cubeta d'Andorra (figura 3), en aquesta presenta les zones 1 -3 amb menor acceleració entre 0.14 – 0.18 una sismicitat moderada.

Zona	PGA(g)	Frecuencia fundamental		ΔI_{MSK}
		$v_{ProShake}$ (Hz)	$v_{Nakamura}$ (Hz)	
1 Ladera oeste de la cubeta	0.14	1.3	1.0 – 1.5	+0.0
2 Centro de Andorra la Vella	0.13	1.5	0.9 – 1.2	+0.5
3 Escaldes	0.18	1.0	1.0 – 2.0	+1.0
4 Andorra la Vella – Santa Coloma	0.24 – 0.30	2.4 – 2.7	0.9 – 3.0	+1.0
5 Margineda y ladera sureste de la cubeta	0.33 – 0.38	3.4 – 4.6	2.8 – 3.2	+1.5

Figura 3. PGA màximes de 5 zones diferents de la cubeta d'Andorra. La zona que pateix una major acceleració és la situada a la Margineda.

Per altra banda González, M., (2010) realitza un dels primers treballs en risc sísmic (perillositat i vulnerabilitat), que està centrat principalment en la vulnerabilitat de les edificacions de la població d'Andorra. Aquesta, realitza tres escenaris sísmics un determinista anàleg al terratrèmol del Ripollés de 1428 i els altres dos probabilístics caracteritzats per períodes de retorn de 475 i 1975 anys. Per aquests tres escenaris obté unes intensitats de VI-VII, VII i VIII. Aquests escenaris mostren que la població d'Andorra la Vella i Escaldes patiran un grau de danys entre lleu i moderat.

1.4. Estudis neotectònics en alta muntanya

En les zones d'alta muntanya, el terratrèmols de magnitud moderada ($M=5'6$) poden arribar a ocasionar catàstrofes majors que en zones amb relleus més suaus. Aquestes poden ser:

- A) Amplificació de l'energia sísmica en els grans desnivells topogràfics
- B) Es poden desencadenar a través d'una sacsejada sísmica en l'alta muntanya perills com: allaus, moviments de massa i represament de rius causat pels anteriors processos.
- C) Ruptures d'infraestructures com túnels de varis quilòmetres o grans embassaments.

Per tant la localització de falles potencialment actives pot fer-se per mitjà de la combinació d'estudis d'anàlisis de la topografia, estudis geològics, geomorfològics i anàlisis de la sismicitat. En les zones de deformació lenta, els períodes de recurrència dels terratrèmols destructius són molt grans en comparació amb el registre històric. Es per això que per dur a terme aquests estudis d'aquestes falles s'han de realitzar a través de l'estudi de la geomorfologia i la tectònica activa (trinxeres, tècniques geofísiques, anàlisis de camp, etc.). Per tant al estar la zona d'estudi dins dels Pirineus, que es tracta d'una zona de deformació lenta, aquest tindria que regir-se mínimament per aquesta estructura de treball.

1.4.1. Reptes de l'estudi

L'estudi de neotectònica en zones d'alta muntanya, presenta un conjunt de reptes donats per una sèrie de factors. Tenint en compte la baixa taxa de deformació de les falles lentes en zones de deformació intramuntanyosa (> 0.2 mm/any segons Machetet, 2000) es necessitarien registres de l'ordre de 100 ka per a poder caracteritzar de forma correcta l'activitat neotectònica. En zones d'alta muntanya les taxes d'erosió són majors que les taxes de deformació, a més si es té en compte que en la zona estudiada si hi ha glaciers, aquests hauran eliminat qualsevol indicatiu d'elements neotectònics, incloent-hi formes i dipòsits recents on podria haver quedat reflectida l'activitat neotectònica. Per tant la finestra tectònica quedaria molt reduïda. La finestra tectònica pels Pirineus és de 25 ka (Pallàs, *et al.* 2006). Una altra dificultat afegida són els dipòsits grollers de naturalesa caòtica (dipòsits glacials, de vessant i fluvio-torrencials). Aquests són dipòsits no estratificats i amb límits irregulars, per tant si estiguessin desplaçats per una falla seria molt difícil poder correlacionar-los amb alguna altre estructura. Per altra banda també hi ha els lineaments rectilinis com podrien ser els escarpaments, aquests si no estan relacionats amb dipòsits actius, serà difícil saber si corresponen a una falla antiga exhumada, la reactivació recent d'aquesta o la generació d'una nova falla. A més si aquest escarpament està situat entre el límit de dues litologies diferents i l'esglaió és coherent amb el canvi, hi hauria el dubte si s'ha format a causa de l'erosió o generat per l'activitat de la falla.

2. Context geològic i geomorfològic

A) Context geològic:

Andorra està situat als Pirineus entre França i Espanya, amb una extensió de 470 km². Al país hi ha dues grans valls, la del Valira del Nord a l'oest i la de la Valira d'Orient a

l'est, que condueixen fins Andorra la Vella, per donar forma al riu Valira. La serralada dels Pirineus és una serralada de direcció E – W, de doble vergència formada durant l'orogènia alpina, des del nord de Galícia fins a la Provença amb una longitud de 1300 km (Poblet, 1991) (figura 4). La serralada es va originar a causa de l'orogènia alpina Cretaci superior (Campanià) – Miocè inferior, com a conseqüència de la col·lisió de les plaques Ibèrica i Euroasiàtica. Tot i que la forma actual de la serralada es deguda al cicle alpí, els materials del sòcol ha sofert deformacions de cicles anteriors. L'orogènia no va provocar suficients processos plutònics ni metamòrfics, i la deformació no va ser prou important com per esborrar les característiques de deformacions anteriors (Muñoz, 1992a). Com s'ha dit anteriorment l'estructura alpina dels Pirineus ve determinada per un apilament antiformal d'encavalcaments alpins amb vergència cap al sud, mentre que la zona axial presenta una immersió cap a l'oest, on queda amagada sota la coberta mesozoica (Teixell, 1996). Els materials prehercinians hi afloren en forma de domos allargats de direcció est – oest, amb nuclis antiformes on hi afloren gneissos que deriven a roques magmàtiques ordovicianes i materials presilurians (Cocherie, *et al.*, 2005; Casas *et al.*, 2010). Tots aquests poden estar afectats per metamorfisme regional de baixa pressió i alta temperatura (Gil-Peña *et al.*, 2004). Els materials silurians i devonians afloren en sinclínors allargats. Per últim, hi ha diversos granitoides d'edat Varisca que intrueixen els materials anteriors. Andorra per tant, està situada a la zona axial del Pirineu, al sud de la falla nordpirinenca. El seu territori engloba de sud a nord diferents estructures hercinianes: dom de la Rabassa, sinclinal de Llavorsí, plutó d'Andorra – Montlluís, dom de la Pallaresa, sinclinal de Tor – Casamanya i massís de l'Hospitalet.

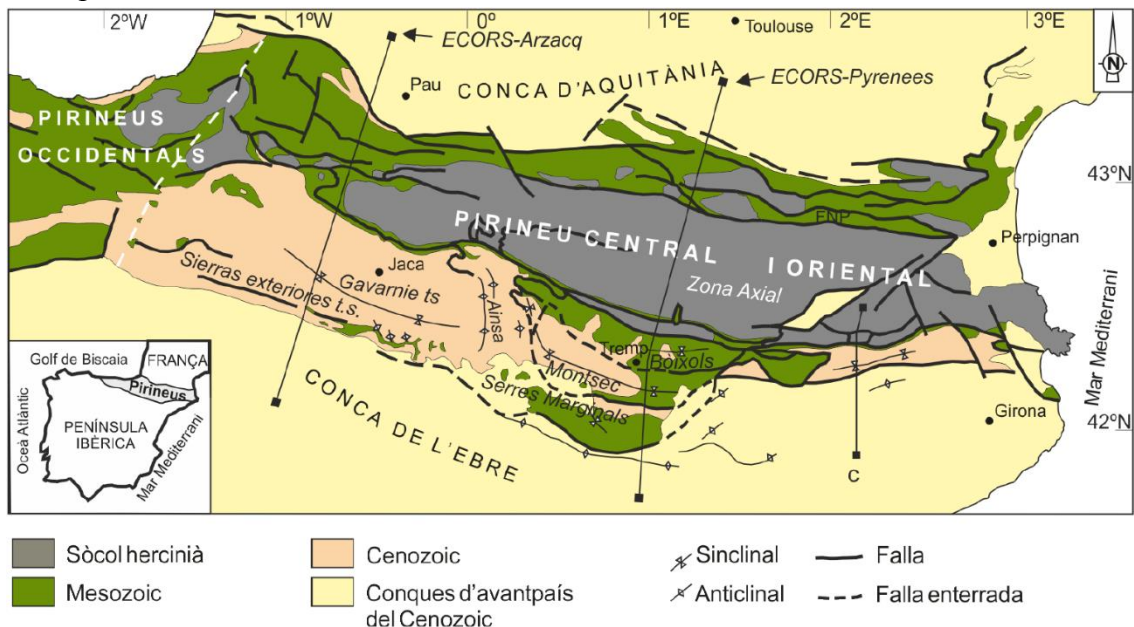


Figura 4. Esquema de les estructures principals dels Pirineus. La zona axial és on està situada Andorra. Extret de: Muñoz. 1992a

B) Context geomorfològic:

Durant el Quaternari és van formar moltes glaceres a les valls més elevades del Pirineu. Les valls del Valira van ser una de les que van sofrir els processos glacials, a causa del emplaçament d'aquestes glaceres (figura 5). El paisatge actual de les valls d'Andorra és,

principalment, el resultat de la excavació dels glaciers pirenaics de la regió durant el Quaternari. En l'actualitat, les valls en forma de "U" que presenta la zona són conseqüència dels processos glacials, també es presenten diferents elements com valls tributaries penjades, circs glacials, roques amoltonades, estries glacials, morrenes, etc. Al modelat glaciari si suma també l'acció dels processos periglacials, molt actius en l'actualitat, més la sobreimpressió de la xarxa fluvial, on en certes zones comença a formar valls en forma de "V" típics de processos fluvials.. Tot aquest conjunt de processos ha creat un relleu molt encaixat, de grans pendents i de desnivells fins a 1500 metres entre els fons de vall i els cims. Com en la majoria de paisatges glacials, hi ha un predomini de les formes erosives, tot hi que també hi ha un gran nombre de dipòsits tant fluviolacustres, com glacials. Els complexos fluviolacustres van ser estudiats per Vilaplana, 1984.

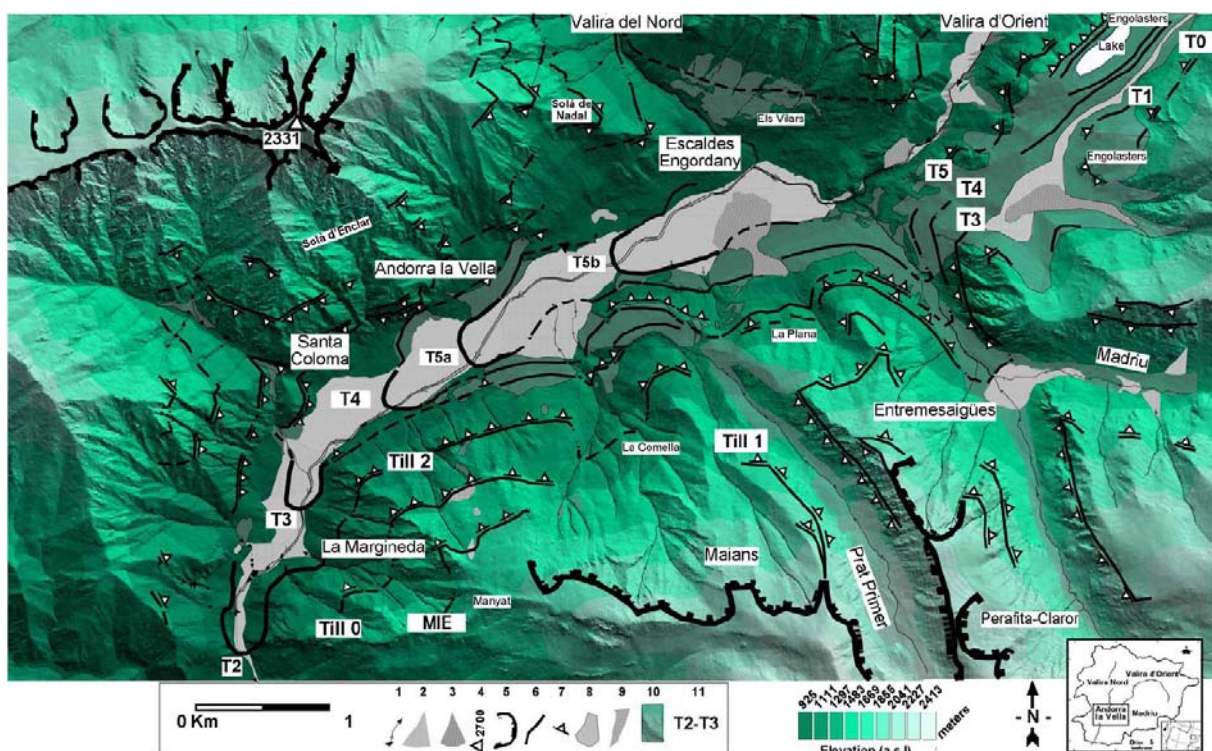


Figura 5. Mapa geomorfològic on es mostren els principals elements glacials i fluviolacustres de la vall del Valira. Llegendari: 1: escorrentia; 2: ventalls al·luvials; 3: debris flow; 4: cims; 5: circs glacials; 6: morrenes laterals i frontals; 7: llit de roca afectat per la glacera; 8: sediments de la vall (fluvials glaciofluvials); 9: monticle de materials glacials; 10: Till indiferenciat; 11: posició del front glaciari en diferents estadis. Extreta de : Turu, 2016

3. Context neotectònic: Pirineus zona de deformació lenta

El període de relaxació tectònica que correspon al període neotectònic, comença en el Oligocè en la part Oriental i en el Miocè en la part Oriental de la serralada. El final de la part compressiva en la part Central de la serralada està situat entre 25 – 50Ma, moment en el que es daten els últims encavalcaments del avantpaís meridional (Burbank, 1997). Des de llavors, els Pirineus corresponen a un sistema inactiu (postorogènic) (Lynn, 2005). Però per altra banda, les evidències tan geològiques com sísmiques mostren una certa activitat sísmica, que ha actuat en diferents part de la serralada.

