



Programme opérationnel Interreg IVA
France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo
Système d'Information Sismique des Pyrénées
Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

Microzonació sísmica de nivell avançat a la Val d'Aran.



IGC
Institut Geològic
de Catalunya



Géosciences pour une Terre durable

brgm



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

Instituto
Geográfico Nacional



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Main contributor: Institut Geològic de Catalunya

2013-03-14

Índex

1	Resum executiu	2
2	El projecte SISPYR	4
3	Zona d'estudi	6
3.1	Marc geogràfic de l'àrea de la Val d'Aran	6
3.2	Marc geològic	7
3.3	Perillositat sísmica de la zona d'estudi	9
4	Caracterització geofísica del subsòl	10
4.1	Treball de camp, processat i resultats (Vielha)	10
5	Càlcul de la resposta del sòl (simulació numèrica)	15
5.1	Classificació sòls EC8	15
5.2	Modelització de la resposta sísmica del sòl (ProShake 1D)	15
5.3	Funció de transferència del sòl	18
5.4	Espectre de resposta en termes d'acceleració (SA)	20
5.5	Microzonació sísmica en termes de ΔI	23
6	Conclusions	27
7	Referències	29

1 Resum executiu

El treball que es presenta s'ha dut a terme a la Unitat de Tècniques Geofísiques de l'IGC com a suport al projecte SISPYR (Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus). El projecte SISPYR està finançat per un programa europeu Interreg IV-A 2007-2013 entre França-Espanya-Andorra. Hi participen l'IGC (liderant el projecte), l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) i el BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) de França, l'IGN (Instituto Geográfico Nacional) i l'UPC (Unitat Politècnica de Catalunya).

Un dels objectius del projecte és l'avaluació del risc sísmic a la zona Pirinenca; a aquest efecte, s'ha plantejat una avaluació de la perillositat sísmica a escala local en dues zones pilot: la Val d'Aran i la ciutat de Girona (GA-009/12). L'objectiu és analitzar l'amplificació del moviment sísmic quan les ones es propaguen per sòls compostats per materials tous i/o poc consolidats.

Es presenta l'estudi dut a terme per a la microzonació sísmica de nivell avançat a introduït per Macau (2008) quatre localitats de la Val d'Aran. La metodologia utilitzada ha consistit en la combinació de tècniques experimentals i de simulació numèrica.

Les tècniques geofísiques basades en el registre de soroll sísmic ambiental en llocs puntuals i en arrays, junt amb el coneixement previ de la geologia de les poblacions estudiades han permès fer una microzonació en funció de la freqüència fonamental del sòl, estimar la fondària del basament rocós i obtenir models de velocitat de propagació d'ones de cisalla en diferents tipus de sediments. Aquests models de velocitat s'han utilitzat per a definir columnes de sòl representatives i modelitzar la seva resposta sísmica.

El principal resultat d'aquest estudi és el mapa de microzonació sísmica en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica que s'aplica a la intensitat en roca per a tenir en compte l'amplificació del moviment sísmic per efecte de sòl. També s'ha fet una classificació dels tipus de sòl dels emplaçaments estudiats a la Val d'Aran en funció de l'Eurocodi EC8. A la major part d'aquests emplaçaments els sòls tenen classe B.

Són autors d'aquest informe Albert Macau, Sara Figueras, Andreu Martí, Beatriz Benjumea i Anna Gabàs. Per a la realització dels treballs de camp s'ha comptat amb la col·laboració de Fabian Bellmunt, Carolina Meneses, Víctor Schmidt, Tànit Frontera i Yolanda Colom.