En l'actualitat, els Pirineus corresponen a una zona de deformació lenta, les evidències que en trobem són a través de la sismicitat moderada, les mesures de deformació horitzontal obtingudes en GPS i les taxes de deformació acumulada en estructures actives durant el quaternari. Les taxes de deformació horitzontal a través de la serralada no superen 1 mm/a (Ortuño, 2008).

Els treballs sobre tectònica activa en el Pirineu central són molt escassos. Treballs realitzats per Ortuño, (2008), Bordonau, (1985) i Vilaplana, (1986) al Massís de La Maladeta documenten la presència de falles neotectòniques afectant-lo amb orientacions E-W i NW – SE. Aquesta zona es similar a la zona de la cubeta d'Andorra, ja que la zona d'estudi d'Andorra també està situada a les immediacions del encavalcament de Gavarnie. Les poques falles actives del Pirineu presenten unes taxes de deformació vertical entre 0'05 – 0,25 mm/any (Briais, et al. 1990) sense arribar a superar els 0'3 mm/any (figura 6). Tot i això es probable que al començament de la seva reactivació, s'hagin donat períodes en que les estructures fossin molt més actives arribant a superar el 1mm/any.

Falla	Tasa de desplazamiento vertical (mm/a)	Periodo considerado	Fuente
<i>Amer</i>	0,05-0,125	Pliocuatnario	Fleta et al., 2001
<i>Tet</i>	0.2-0.3	Desde hace 10-15 M.a.	Briais et al., 1990
<i>Tech</i>	~0.1	Desde hace ~25 M.a.	Briais et al., 1990
Lourdes	0.2-0.25	Cuatnario	Alasset y Meghraoui, 2005

Figura 6. Taxes de moviment de les 4 falles neotectòniques més representatives dels Pirineus. Figura extreta de: Ortuño, M., (2008).

4. Metodologia

Per realitzar aquest treball s'han dut a terme una sèrie de diferents mètodes, Els diferents mètodes utilitzats són: anàlisi bibliogràfic, fotointerpretació, treball de camp i cartografia en model digital del terreny.

4.1. Anàlisi bibliogràfic

En aquesta etapa el que s'ha realitzat principalment és un recull dels diferents estudis anteriors, permetent que no es parteixi de zero en l'estudi de la Cubeta d'Andorra.

Els treballs més importants que han estat utilitzats són: 1) sobre processos glacials als Pirineus i en especial a Andorra la Vella i Escaldes, 2) estudis de neotectònica en altres regions semblants a la cubeta intramuntanyosa, treballs de cartografia d'elements neotectònics ens zones que han sofert varis processos glacials. 3) Altres estudis de prospeccions geològiques que es van realitzar a Andorra la Vella i estudis de recerca geològica a Andorra. Per últim, s'ha dut a terme una recerca al voltant dels diferents estudis de microsismicitat present avui dia en el Principat d'Andorra.

S'ha realitzat un recull de diferents mapes geològics antics, tot i que no n'hi ha molts s'ha escollit els tres més importants com: Hartevelt, (1970) i Llopis, (1966-1967). Aquests han permès observar les diferents interpretacions de la zona estudiada. Són antics però en certs aspectes són molt més complets en alguns aspectes, que el mapa geològic més actual (també utilitzat en aquest treball) realitzat per Margalef, (2015).

4.2. Fotointerpretació i model digital del terreny

Per a la realització de la fotointerpretació s'han utilitzat les fotografies aèries cedides pel departament de Cartografia del Govern Andorrà. Aquestes es van realitzar en el vol fotogramètric del any 2012 i presenten una escala 1:18.000 que han permès crear el mapa geomorfològic de la cubeta d'Andorra. Per a la realització d'aquest mapa també s'ha tingut en compte el mapa geomorfològic de tot Andorra d'escala 1:50.000 realitzat per Copons, R. *et al.* (2001), el qual presenta part dels elements geomorfològics de la zona.

Un cop havent fet la cartografia mitjançant les fotografies aèries, s'ha passat a utilitzar el model digital del terreny (MDT), referenciat NTF Lambert III Andorre en format *.tiffgeo*. Per arribar a obtenir el "Hillshade" que consisteix en una simulació en 3D del relleu ombrejat, per tal de facilitar l'observació de varies formes del terreny. S'han creat models d'ombra amb diferents orientació i inclinació de la llum per tal de permetre una millor cartografia dels diferents vessants i elements geomorfològics.

Per passar de MDT a "hillshade", s'ha d'anar a "ArcToolbox" utilitzant l'eina "Spatial Analyst Tools" i a continuació "Surface" i per últim a "Hillshade". A partir d'aquí s'han d'entrar les dades del raster i decidir la direcció i orientació d'il·luminació que es vol i ja s'obtindran els Hillshades. D'aquesta manera s'obtindran les imatges amb diferents il·luminacions que siguin necessàries.

Per l'anàlisi de les conques hidrogràfiques i d'altres elements morfològics, s'han realitzat una sèrie de talls topogràfics, on s'explicaran amb més profunditat en apartats posteriors. Per aconseguir aquests talls topogràfics s'ha d'utilitzar l'eina "3D analyst" al ArcMap, per col·locar-la, llavors ens dirigim a "Customize", i un cop allà a "toolbars" i cliquem a "3D analyst". Fent aquests passos obtenim les eines suficients (figura 7) per als talls topogràfics.

4.3. Treball de camp

La zona principal de camp de la cubeta d'Andorra que s'ha estudiat és la marcada amb el requadre vermell (figura 7).

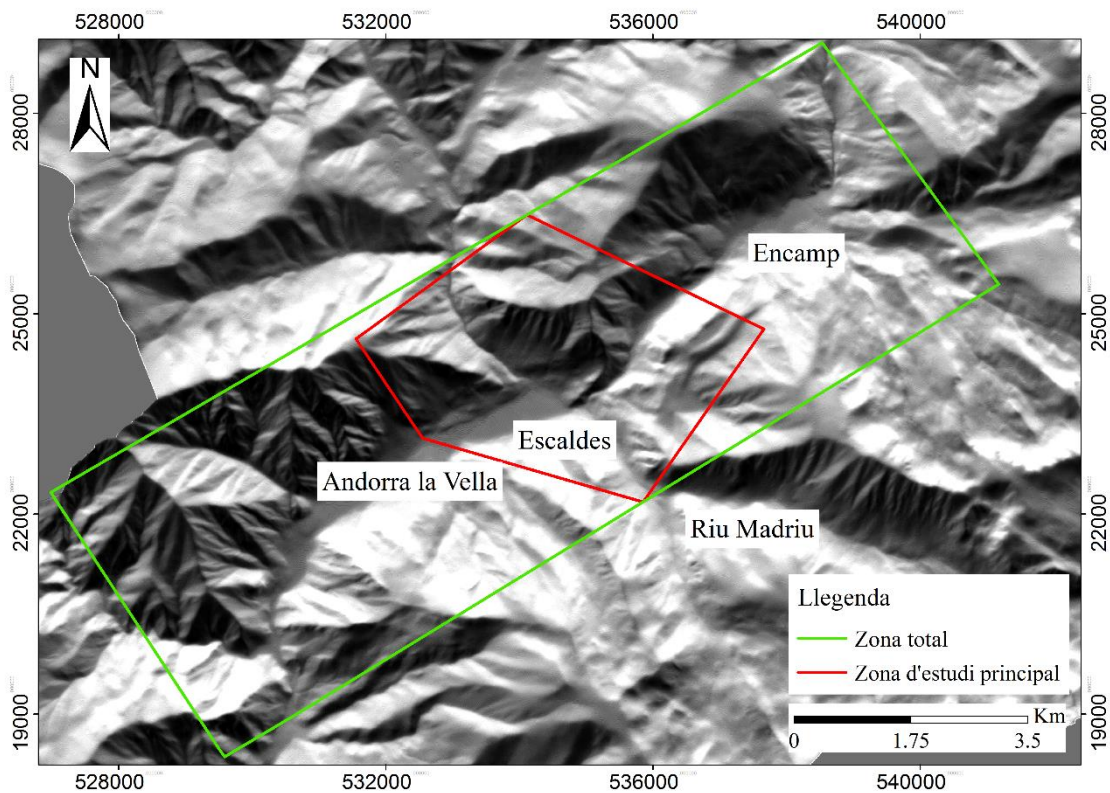


Figura 7. Mapa de situació de la zona principal d'estudi i de la zona on s'han dut a terme qualsevol tipus d'observació geomorfològica.

S'ha treballat aquesta zona, donat que és la que presenta més estructures de superfície, a més de tractar-se de la zona on s'hi presentaven les facetes triangulars de possible origen tectònic.

Les eines utilitzades per aquesta metodologia han estat:

- Mapes topogràfics a escala 1:5.000, cedits pel departament de Cartografia d'Andorra.
- Ortofotografies a escala 1:5000, també cedides pel departament de Cartografia d'Andorra.

Aquestes eines han permès realitzar una cartografia de camp de totes les litologies i elements geomorfològics que es podien observar de manera clara durant la realització del treball de camp. Per altra banda s'han recollit una sèrie de mostres de mà de les diferents litologies, les quals es va marcar la seva localització com es pot observar en la figura 8. Aquesta metodologia va permetre comprovar els materials i contactes entre ells al camp. En ocasions, aquests han estat modificats lleugerament.

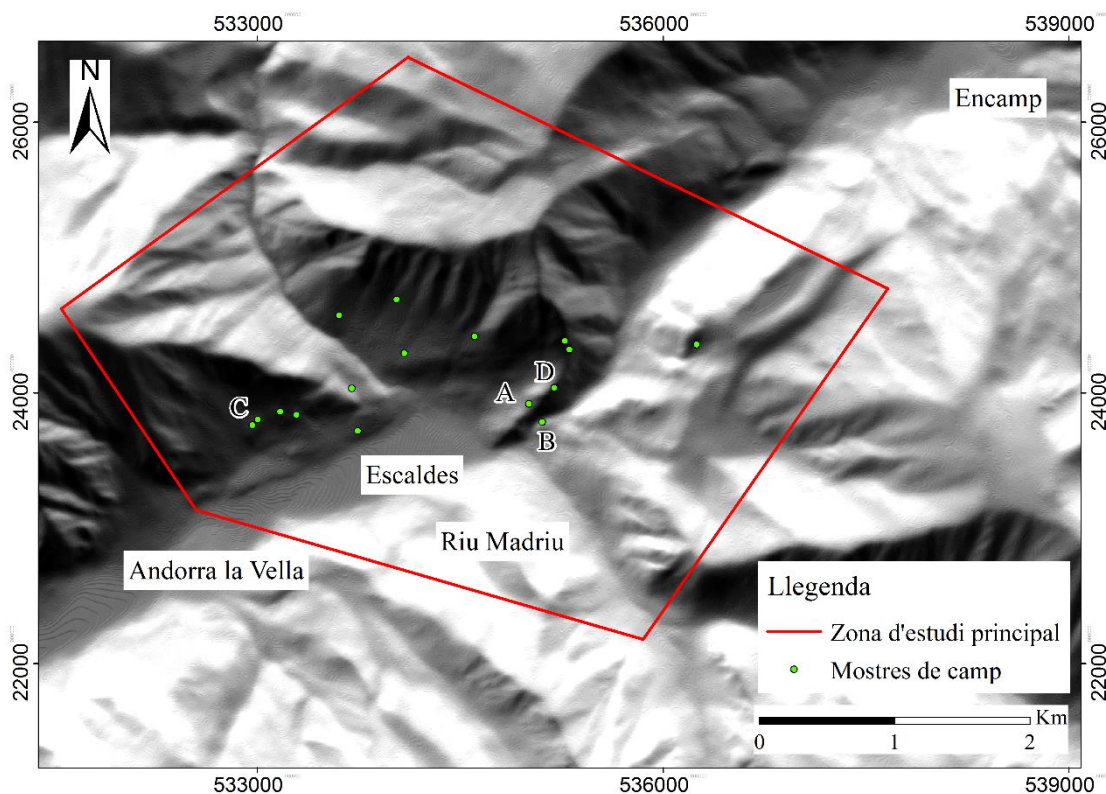


Figura 8. Es mostra els diferents punts de localització on s'han recollit mostres de mà, dins de la zona principal d'estudi.