2 El projecte SISPYR

El projecte SISPYR (Sistema d' Informació Sísmica dels Pirineus) forma part del programa europeu Interreg IVA 2007-2013 França-Espanya-Andorra. Està liderat per l'IGC (Institut Geològic de Catalunya) amb la participació de l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées), el BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) de França, l'IGN (Instituto Geográfico Nacional) i l'UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) d'Espanya. El projecte sorgeix a partir de la necessitat de millorar la cobertura de la xarxa d'estacions sísmiques ubicada en els Pirineus i garantir l'homogeneïtat en la qualitat de la informació. L'objectiu dels treballs relacionats amb el temps real consisteix en optimitzar els mitjans científics per a la gestió de crisis sísmiques a la zona pirinenca i millorar la cobertura de les xarxes sísmiques. Un altre objectiu del projecte és la caracterització del risc sísmic a les poblacions situades a la cadena pirenaica de França, Espanya i Andorra. S'han escollit dues zones pilot per a realitzar-hi estudis de risc sísmic a escala de detall: la Val d'Aran i Girona.

El projecte es divideix en 7 accions:

Acció 0: Organització general del programa. Tenir en compte les accions necessàries per a una bona execució tècnica i administrativa del programa des de la fase de muntatge, passant per la fase de realització, fins a l'avaluació.

Acció 1: Millora de la xarxa d'observació sísmica dels Pirineus en temps real: actualització d'equips i de noves instal·lacions.

Acció 2: Intercanvi de dades entre els participants del projecte. Intercanvi de formes d'ona de les estacions sísmiques i acceleromètriques per a la detecció d'events en temps real i per al processat automàtic dels events detectats en temps quasi-real.

Acció 3: Coneixement del fenomen sísmic i desenvolupament metodològic. Estudi de la font sísmica i obtenció del tensor de moment sísmic de forma automàtica així com l'avaluació del risc sísmic i la llei d'atenuació sísmica que caracteritza la zona.

Acció 4: Prevenció del risc sísmic. El treball que es presenta es desenvolupa dins d'aquesta acció amb l'objectiu de complir un dels objectius principals del projecte que està relacionat amb la prevenció del risc sísmic. Tots els mapes obtinguts serviran per fer una comparació amb els efectes observats en sismes reals. S'han seleccionat dues zones pilot per a les quals es proposaran escenaris de danys a partir de l'avaluació de la perillositat local i la vulnerabilitat sísmica dels edificis existents, tenint en compte els coneixements adquirits en projectes anteriors (RISK-UE e ISARD).

Acció 5: Prevenció del risc – viabilitat d'un Sistema d'alerta ràpida EWS (Early Warning System). Amb aquesta acció es pretén millorar la gestió de la crisi analitzant la viabilitat d'un sistema d'alerta sísmica precoç basada en l'aprofitament de la xarxa de vigilància sísmica existent.

Acció 6: Utilització compartida i difusió de la informació referent al projecte.

3 Zona d'estudi

3.1 Marc geogràfic de l'àrea de la Val d'Aran

La Val d'Aran és una comarca situada als Pirineus Centrals (província de Lleida). Limita al nord amb França (departament de l'Alta Garona), al sud-oest amb la província de Huesca (Baixa Ribagorça), al sud amb la comarca de l'Alta Ribagorça i a l'est amb el Pallars Sobirà (figura 1). Té una superfície de 634 km², ocupant el 2% de Catalunya. Compta amb 10194 habitants i la seva capital és la localitat de Vielha. La microzonació sísmica s'ha dut a terme als municipis de Vielha e Mijaran, Bossòst, Les i als nuclis de Vaqueïra i Arties (situats al municipi de Naut Aran).