5. Resultats

A través de les diferents etapes d'aquest estudi s'han obtingut uns resultats, que han permès l'obtenció d'una cartografia geològica i geomorfològica, on s'han analitzat per grups els diferents elements tant de possible origen neotectònic com d'origen glacial o gravitacional. La integració de dades ha permès obtenir una possible evolució de la cubeta d'Andorra.

5.1. Cartografia geològica i geomorfològica

La cartografia geomorfològica de la zona d'estudi com es pot observar en figures: 1 de l'annex s'ha realitzat un mapa amb tots els elements geomorfològics observats i un mapa geològic (annex; figures 2 i 3). Aquest últim en resulta d'una modificació dels mapes geològics de Margalef, A. (2015), Hartevelt, (1970) a través de les diferents observacions de camp.

En la cartografia geològica s'han diferenciat un total de 9 tipus de materials diferents. Les diferents formacions són (Hartevelt, (1970)): Fm Jújols, Silurià, Fm Rueda, Fm Manyanet, Fm Castanesa, Fm Civís, granodiorita, quarsita i quaternari.

Materials Geològics:

La *Fm Jújols* està formada per una alternança centimètrica de pissarres fosques i gresos de gra molt fi blanquinosos, molt monòtona, amb una tonalitat blavosa. A la part superior s'hi troben capes de fins a 50 cm de quarsita (Margalef, (2015)), són materials d'edat cambro - ordoviciana. Els materials del *Silurià* se'ls ha mantingut aquesta

denominació cronostratigràfica al llarg del temps, ja que no presenta variacions litostratigràfiques en tot el Pirineu. Aquests estan formats per pissarres ampelítiques negres o de color gris fosc, generalment grafitoses, on es habitual trobar-hi capes de calcàries negres intercalades. Per altra banda també presenten mineralitzacions de pirita, calcopirita i precipitació de sulfats (Margalef, 2015). La *Fm Rueda* d'edat devoniana presenta capes centimètriques a decimètriques de calcàries sorrenques mudstone – wackestone i pissarres sorrenques, de coloracions ocres i marronoses (Margalef, 2015). La *Fm Manyanet* també d'edat devoniana està formada per una successió de calcàries grises amb intercalacions decimètriques de calcàries margoses. Una característica important és que, en general, les calcàries es troben recristal·litzades, de manera que presenten una alternança amb marbres blanquinosos de menor duresa (Margalef, 2015). La *Fm Castanesa* està formada per calcàries massives mudstone, de color gris fosc, intercalades amb argiles i pissarres, presenta abundants venes de calcita recristal·litzada. Són d'edat devoniana (Prangià – Emisià inferior (Margalef, 2015). La *Fm Civís* d'edat devoniana consta d'una successió monòtona de pissarres micàcies compactes de color marró gris (Margalef, 2015). Els *granitoides* d'edat tardihercinianes donen forma a dos grans cossos dins de la zona de treball (annex: figures 2 i 3), són intrusions granodiorítiques amb biotita associades a roques subvolcàniques (Casas, *et al.*, 1989 , 2002). Les *quarsites*, com el nom indica estan formades al complet per quars de color blanc i estan localitzades just al límit dels granitoides formant una capa d'uns 40 metres. En algunes zones formen intercalacions amb els granitoides, per tant aquestes estarien relacionades amb el material granític.

Els materials més importants dins de la zona principal d'estudi (figura 9) serien la *Fm Manyanet*, la *Fm Civís*, els granitoides i les quarsites, Aquestes han estat agafades en diferents zones de la cubeta (figura 8). En la figura 11 es presenta un conjunt de quatre fotografies de mostres de mà de cadascun dels materials.

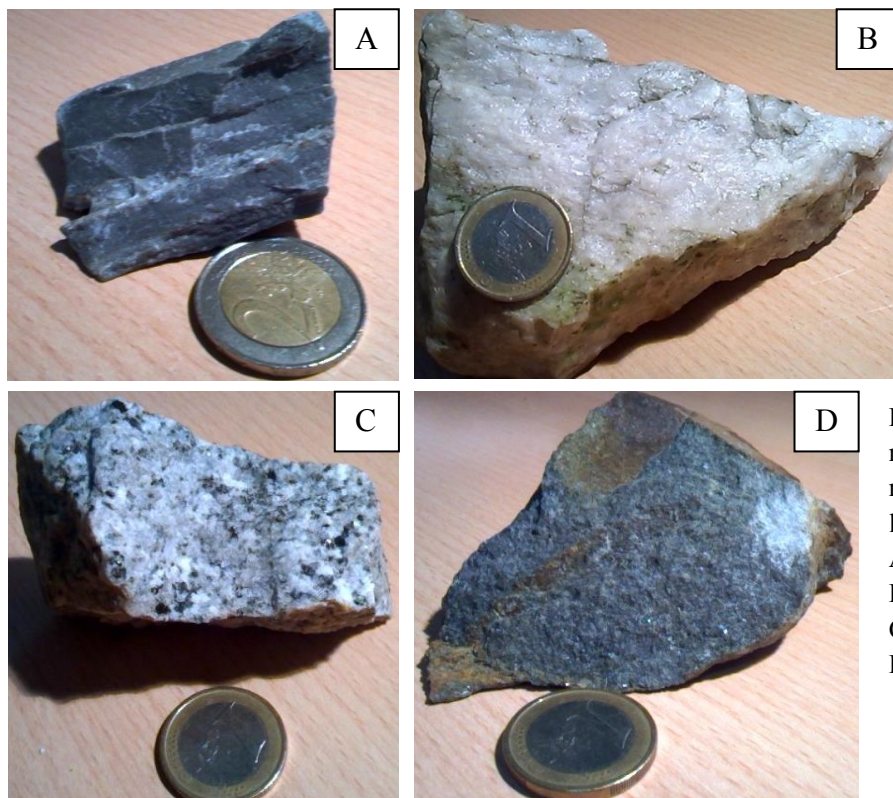


Figura 9. Fotografies de mostres de mà dels materials més importants de la zona principal d'estudi.
 A) *Fm Manyanet* (calcària)
 B) Quarsita
 C) Granodiorita
 D) *Fm Civís* (Pissarra)

En la cartografia geomorfològica s'han cartografiat diferents elements com: escarpaments, canals fluvials, rius, carenes principals, cicatrius d'esllavissades, petits circs glacials, facetes triangulars i diferents tipus de dipòsits de materials tals com: esllavissades, morrenes, ventalls al·luvials, tills i tarteres.

Dins d'aquesta cartografia, s'han dividit els elements geomorfològics en formes no tectòniques (glacials i gravitacionals) i formes de possible origen neotectònic. En aquesta classificació es poden trobar elements planars i lineals (escarpaments, canals fluvials). Aquests són els principals elements d'anàlisi, ja que és més fàcil d'observar el desplaçament, per part d'un possible moviment d'una falla neotectònica. S'han de destacar les facetes triangulars, que podrien contenir plans de falla i estries de falla, a part de permetre veure desplaçaments verticals. Els plans i estries de falla s'han visitat al camp, per a poder comprovar la seva correspondència entre ells i els diferents elements geomorfològics, principalment el canals fluvials.

Els escarpaments es localitzen en qualsevol tipus de litologia i al llarg dels vessants de la cubeta d'Andorra, al igual que els canals fluvials (annex: figura 1). Les facetes només són observables al nord de la cubeta. En els apartats 5.2.1 i 5.2.2 es donarà més informació en relació aquests elements.

Per tant, en l'anàlisi dels diferents elements geomorfològics, només s'han escollit principalment, els que estan situats a dins de la zona d'estudi principal, figura 10.

5.2. Anàlisi geomorfològic

Per a l'anàlisi geomorfològic s'han dividit en formes no tectòniques i en formes de possible origen neotectònic. Per realitzar aquesta divisió, s'ha anat analitzat cadascun dels elements i segons les diferents característiques que presentava s'han classificat dins d'un bloc o un altre. Es fa aquest tipus de classificació per a poder arribar a concloure si la zona té possiblement estructures neotectòniques o no. Els canals fluvials, són classificats com a formes no tectòniques, tot i que presenten certs canvis en la seva morfologia, que podrien resultar de l'activitat de la falla.

5.2.1. Elements no tectònics

Les formes no tectòniques classificades en aquest apartat, són un conjunt tant d'elements lineals, dipòsits de materials i formes glacials. Dins d'aquest apartat es presenten escarpaments, morrenes, drumlins, esllavissades, tills i ventalls al·luvials.

A) Canals fluvials

Rius principals:

S'han analitzant mitjançant perfils topogràfics (figura 10) els rius Valira del Nord i Valira d'Orient. S'han realitzat anàlisi en aquests rius degut a que travessen perpendicularment la zona dels canals anteriors i com s'ha vist, aquests contenen un canvi de pendent.

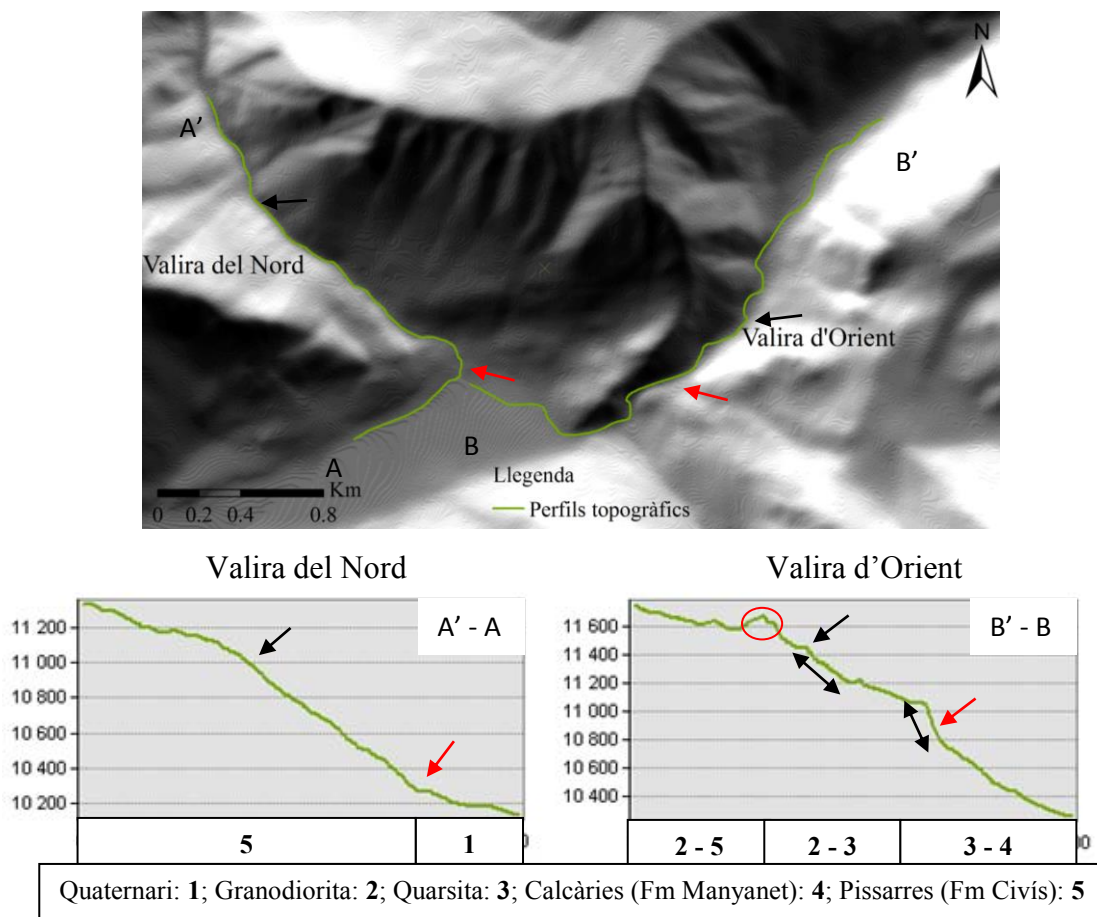


Figura 10. Mapa de situació dels dos Valires més els dos perfils topogràfics on es presenten una sèrie de anomalies en la topografia d'aquests. Les fletxes de color vermell són anomalies aigües avall de les anomalies pintades de les línies de color verd. La zona encerclada és una anomalia a causa del model digital, la topografia seguiria constant en aquella zona. S'han afegit les litologies per on passa el riu. Quan hi ha dos valors es deu a que el riu passa pel límit de dos litologies diferents.