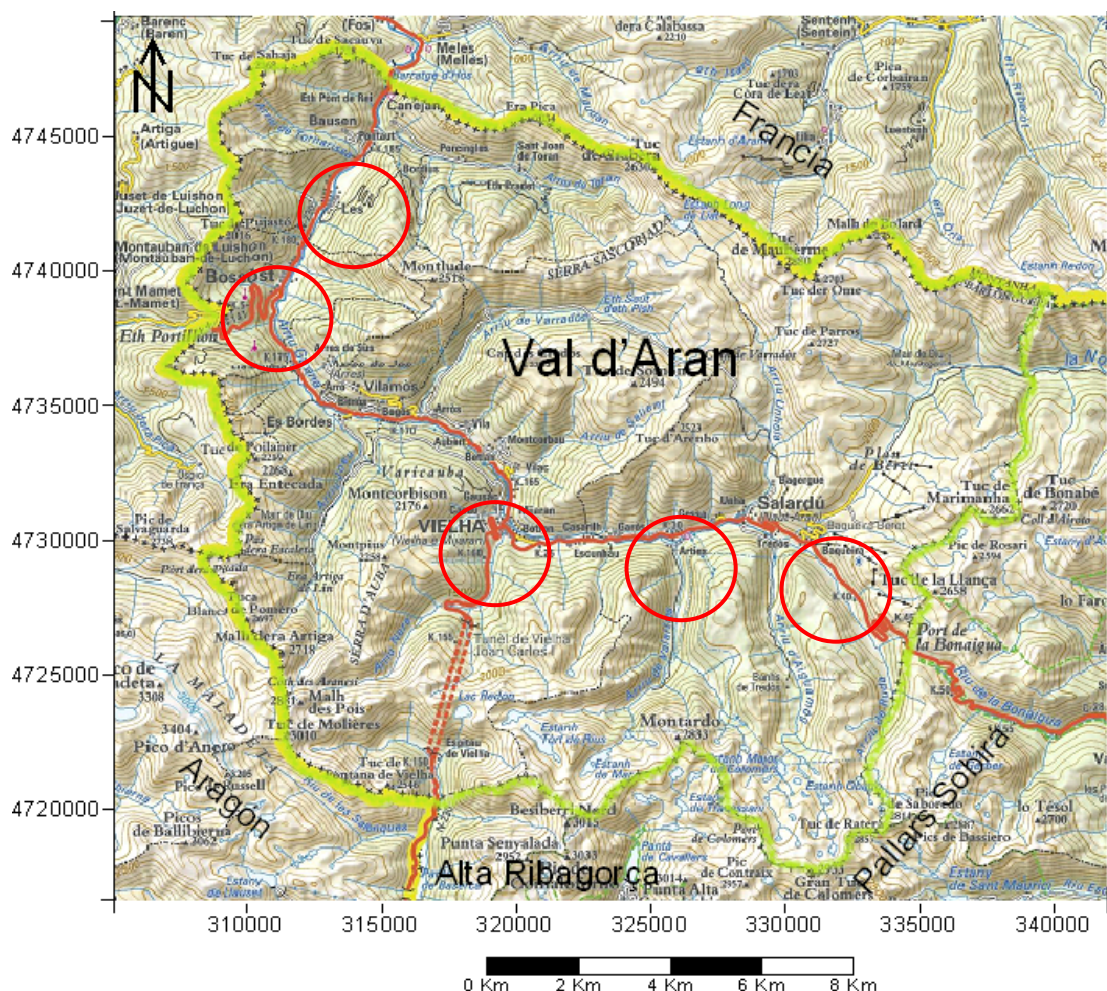


Figura 1: Localització (cercles vermells) dels municipis i nuclis de població de la Val d'Aran on s'ha caracteritzat el subsòl (ICC, 2010).

3.2 Marc geològic

El substrat rocós de la Val d'Aran forma part de l'eix central de la Serralada Pirinenca, i està constituït gairebé exclusivament per roques paleozoiques plegades durant l'orogènia herciniana, amb intrusions de roques plutòniques tardohercinianes, considerades com el sòcol pirinenc. La posterior orogènia alpina va provocar un rejuveniment dels materials, fent aflorar petits retalls de roques del permian, mentre que la distensió miopliocènica va permetre sedimentar roques lacustres abans del definitiu encaixament de la xarxa hidrogràfica actual (figura 2).