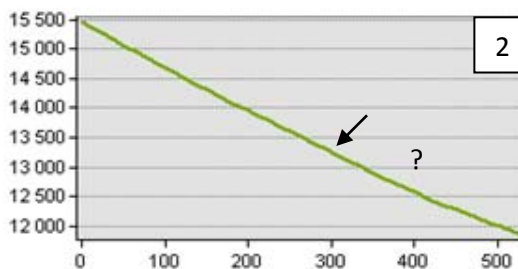
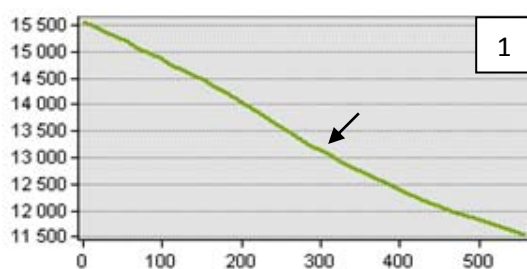
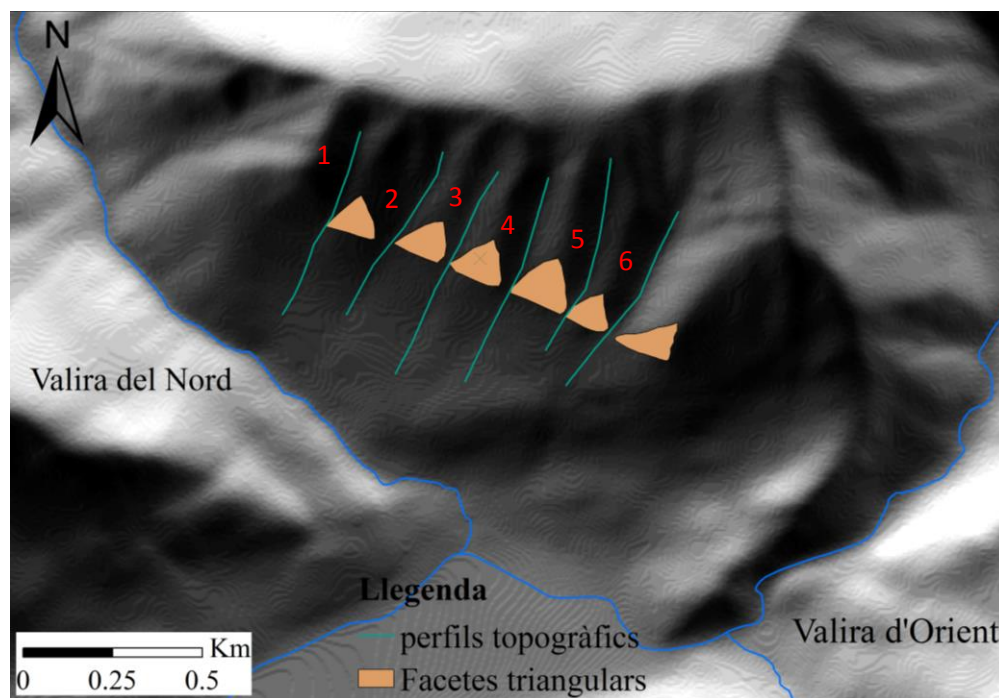
Observant els dos perfils (figura 13) es detecta que cada un conté dues anomalies: una aigües amunt i una altra aigües avall. Si s'analitza l'anomalia aigües avall del Valira d'Orient, es pot veure com el riu mostra un salt topogràfic bastant marcat. Aquest podria venir donat per la tectònica o per l'erosió remuntant del riu, donat que aquest gran canvi, només es podria donar per aquests dos processos. Per altra banda, l'anomalia aigües avall del Valira del Nord també té forma d'esglaó, però molt menys marcat, aquest, segurament ve donat a causa del canvi litològic, ja que es passa d'unes pissarres (Fm Civís) amb certa duresa a material Quaternari molt més tou. Aigües amunt dels dos Valires (figura 13) es presenten també unes irregularitats en la topografia. El canvi de pendent al Valira del Nord es dona pel fet de que es tracta d'una vall penjada, formada per la glacera provinent d'aquella vall. En canvi, el petit salt del Valira d'Orient (figura 10), podria venir donat per la tectònica, ja que es troba alineat amb la traça que marquen les facetes triangulars. Aquestes variacions en la topografia es deuen principalment a processos glacials, tot i que com s'ha anomenat poden ser d'origen tectònic.

Torrencials:

Els principals canals fluvials analitzats són els que podem observar en la figura 11. També s'han analitzat el riu Valira d'Orient, el Valira del Nord i el Valira. Per analitzar aquests s'han realitzat una sèrie de perfils topogràfics al llarg de la seva llera, podent observar així canvis en la seva topografia i seguidament s'ha analitzat si aquests canvis són causa d'alguna estructura de tectònica activa o canvis litològics.

Els primers que s'han analitzat són els situats a la zona principal d'estudi d'Escaldes, on es troben les facetes triangulars (figura 11). Observant els perfils topogràfics dels canals 1, 3, 4 i 6 es pot detectar que hi ha un canvi en el pendent, en forma d'esglaó. Aquest es dona a la meitat del vessant just a la base de les facetes triangulars. Per tant, aquest és un indicatiu que porta a sospitar que algun procés possiblement tectònic o glacial ha provocat aquest canvi.

En els canals 2 i 5 és molt difícil observar aquest canvi, tot i això per interpolació entre els canals 1 - 3 i 4 - 6 s'ha marcat per on tindria que haver-hi el canvi. Observant el canvi de pendent, com s'ha dit anteriorment, pot ser donat per la tectònica o per una erosió glacial durant l'últim màxim glacial. Aquest canvi de pendent es equivalent al canvi de pendent observat a la base de les facetes, aquestes estan explicades en l'apartat 5.2.2.



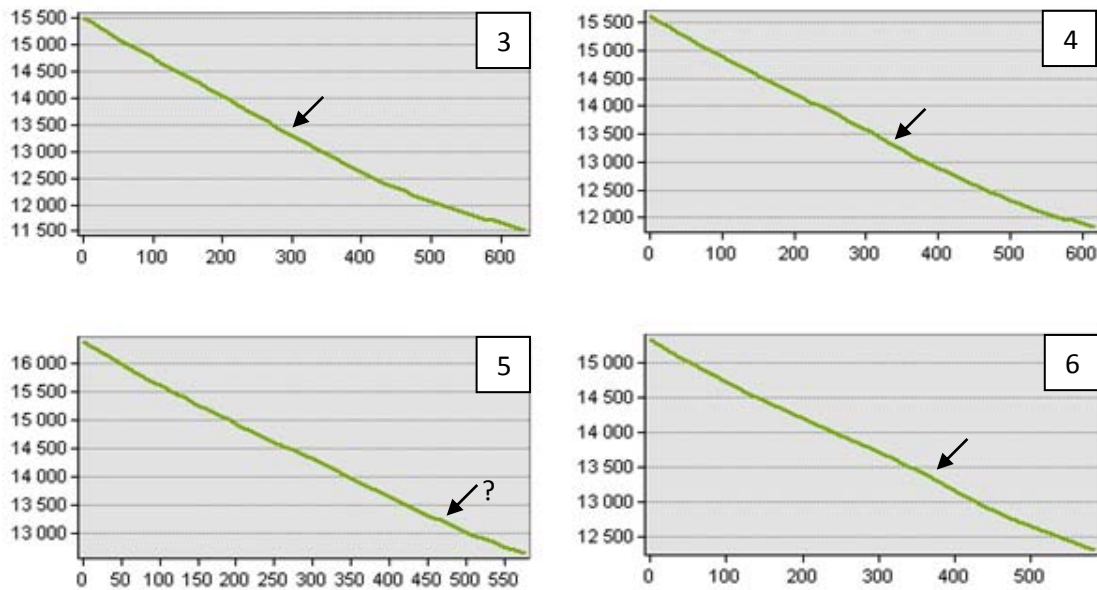


Figura 11. Diferents talls topogràfics dels canals que estan a la zona de les facetes triangulars. En aquests s'observa un canvi de pendent a uns 1325 – 1300 metres. Les línies vermelles en el mapa marquen la situació del canvi de pendent.

B) Escarpaments no tectònics

Aquests apareixen al llarg de tota la zona d'estudi. Com es pot observar en el mapa (annex: figura 1) s'han classificat en tres tipus de escarpaments: escarpaments glacials, formats a causa de la glacera, escarpament litològics, formats per processos erosius i per últim, escarpaments sense classificació específica que podrien donar-se tant per processos glacials, gravitacionals, etc.

Escarpaments glacials:

Aquestes formes geomorfològiques es modelen a partir de l'erosió als vessants a causa de la glacera. Normalment en una mateixa zona se'n troben més d'un, ja que aquests marquen el nivell fins on ha arribat la glacera. Aquests a més contenen estries que marquen la direcció de la glacera, una característica que permet 100% classificar-lo en aquest bloc.

Escarpaments per erosió diferencial:

Aquests com s'ha anomenat anteriorment es formen a través de processos erosius. L'erosió afectarà abans als materials més tous, fent que els materials durs sobresurtin i acabin formant zones d'escarpament ben marcades. Aquests en cap cas s'han format a través de processos glacials.

Escarpaments (no específics):

Són escarpaments els quals poder classificar-los en un dels anteriors blocs o en un de nou es fa difícil, degut a que no mostren cap tipus de característiques especials. Segons la forma podrien ser gravitacionals, o sigui formats a causa d'un desplaçament de massa.

C) Facetes triangulars

Al vessant est de la cubeta d'Andorra (annex: figura 1) es detecten una sèrie de facetes glacials. S'ha realitzat un conjunt de perfils topogràfics per entendre el vessant (annex: figura 4), Al observar aquest perfils topogràfics i tenint en compte la variació de

litologies dona a la zona, segurament es tractaria de facetes formades per processos glacials i a causa de la variació de la litologia s'obtenen aquestes formes, Annex: figures 2 i 3.

D) Morrenes

Les morrenes es troben situades al nord - oest de la cubeta d'Andorra (annex: figura 1). Aquestes estan situades a una altitud de 1660 metres. Com es pot observar en els perfils topogràfics (figura 12), part d'una mateixa morrena està més amunt que l'altra, per tant aquestes es deuen haver sedimentat en una zona que ja tenia un salt topogràfic. Aquest està alineat amb el salt aigües amunt del Valira d'Orient i amb els plans de falla que s'explicaran en el apartat 5.2.3. L'altre morrena presenta dos salts topogràfics, el primer es per causes antropològiques que van extreure part de la morrena, en canvi el segon és causa d'una anomalia estructural. Aquest està alineat amb el canvi de pendent aigües avall del riu Valira d'Orient.

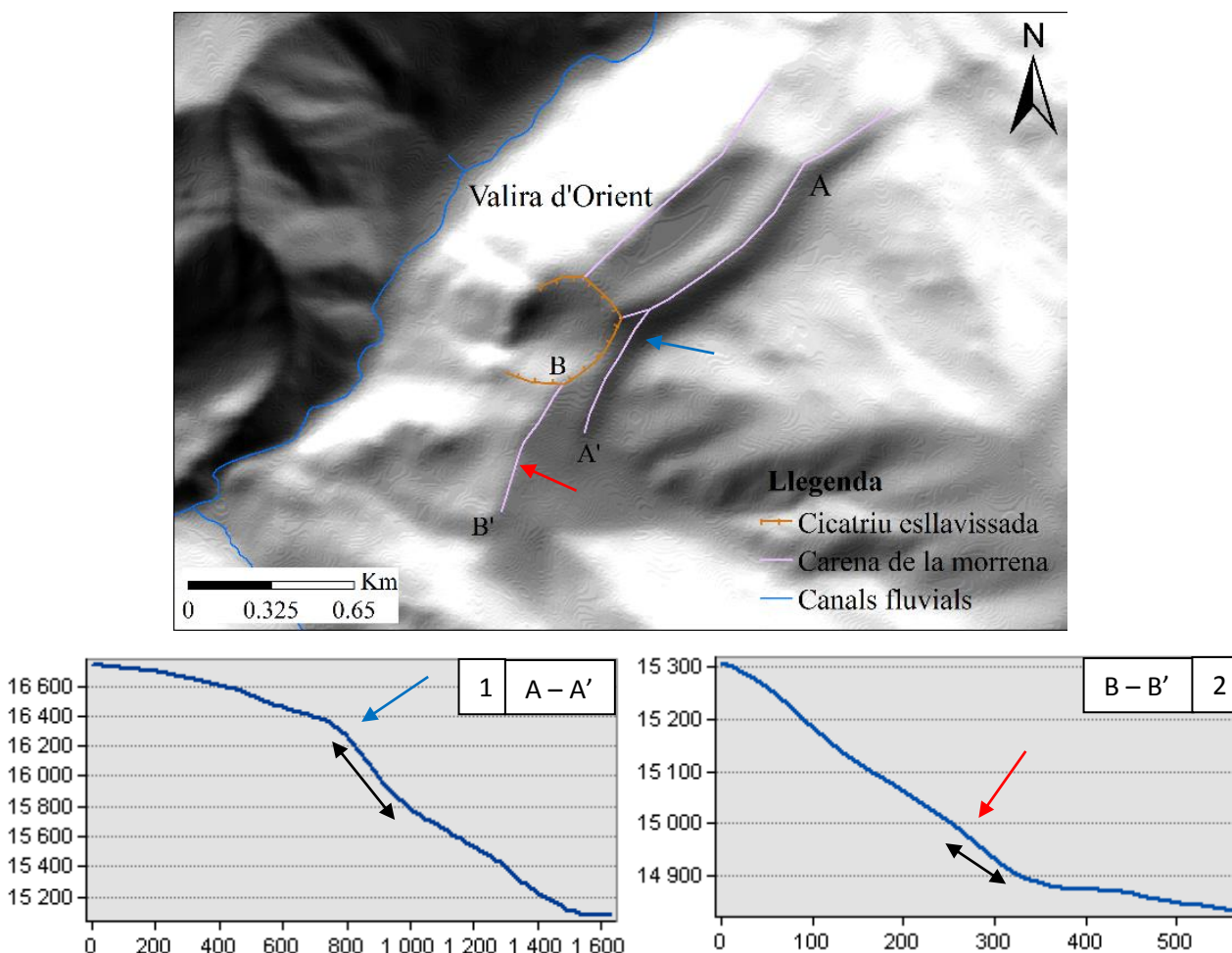


Figura 12. En el perfil topogràfic 1 es pot observar un gran salt topogràfic. El segon perfil mostra dos canvis de pendents, un antropològic (primer salt) i l'altre estructural.