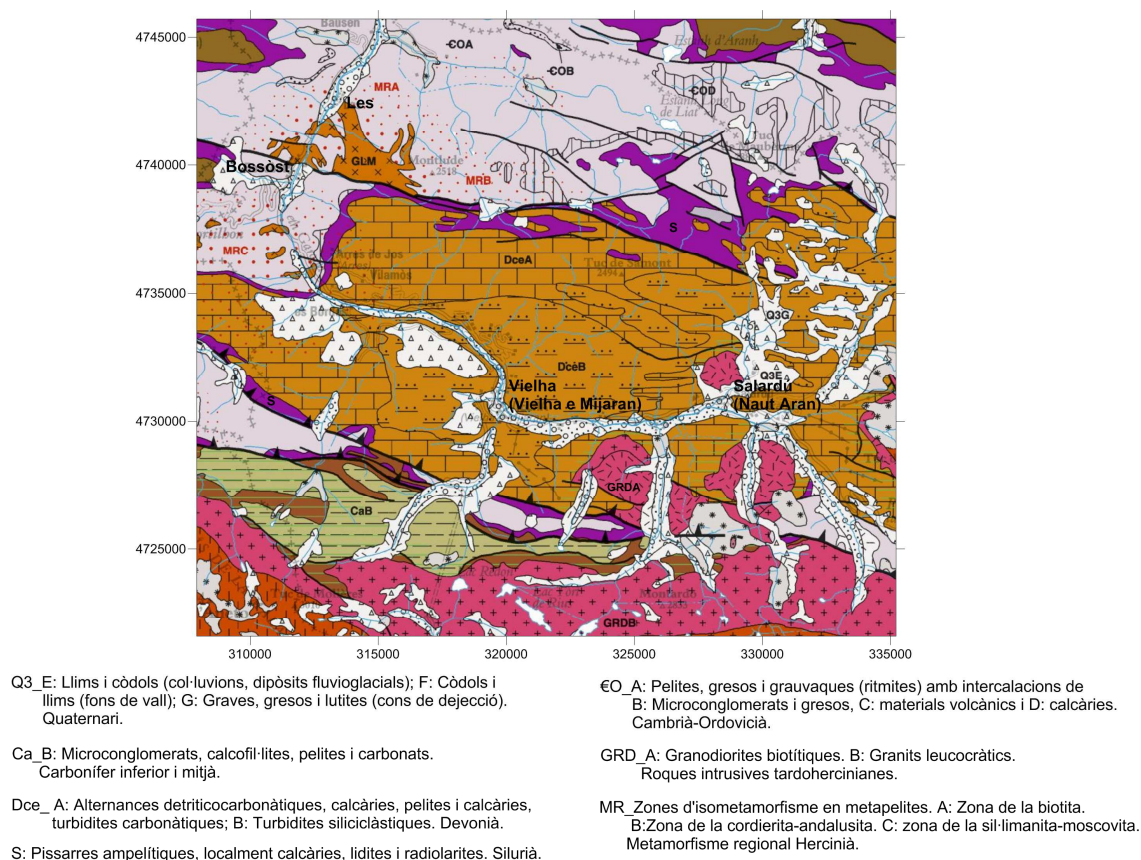


Figura 2: Mapa geològic de Catalunya 1:250.000. IGC, 2002.

A l'àmbit del Riu Garona, i en general, als fons de vall, afloren típicament les litologies més tardanes fruit dels processos de sedimentació del Cenozoic (Quaternari), i estan formades bàsicament per dipòsits fluvioglacials, col·luvions, llims i còdols, graves i gresos. En algunes valls transversals també es poden trobar blocs i argiles provinents de les morenes glacials.

Es creu que, l'última fase glacial fou la que originà un macromodelat més clar a la Val d'Aran. Durant el màxim glacial, de la darrera glaciació que va afectar els Pirineus, els

gruixos de glaç arribaren a prop dels mil metres a la zona de Les i Bossòst, i cobriren gran part del territori aranès. L'empremta d'aquestes glaceres es manifesta, principalment, a les zones de capçalera, amb la presència de centenars de cubetes lacustres que ocupen les sobreexcavacions subglacials quan desapareix el glaç. Si bé les cubetes de fons de circ són les més nombroses, hi ha també cubetes de fons de vall (figura 3). L'existència de cubetes de sobreexcavació a les valls glacials demostra que l'acció erosiva s'incrementa a les zones de màxima acumulació de glaç: en la confluència de diverses llengües glacials, al peu de les parets rocoses y en les zones on el flux glacial es frena degut, per exemple, a l'existència de ressalts rocosos formats per roques molt competents (Bordonau et al., 1989).