E) Ombres glacials i gorja subglacial

Les ombres glacials (figura 13 A) són uns elements geomorfològics, que es donen per processos glacials erosius. Aquestes es produeixen a les vores de la vall glacial degut a

la menor erosió de roques de major resistència, que són més difícils d'erosionar per la glacera.

La gorja subglacial (figura 13 A i B) és una estructural que es forma per sota del casquet glacial. Aquesta té forma de "V". La funció d'aquesta estructura és desguassar les aigües subglacials.

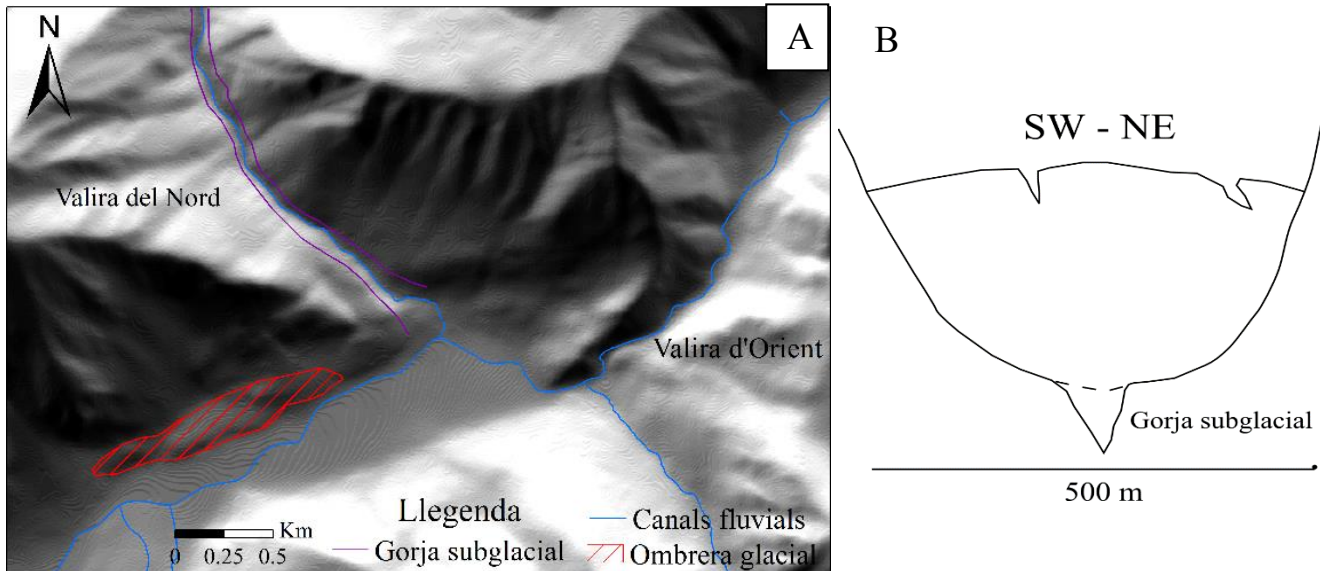


Figura 13. 13A) Situació de la gorja subglacial, l'ombreira glacial, pertanyent al vall del Valira del Nord i a la Vall del Valira (Vall central), respectivament. 13B) Tall esquemàtic de la gorja subglacial

F) Dipòsits de materials detrítics

La zona presenta diferents dipòsits (Annex: figura 1). S'observen dipòsits glacial (tills), dipòsits d'esllavissades, dipòsits d'acumulació de caigudes de roques (tarteres) i ventalls al·luvials. Cap d'aquests dipòsits presenta cap tipus de característica que mostri un desplaçament per falla neotectònica. Aquests es donen principalment per processos gravitacionals.

5.2.2. Elements de possible origen neotectònic

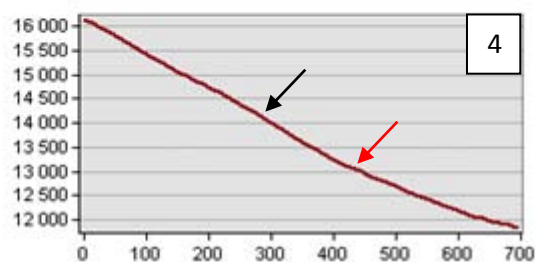
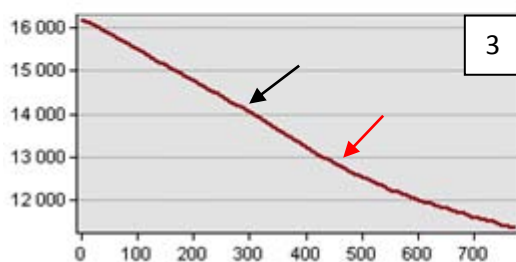
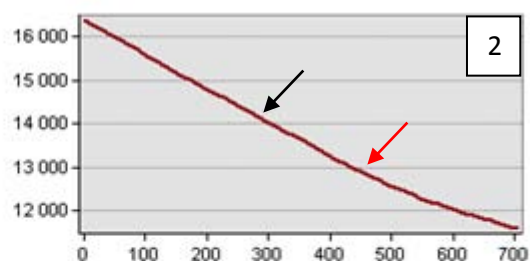
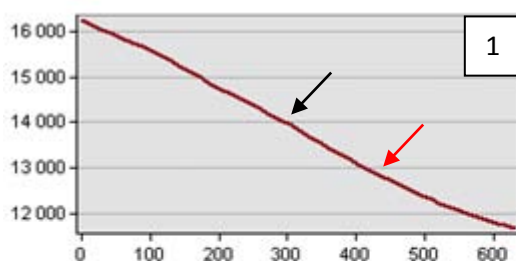
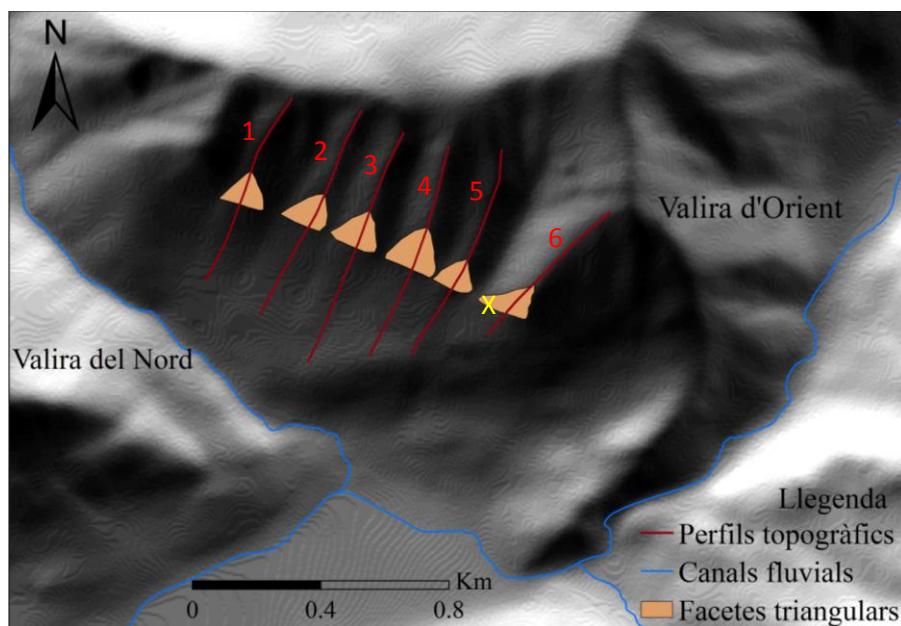
Els elements classificats en aquest apartat s'han format només a través de processos tectònics, els quals mantenen la possibilitat que s'hagin format a causa de falles neotectòniques. Aquests són escarpaments de falla, plans de falla, estries de falla i facetes triangulars.

A) Escarpaments de falla

Els escarpaments entren dins del grup d'elements lineals que permeten la identificació de falles. La zona d'estudi en presenta una amb escarpaments de falla. Aquesta situada al sud-oest de la cubeta (annex: figura 1). Hartevelt, (1970) i Margalef, (2015) marquen que hi passa una falla normal i un encavalcament. Segons Hartevelt, (1970) (annex: figures 2 i 3) aquesta falla normal travessa la cubeta pel vessant obac.

B) Facetes triangulars

Les facetes triangulars que s'han detectat estan situades al nord de la cubeta d'Andorra (annex: figura 1). Aquestes estan localitzades entre 1425 – 1300 m.s.n.m. S'han realitzat un conjunt de perfils topogràfics (figura 14), per poder detectar millor el canvi de pendent que donen aquestes estructures. Observant els perfils topogràfics es detecta que en una mateixa faceta hi ha dos canvis de pendents, aquests per tant mostren empíricament que aquesta estructura és present. Els canvis de pendent de la faceta número 2 i la base de la faceta número 1 s'han interpretat a través de les altres facetes. Per tant aquestes estructures es poden haver format per processos glacials, donat que per aquest final de vall s'hi propagava una glacera o per tectònics, ja que en la base de la faceta número 6 s'ha trobat un pla i estries de falla (figura 14).



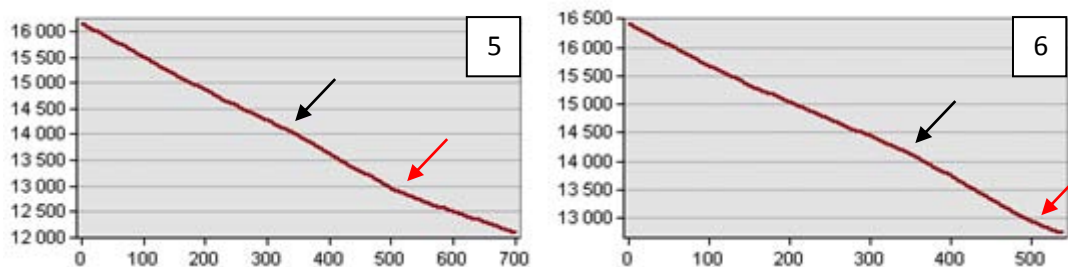


Figura 14. Situació i perfils topogràfics de les facetes triangulars. En els perfils es marca el sostre i la base de les facetes. Fletxa de color negre punt més alt de la facetes i fletxa de color vermell punt més baix. La marca "X" és on s'han trobat els plans i

C) Plans de falla i estries

S'han detectat uns plans de falla i estries a la zona de les facetes del nord (figura 14). Aquest plans de falla presenten un cabussament de 102/72 SSW i unes estries amb una orientació de 45/276 (figura 15). Per altra banda en relació amb aquests, s'han mesurat en la mateixa zona dues orientacions de plans de fracturació 066/36 NW i 160/72 NE. Com s'ha dit en l'apartat de facetes triangulars aquests plans es troben a la base d'una de les facetes (figura 15), amb la mateixa orientació.