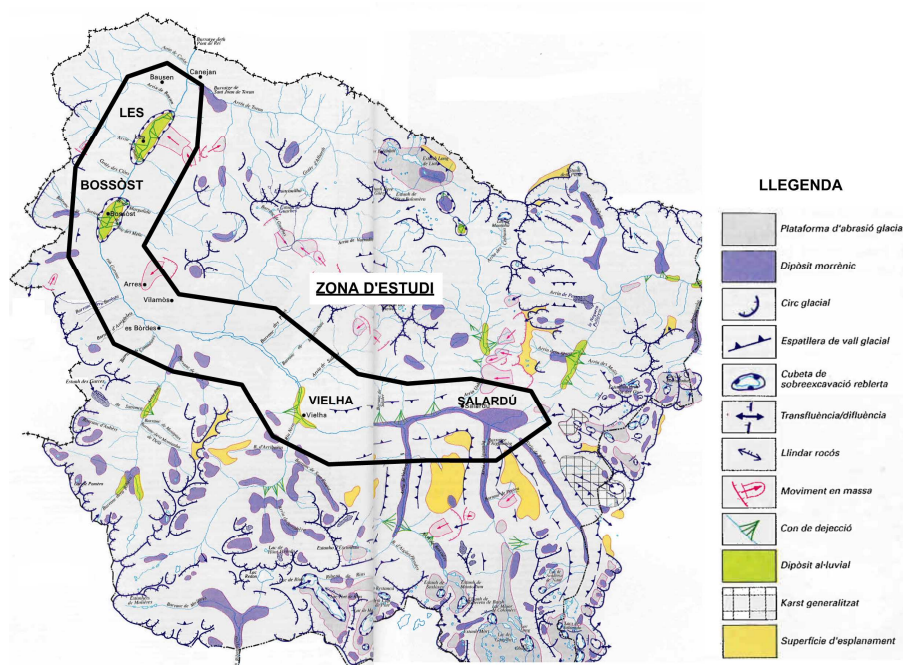


Figura 3. Mapa geomorfològic de la Val d'Aran. Atles comarcal de Catalunya - Val d'Aran, 1994.

Les cubetes de Bossòst i Les tenen un origen glacial, i actualment estan reblertes pels sediments transportats per la Garona, que els dona la morfologia plana que hom pot observar, i pels sediments fluviotorrencials (con de dejecció) situats a les zones de confluència de les valls tributaries amb la principal. La forma en U del perfil transversal de les valls araneses és conseqüència també de la presència glacial, i es va perdent cap a alçades inferiors, per la menor durada d'aquesta presència glacial (formes de V).

3.3 Perillositat sísmica de la zona d'estudi

En el projecte ISARD (Informació Sísmica Automàtica Regional de Danys, Interreg IIIA França – Espanya, 2004 – 2008) es van dur a terme estudis de perillositat sísmica a la zona pirinenca tenint en compte diferents escenaris deterministes i probabilistes. Com a resultat final es van obtenir mapes de perillositat en termes d'intensitats i d'acceleracions màximes en roca per un període de retorn de 475 anys i es van proposar espectres de resposta representatius que es van comparar amb els de la norma de construcció sismoresistent espanyola (NCSE02) i l'Eurocodi 8 (EC-8).

A la figura 4 es presenta el mapa de perillositat sísmica a escala regional per la regió de la Val d'Aran i Luchonnais en termes d'acceleracions màximes (Secanell et al., 2008). La sismicitat de la zona és moderada. Considerant un període de retorn de 475 anys, a la zona d'estudi se li assigna una acceleració màxima de 140-160 cm/s², aquesta es relaciona amb valors d'intensitat macrosísmica en roca de VII-VIII.

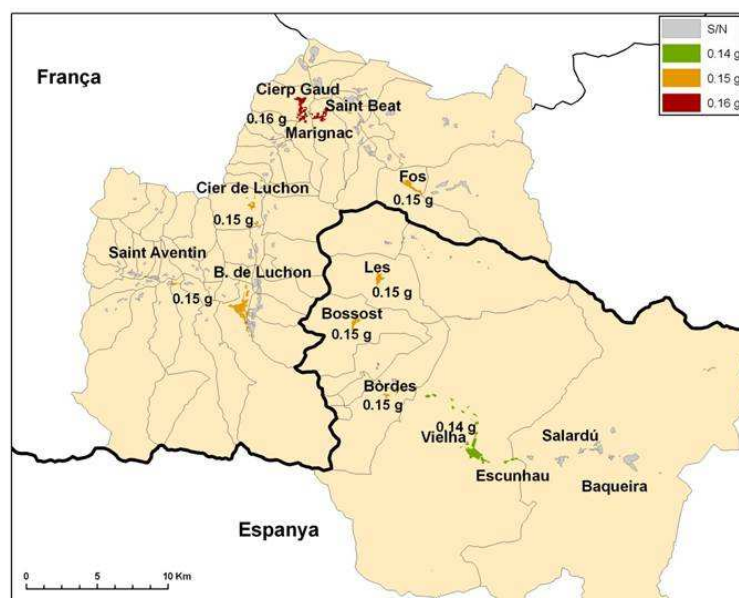


Figura 4. Mapa de la perillositat sísmica per Catalunya en termes d'acceleracions màximes (PGA) en roca per un període de retorn de 475 anys.

Els resultats d'aquest estudi de perillositat s'han tingut en compte a l'hora de buscar un registre de terratrèmol per a ser utilitzat com a registre d'entrada en roca en els estudis de simulació numèrica de la resposta sísmica del sòl, els quals es presenten a l'apartat 4.2 d'aquest informe. A Susagna i Goula, (2013) es presenta un informe del procés de selecció del registre en roca.

4 Caracterització geofísica del subsòl

El treball s'ha desenvolupat en dues etapes: una experimental que ha consistit en la caracterització geofísica del subsòl i una altra de simulació numèrica per calcular resposta sísmica del sòl utilitzant les dades obtingudes en els treballs de camp per a la definició de les columnes de sòl per on propagar el moviment sísmic.

4.1 Treball de camp, processat i resultats (Vielha)

El treball de camp ha consistit en l'aplicació de tècniques de sísmica passiva consistents en el registre de soroll sísmic ambiental en emplaçaments puntuals (mètode H/V) i en sensors distribuïts en geometria circular (tècnica d'array). A l'annex s'explica la teoria de cada un d'aquests mètodes, les tècniques de processat i es mostren els resultats obtinguts a cada zona d'estudi. Tot seguit s'exposen, a tall d'exemple, els resultats obtinguts amb cada tècnica a la localitat de Vielha.

4.1.1 Mètode del quocient espectral H/V de soroll sísmic

S'han fet mesures puntuals de soroll sísmic en uns 50 emplaçaments, el sistema d'adquisició està format per un sismòmetre triaxial Lennartz de 5s i un digitalitzador CityShark (LEAS). A la figura 5 es mostra una fotografia presa durant el registre puntual de soroll sísmic.



Figura 5: Fotografies de diferents emplaçaments on s'ha mesurat el soroll sísmic amb el mètode H/V.