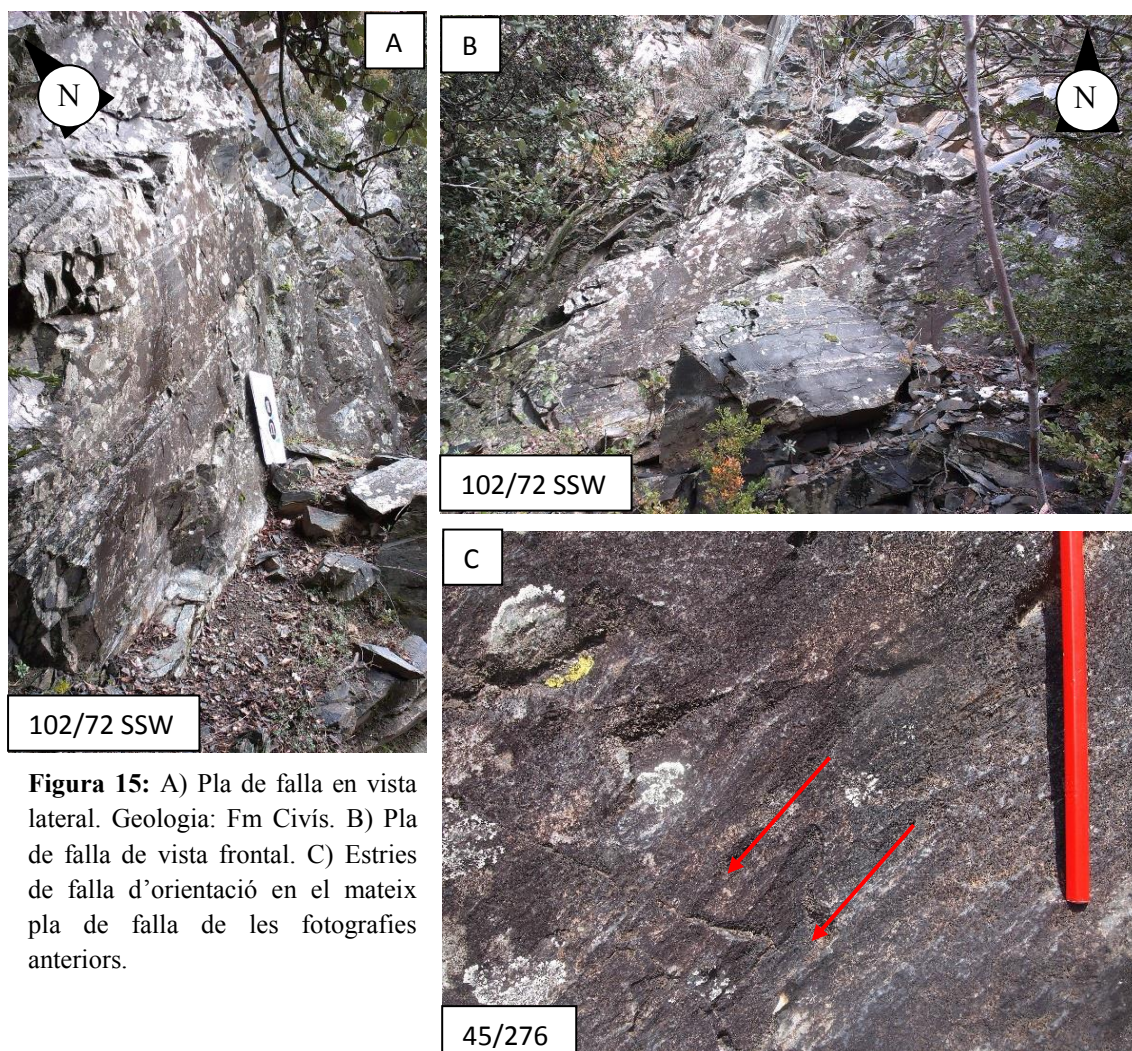


Figura 15: A) Pla de falla en vista lateral. Geologia: Fm Civís. B) Pla de falla de vista frontal. C) Estries de falla d'orientació en el mateix pla de falla de les fotografies anteriors.

6. Discussió

Aquest apartat s'ha dividit en tres parts. En el primer apartat es discuteix quins són el diferents anàlisi i paràmetres, que han permès raonar perquè la zona del nord amb facetes triangulars, podria tractar-se d'una zona amb falles neotectòniques, semblants a falles que afecten als Pirineus, com podrien ser: la falla de La Maladeta (Ortuño, 2008), la Cerdanya, El graben del Urgellet, etc. El segon apartat tracta l'evolució geomorfològica, com pot haver canviat la cubeta d'Andorra fins a l'actualitat, tenint en compte tant processos glacials com tectònics. Al tercer es fan diferents recomanacions, per a posterioritat millorar la detecció de possibles falles neotectòniques en zones amb gran afectació de processos glacials.

6.1. Possibles falles neotectòniques

Molts autors han estudiat la cubeta d'Andorra, donant-li un origen glacial, ja que durant el Würmià i el LGM aquesta estava completament o parcialment ocupada per la glacera. Autors com Turu, *et al* (2016) o Vilaplana, (1984) marquen un màxim nivell de 2000 metres durant el Würmià i de 1700 metres durant LGM, respectivament. Per tant, donen com a resultat que les facetes triangulars del nord de la cubeta (figura 14) són d'origen glacial i no pas tectònic. Però després dels diferents anàlisis, s'ha pogut observar que aquestes podrien no tenir un únic origen glacial. Segons el que s'ha obtingut les facetes triangulars presenten un origen tectònic, ja que en aquestes s'han trobat uns plans de falla i estries (figura 15), a més el riu Valira d'Orient presenta un salt en la seva topografia (figura 10) alineat amb aquestes facetes i alhora la morrena lateral de Engolasters també presenta un salt deixant la part del nord de la morrena més alta que la sud (figura 12), per tant aquesta zona presenta una falla. Amb aquestes observacions és fa de difícil decisió, dir si es tracta o no d'una falla neotectònica, ja que els únics dipòsits quaternaris afectats són les morrenes, però en l'actualitat aquestes no presenten cap tipus d'escarpaments, per tant la morrena s'hauria emplaçat sobre la falla acomodant-se a aquesta forma d'esglaó. Tot i ser d'origen tectònic les facetes, aquestes no mostren cap indicatiu de ser neotectònics, segurament aquestes van ser refrescades i mantingudes per la glacera, permetent observar-les en l'actualitat.

Si ens centrem en la falla situada a menor alçada (figura 16), aquesta presenta dues característiques que serien el salt topogràfic del riu Valira d'Orient aigües avall (figura 10) i el salt de la morrena (figura 12). Amb aquestes és dubtós traçar la lineació d'una falla, però els treballs de Turu, *et al.* (2006) i Turu, *et al.* (2005), descriuen la localització d'una falla direccional destra en el Prat del Roure mitjançant diversos sondatges, per a la realització d'una ampliació de Caldea (figura 16) (espai de fonts termals sulfuroses naturals a 70 °C), juntament amb una sèrie de fractures, afectant al basament i al material de reompliment de la cubeta (figura 2). Els mateixos autors relacionen aquesta falla amb la situada al sud oest al Roc d'Enclar (annex figura 1), també destra Hartevelt, (1970). Segons el resultat obtinguts la falla seria normal, però tenint en compte els autors anteriors, segurament es tractaria d'una falla amb moviment mixta, la qual possiblement seria neotectònica degut a que aquesta afecta tant a materials del basament com del reompliment.

Per tant, si es considera que la falla inferior situada al Prat del Roure afecta a materials de reompliment i aquesta té la mateixa direcció que la falla de les facetes triangulars, aquest fet presentaria com a possibilitat que aquestes falles fossin neotectòniques. Per altra banda, aquestes podrien estar relacionades amb les falles del riu Madriu, Hartevelt, (1970) que presenten una direcció similar (annex: figura: 1).

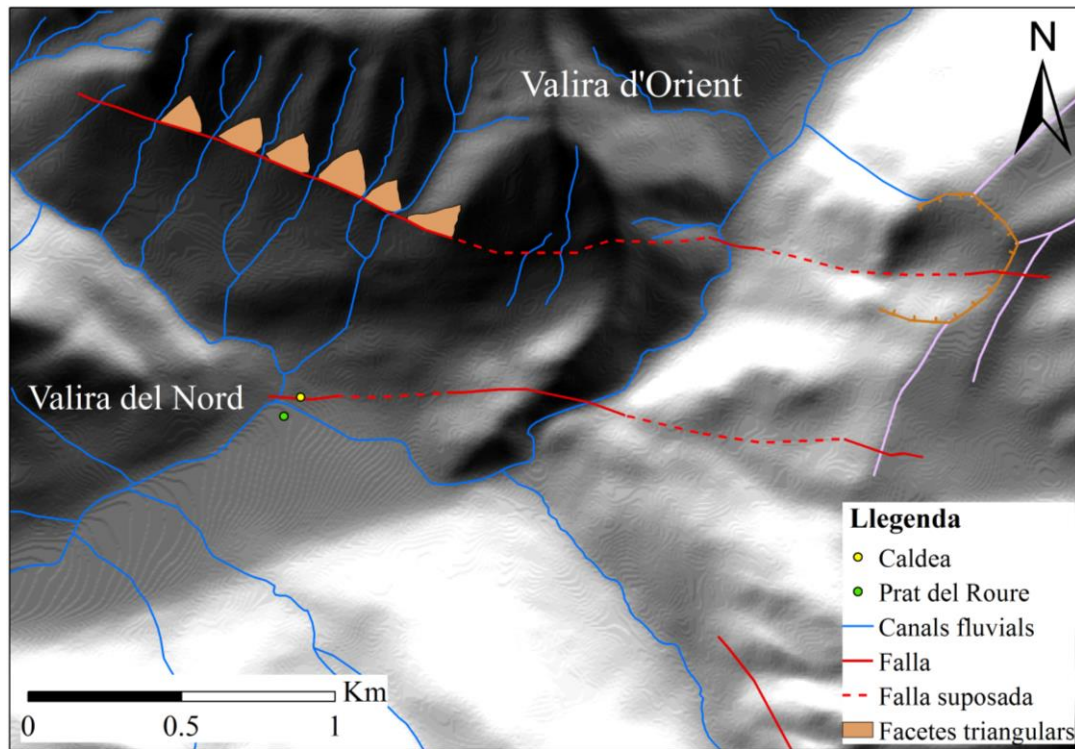


Figura 16. Cartografia de les falles possiblement neotectòniques al nord de la cubeta d'Andorra i les localitzacions de Caldea i Prat del Roure.

6.2. Evolució de la cubeta d'Andorra: glacialisme i tectònica

Com s'ha dit anteriorment la cubeta d'Andorra s'explica a través d'origen glacial, però havent realitzat tots aquests nous anàlisi, es pot dir que ha estat afectada per processos glacials i també tectònics. La cubeta presenta un gran conjunt d'elements glacials, com es pot observar en el mapa de l'annex: figura 1, però les dues falles detectades podrien donar una millor explicació de la forma de la cubeta, donat que aquesta vall glacial és molt ampla comparant-la amb les valls del voltant, igualment glacials.

Autors com Turu, *et al* (2016) defineixen aquesta gran amplitud de la vall, per mitjà de la sobreexcavació, a causa del gran volum de gel, provinent de les dues valls del Valira i de la vall del riu Madriu. Però si es té en compte les falles detectades en aquest estudi, aquestes podrien haver estat actives abans i durant el glacialisme, provocant uns majors pendents i fent que el gran volum de gel provinent del Valira d'Orient sobreexcava la vall principal (figura 17), a la vegada que erosionaria els plans de falla. Aquests quedarien mínimament protegits en zones on els afectés mínimament la glacera. El perfil final que obtindríem seria una zona amb un gran pendent, on els plans de falla no serien observables i la zona de la vall estaria reomplerta per material quaternari.

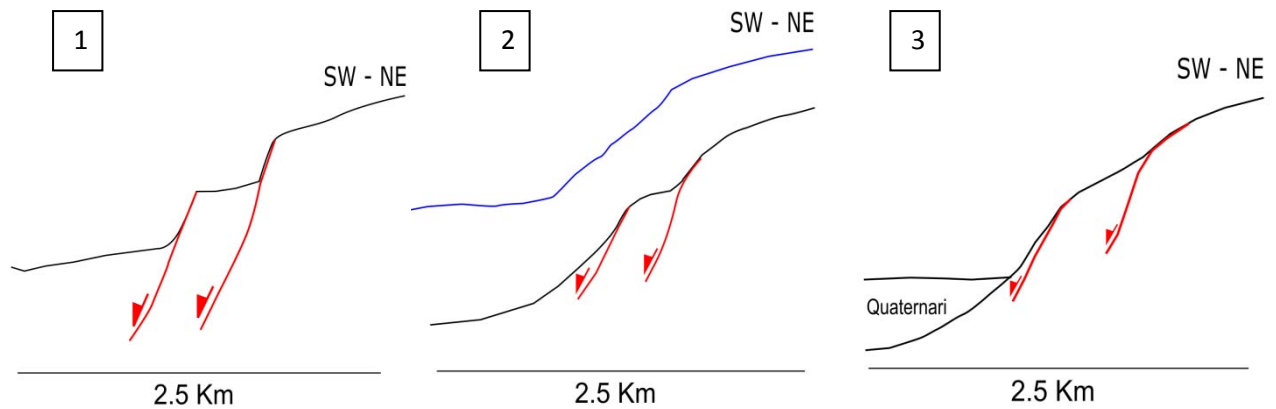


Figura 17. Esquema de les tres etapes, on la vall d'Andorra hauria patit la sobreexcavació i els plans de falla s'haurien erosionat, fent que en l'actualitat no fossin observables.

6.3. Recomanacions posteriors

En aquest treball s'han realitzat una sèrie de metodologies per arribar a obtenir un resultat, però per estudis posteriors es dona les següents recomanacions. Els estudis posteriors tindrien que centrar-se principalment a la zona del Prat del Roure, realitzant sondejos o qualsevol tipus d'estudi que permeti observar quina és l'afectació dels materials envers a les fractures i les possibles falles. Per altra banda, es tindrien que centrar en el salt topogràfic que presenta la morrena, per arribar a saber si aquest dipòsit està afectat. La datació de les estries falla seria un punt important per saber si són neotectòniques o han estat refrescades per la glacera. Per últim la utilització d'un lidar aeri seria de gran ajuda, ja que el model digital de 15 metres utilitzat és insuficient per dur a terme un estudi acurat.