El processat de les dades amb el programa Geopsy ha permès determinar la freqüència fonamental del sòl en tots els emplaçaments de mesura. A la figura 6 es mostren els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en el càlcul del quocient espectral H/V de les mesures de soroll sísmic realitzades en els emplaçaments de la població de Vielha. El valor mínim de la freqüència fonamental del sòl és de 2.8 Hz que correspon a un emplaçament situat al centre del nucli urbà de Vielha. Mentre que el valor màxim és de 9.0 Hz que correspon a un emplaçament ubicat a l'extrem nord de la zona. S'observa com els valors més baixos de la freqüència fonamental del sòl es troben al centre de la cubeta, on s'espera que el gruix de la capa de sediments sigui màxim. A mesura que ens anem apropant als vessants de la vall, la freqüència fonamental va augmentant fins que trobem emplaçaments sense pics significatius i, per tant, ubicats sobre roca (representats amb un cercle de color marró). Aquest patró no es segueix al nord de Vielha on s'observen emplaçaments amb valors elevats de la freqüència fonamental del sòl (>7 Hz) al centre de la vall. Aquesta disminució del recobriment respecte el centre de Vielha pot ser deguda a un procés de sobreexcavació durant l'erosió glacial al centre de la cubeta, a la intersecció entre les valls dels rius Negre i Garona.

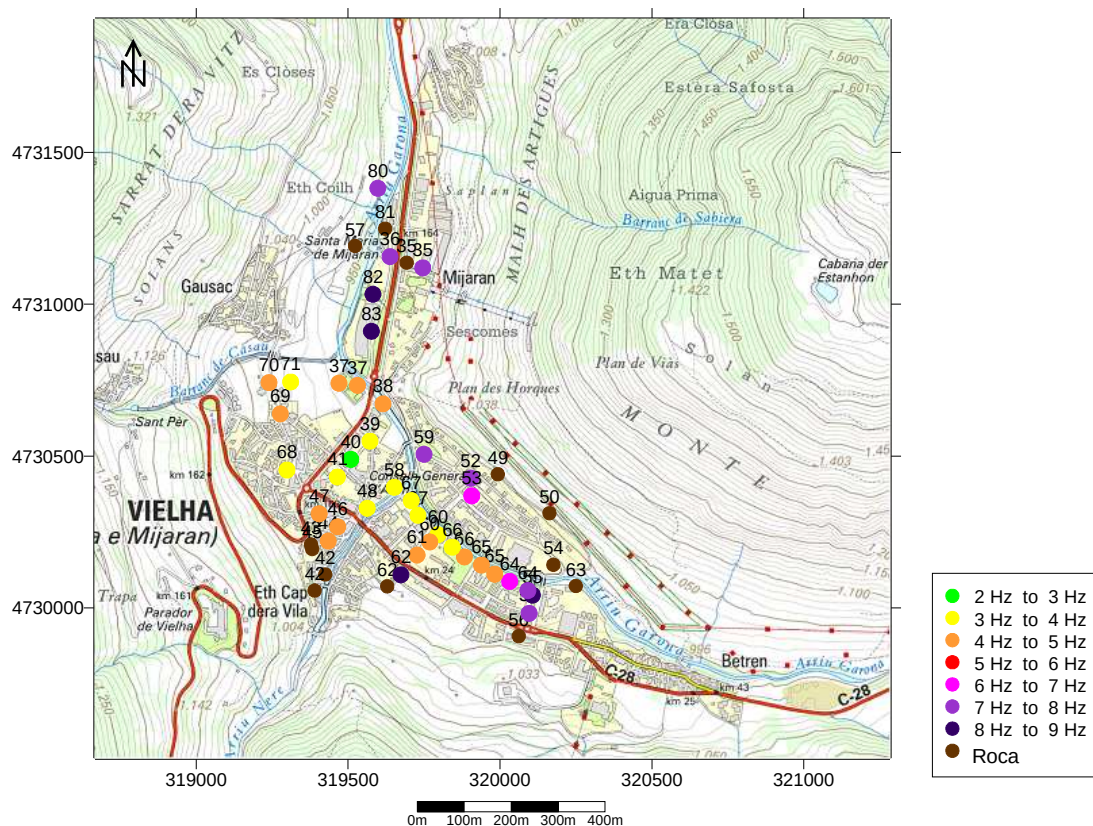


Figura 6: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts a la població de Vielha utilitzant el mètode H/V.