7. Conclusions

Un cop realitzat aquest treball s'ha arribat a una sèrie de conclusions. En zones on els processos glacials hi han estat molt actius, la detecció d'elements geomorfològics que mostrin la possible existència d'una falla o altres estructures geològiques, és bastant difícil, si s'afegeix que la zona d'estudi conté un alt nivell de població, l'anàlisi topogràfic amb el model digital serà una eina molt útil, juntament amb el treball de camp i la fotointerpretació, que permetrà la detecció de nous indicis de la possible traça d'una falla.

La cubeta d'Andorra presenta dues falles que no havien estat cartografiades per cap científic, les quals guardarien una relació amb les falles de la Vall del Madriu i les surgències hidrotermals que podem trobar a la població d'Escaldes.

Les facetes triangulars serien d'origen tectònic pel fet que s'han observat plans i estries de falla, per tant aquestes no serien glacials, simplement la glacera les hauria refrescat i són observables en l'actualitat.

Les falles podrien ser neotectòniques, ja que hi ha un estudi de sondejos que mostra que els materials sedimentaris de reompliment de la conca i el basament estan afectats per fractures i falles.

Per últim, la cubeta d'Andorra no tindria un origen totalment glacial, sinó que en el procés de formació de la cubeta, les falles cartografiades haurien estat part de l'equació que hauria permès la formació d'aquesta vall tant ampla i sobreexcavada.

8. Agraïments

Estic agraït principalment als meus tutors: Maria Ortuño Candela (Universitat de Barcelona) i Ramon Copons Llorens (IEA-CENMA), ja que gràcies al seus diversos coneixements en neotectònica i geomorfologia glacial m'han permès poder realitzar aquest treball amb el màxim rendiment possible, a part d'acompanyar-me al camp i ajudar-me en qualsevol detall. També agrair, a Sara Pijuan Gordo i al departament de Cartografia del Govern andorrà per cedir-me les fotografies aèries de gran resolució i el seu model digital.

9. Bibliografia

- Bladé, J.F., (1985). *Études géographiques sur la vallée d'Andorre*. Universelle Paris, 97 pp.
- Bordonau, J., (1985). *Estudi geomorfològic del sector sudoccidental de la Vall d'Aran: l'evolució quaternària de les valls dels rius Jòu i Nere*, tesis de Llicenciatura no publicada. Universitat de Barcelona, 141 pp.
- Briaïs, A., Armijo, R., Winter, T., Tapponnier, O., Herbeck, A., (1990). Morphological evidence for Quaternary normal faulting and seismic hazard in the Eastern Pyrenees. *Annales Tectonicae*, IV (nº1), 19 - 42 pp.
- Burbank, D., Anderson, R.S., (2001). *Tectonic geomorphology*. Ed. Blackwell Science, 274 pp.
- Cocherie, A., Baudin, T., Autran, A., Guerrot, C., Fanning, C. M., Laumonier, B. (2005). U – Pb zircon (ID-TIMS and SHRIMP) evidence for the early Ordovician intrusion of metagranites in the late Proterozoic Canaveilles Group of the Pyrenees and the Montagne Noire (France). *Bulletin de la Société géologique de France*, 176, 269 – 282 pp.
- Casas, J.M., Castiñeiras, P., Navidad, M., Liesa, M., Carreras, J., (2010) New insights into the late Ordovician magmatism in the Eastern Pyrenees: U – Pb SHRIMP zircon data from the Canigó massif. *Gondwana Research*, 17, 317 – 324 pp.
- Durrocher (1843). *Sur les traces de phénomènes diluviens qui s'observent dans les Pyrenees*, C.R. Acad. Sc, t.XIII, 92 pp
- Gil – Peña, I., Barnolas, A., Villas, E., Sanz – López, J., (2004). El Ordovícico Superior de la Zona Axial. *Geología de España*, 247 – 249 pp.
- González, M., (2010). *Evaluación del riesgo sísmica en el Principado de Andorra*. Tesis doctoral. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya, 288 pp
- Hartvelt, J.J.A, (1970). *Geology of the Upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrenees, Andorra, Spain*. Leidse geologische mededelingen, Geological Institute, Leiden University, 45, 167 – 236 pp.
- Llopis, N., (1966 – 1967). *Mapa geològic d'Andorra: Baix Valira*. Escala 1: 25000. Real Acadèmia de las Ciencias y Artes de Barcelona. Mapa geològic de Andorra, 6.
- Lynn, G.J., (2005). *Macrogeomorphology and erosional history of the postorogènic Pyrenean mountain belt*. Tesis doctoral. University of Edinburgh, 388 pp

- Macau, A., (2008). Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. Tesis doctoral. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya, 344 pp.
- Machette, M.N., (2000). Active, capable and potentially active faults – a paleoseismic perspective. *Journal of Geodynamics*, 29, 387 – 292 pp.
- Margalef, A., (2015). Estudi estructural i estratigràfic del sud d'Andorra. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona, 223 pp.
- Muñoz, J.A., (1992). Estructura alpina i herciniana a la vora sud de la zona axial del Pirineu Oriental. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Servei Geològic de Catalunya. Barcelona. 227 pp.
- Nussbaum, F. (1934). Die seen der PY renden, *Mitt. Nat. Ges.*, Berna, (Traducció al catalan de Solé, L.: Els llacs dels Pirineus segons Nussbaum, *Butlletí de la I.C.H.N.*, Volum XXXVI, II^o trimestre, 107 – 115, Barcelona 1936), 184 pp.
- Ortuño, M., (2008). Deformación activa en el Pirineu Central: La falla del Norte de La Maladeta y otra fallas activas. Tesis doctoral. Grup de recerca en Riscos Naturals – RISK NAT – Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona, 361 pp.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Carcaillet, J., Ortuño, M., Bordonau, J., Bourlès, D., Vilapla, J.M., Masana, E., Santanach, P., (2006). Late pleistocene and Holocene glaciation in the Pyrenees: a critical review and new evidence from ¹⁰Be exposure gas, south – central Pyrenees. *Quat. Sci. Rev.* 25, 2937 – 2963 pp.
- Poblet, J., (1991). Estructura herciniana i alpina del vessant sud de la zona axial del Pirineu central. Ph.D. thesis, Departament de Geologia, Universitat de Barcelona, 603 pp.
- Teixell, A., (1996). The Ansó transect of the Southern Pyrenees. Basement and cover thrust geometries. *Journal of the Geological Society*, 153, 301 – 310 pp.
- Teixidó, T., Palomaras, I., Valls, P., Martínez, P. (2003). Prospecció sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella i Escaldes – Engordany, *Hortizó*, 4, 3 – 25 pp.
- Turu, V., Planas, X., (2005). Inestabilidad de vertientes en los valles del Valira. Datos y dataciones para el establecimiento de una cronologia, posibles causas. Andorra y Alt Urgell (Pirineus Orientals). VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia, Abstracts, 14 pp.
- Turu, V., Peña, J.L., (2006). Las terrazas fluviales del sistema Segre – Valira (Andorra - La Seu d'Urgell – Organyà, Pirineus Orientals): relación con el glaciario y la tectónica activa. In A. Pérez – Alberti, J. López – Bedoya (eds.), geomorfología y territorio: Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología. Universidad de Santiago de Compostela, 171, 101 – 112 pp.
- Turu, V., Calvet, M., Bordonau, J., Gunnell, Y., Delmas, M., Vilaplana, J.M., Jalut, G., (2016) Did Pyrenean glaciers dance to the beat of global climatic events? Evidence from the Würmian sequence stratigraphy of an ice-dammed palaeolake depocentre in Andorra. Hughes, P.D., Woodward, J.C., (eds). *Quaternary Glaciation in the Mediterranean Mountains*. Geological Society, London, Special Publications, 433 pp.
- Vilaplana, J.M., (1984). Estudi del glacialisme de les valls de la Valira, d'Ordino i d'Arinsal (Andorra). Tesina. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, 84 pp.
- Vilaplana, J.M., Serrat, D., Bordonau, J., (1986). Formaciones sedimentarias cuaternarias de origen glaciar en el Pirineo: Tills, sedimento glaciolacustre y glacioluviales. In: Anadón, O., Cabrera, L. (Eds). *Guía de las excursiones: XI Congreso español de sedimentología*, Barcelona. 1.19 – 1.21.

10. Annex:

Figura 1. Mapa geomorfològic de la cubeta d'Andorra. Escala 1:25000

Figura 2. Mapa geològic de la cubeta d'Andorra i Encamp. Escala 1:25000

Figura 3. Mapa geològic de la cubeta d'Andorra i Encamp. Escala 1:25000

Figura 4. Localització i perfils topogràfics de la cubeta d'Andorra.

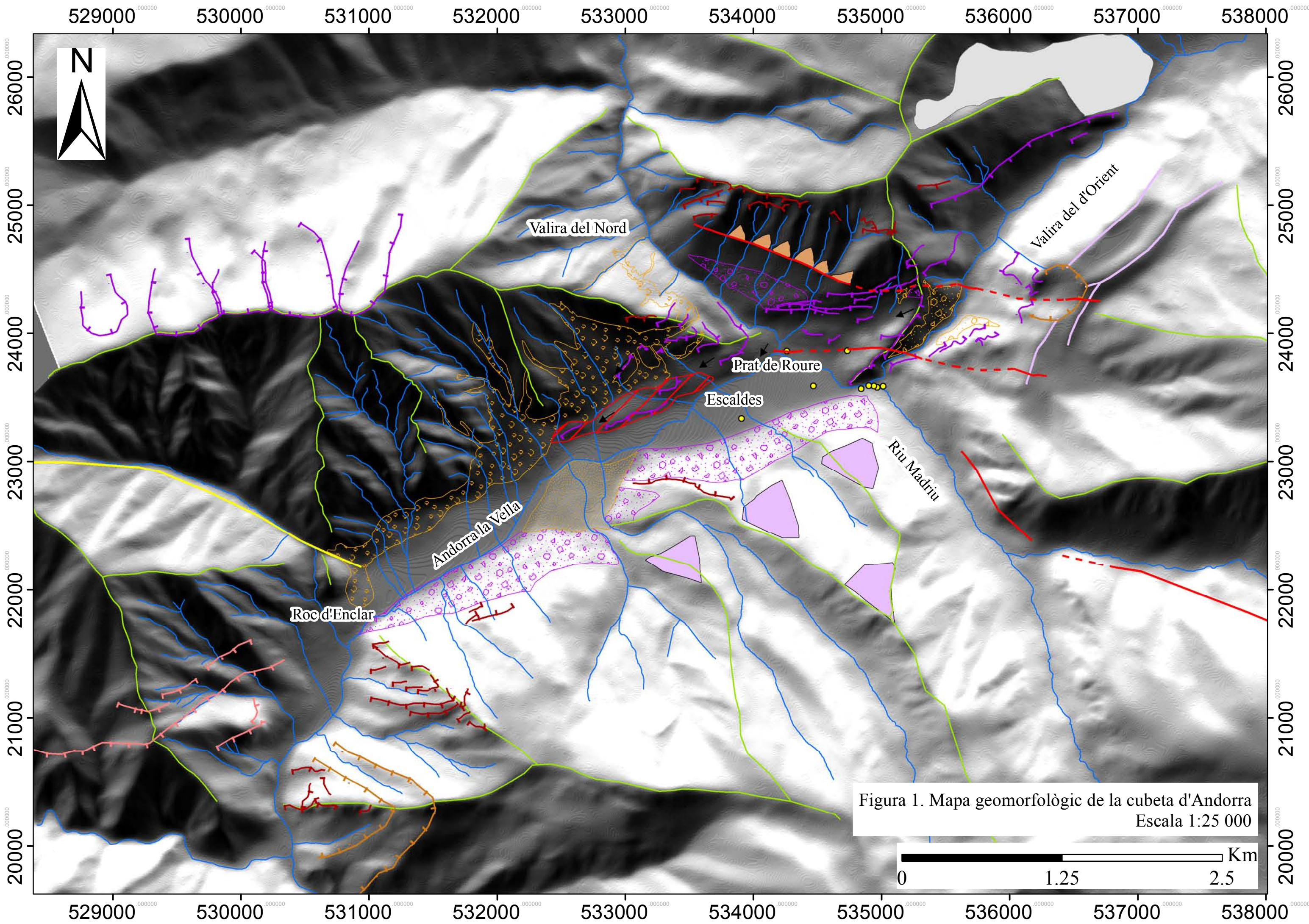



Figura 1. Mapa geomorfològic de la cubeta d'Andorra
Escala 1:25 000

Llegenda

Falles:

 Falla direccional

Falles possiblement neotectòniques:

 Falla suposada

 Falla


Elements neotectònics

 Facetes triangulars

Elements no glacials:

 Carenes

 Escarpament no diferenciat

 Escarpament per erosió diferencial

 Escarpament de falla

 Canals fluvials

 Punts hidrotermals

Dipòsits

 Dipòsit esllavissat

 Ventall al·luvial


 Tarteres


 Esllavissades

Elements glacials:

 Facetes glacials

 Ombreira glacial

 Escarpament glacial

 Direcció estries glacials

 Carena de la morrena

Dipòsits glacials

 Dipòsit glacial

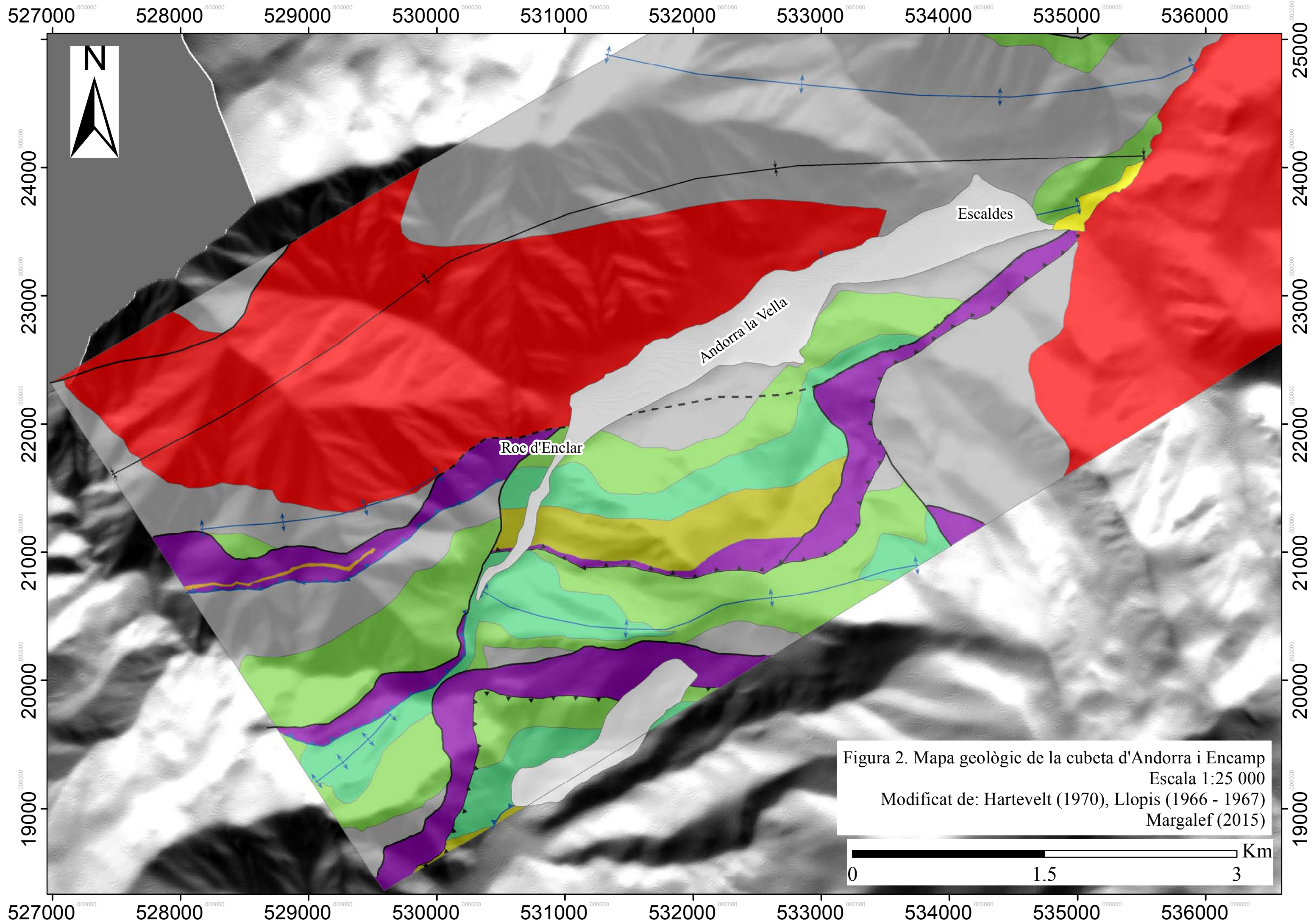
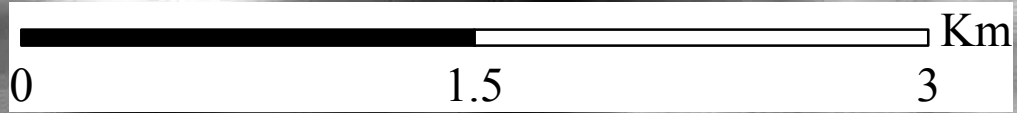
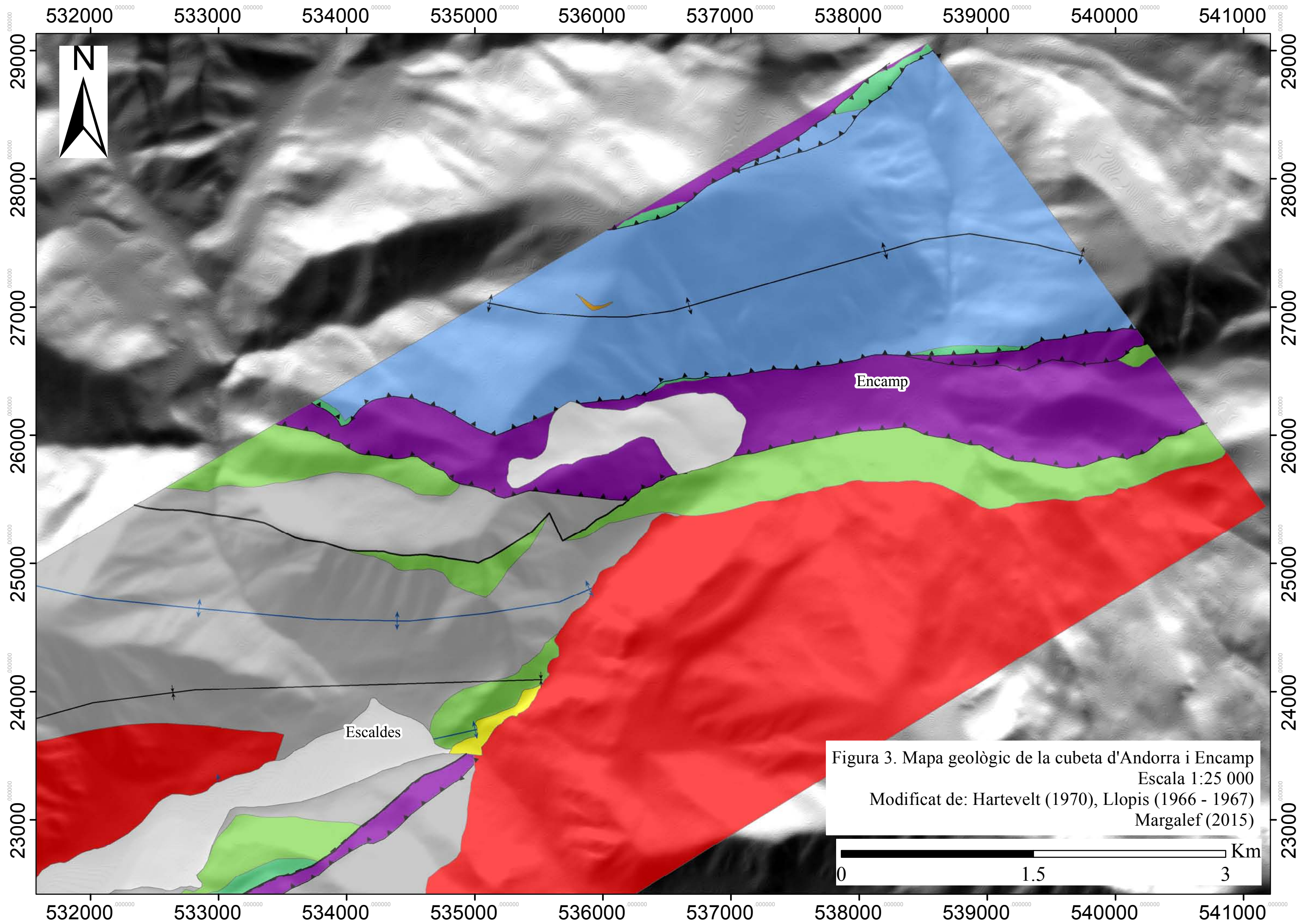


Figura 2. Mapa geològic de la cubeta d'Andorra i Encamp
Escala 1:25 000
Modificat de: Hartevelt (1970), Llopis (1966 - 1967)
Margalef (2015)





Llegenda

	Quaternari
	Roques volcàniques
	Granodiorita
	Quarsita
	Fm Civís
	Fm Castanesa
	Fm Manyanet
	Fm Rueda
	Silurià
	Fm Jujols

Edats geològiques

Quaternari
-
Permià - Carbonífer
-
Devonià
Devonià
Devonià
Devonià
Silurià
Cambro - Ordovicà

Estructures geològiques

- - -	Falla normal de Hartvelt
* * * *	Sinclinal
—	Falla normal
▲ — ▲	Encavalcament
▲ — ▲	Encavalcament
↑ ↑ ↑ ↑	Anticlinal
↑ ↑ ↑ ↑	Anticlinal

Figura 4. Localització i perfils topogràfics de la cubeta d'Andorra.

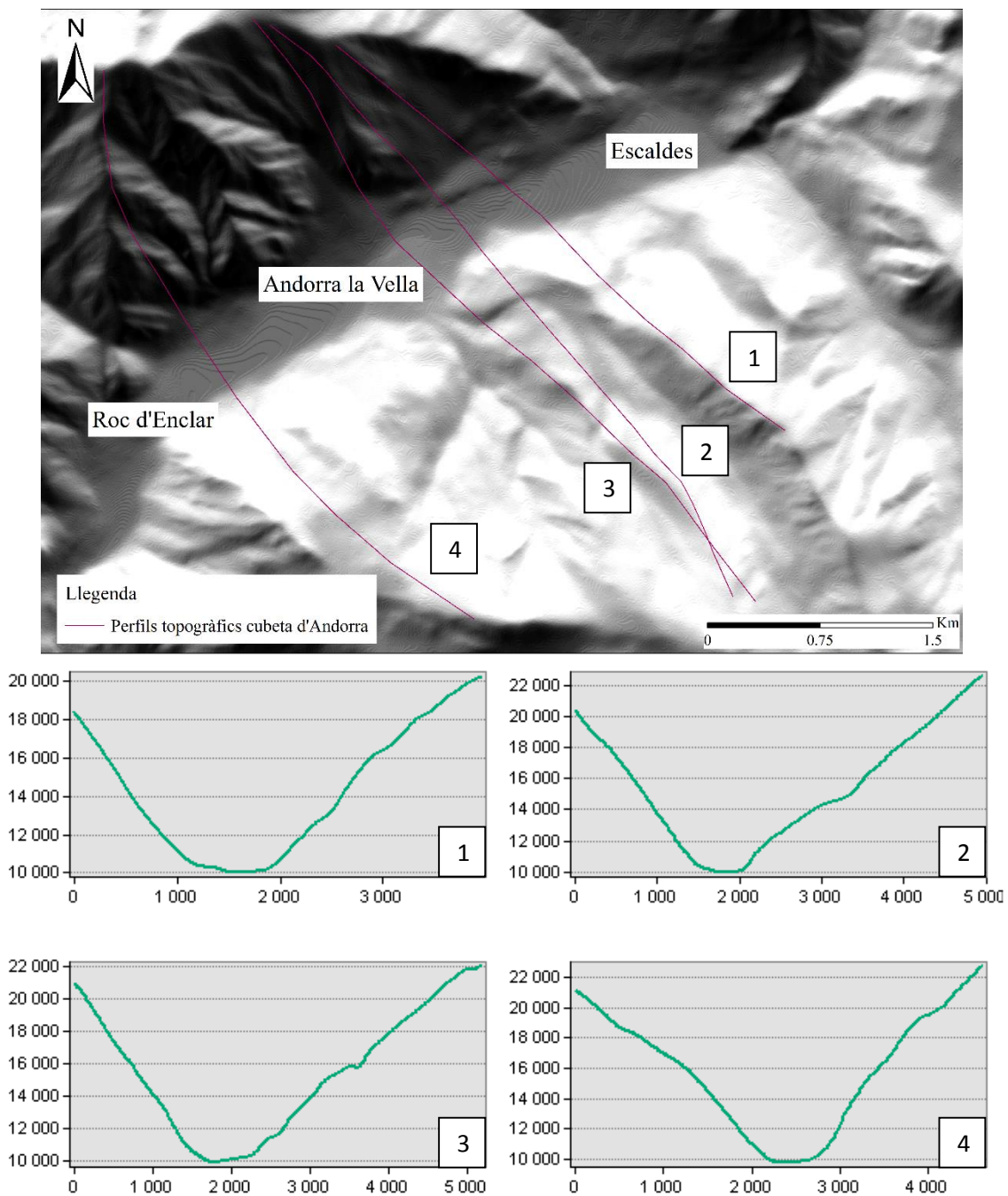


Figura 4. Perfils topogràfics de la cubeta d'Andorra on es poden veure que el vessant est té una topografia diferent i pot arribar a forma facetes a causa dels processos glacials. Aquestes com ja s'ha dit en el treball són formades per la glacera com a conseqüència de la variació litològica que pateix el vessant en comparació amb l'altre que esta format completament per Granodiorita.