A partir dels valors de la freqüència fonamental del sòl calculats, junt amb els mapes geològics i les observacions sobre el terreny dels afloraments rocosos, s'ha fet un mapa de contorn de la freqüència fonamental del sòl per a la població de Vielha (figura 7), de manera que es poden veure representades les corbes de nivell de la freqüència i delimitar zones semblants que podran ser útils de cara a la microzonació final. Per generar aquest mapa, s'han utilitzat condicions de contorn que permetin representar el relleu real de la topografia local. Els emplaçaments amb el valor de la freqüència fonamental superior a 10 Hz s'han considerat roca.

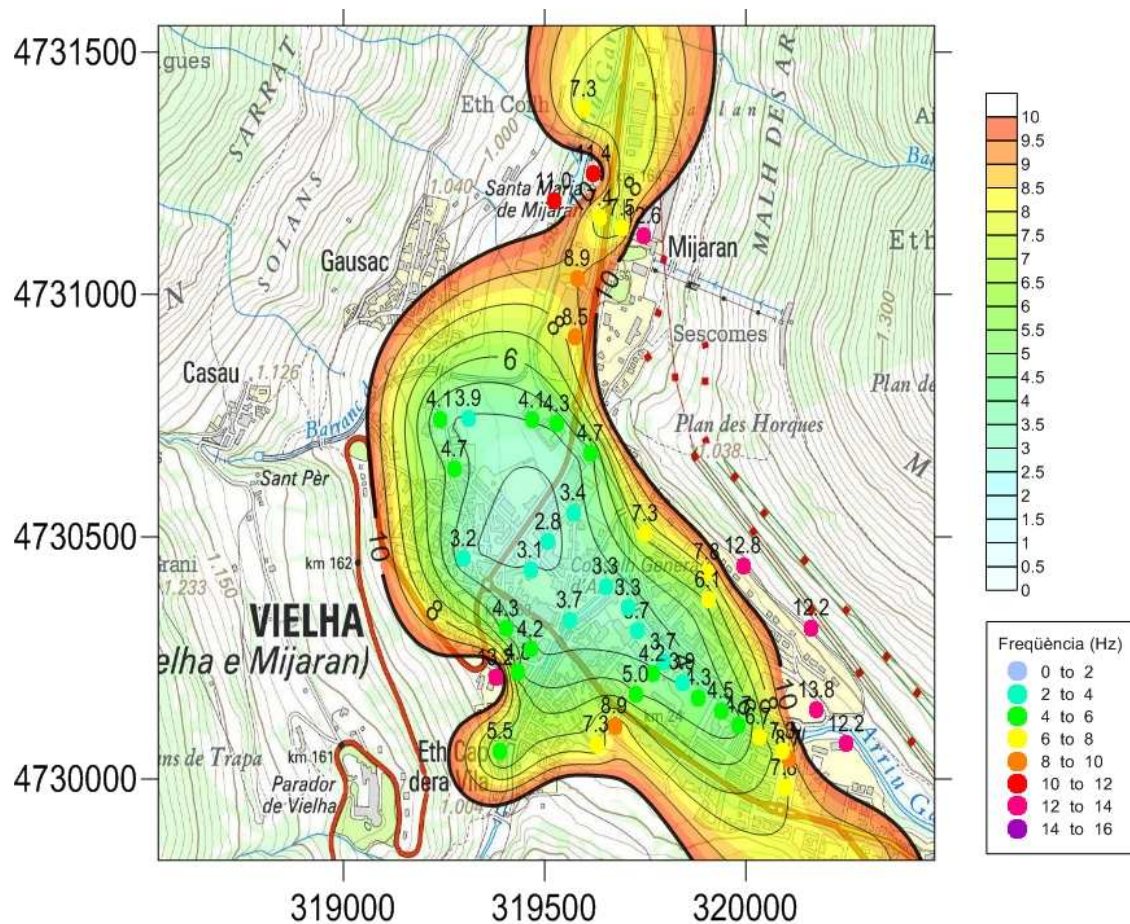


Figura 7: Mapa de la població de Vielha amb la interpolació de la freqüència fonamental del sòl.

4.1.2 Mètode de l'array sísmic

A la població de Vielha s'han realitzat mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array en 2 emplaçaments. A l'annex es mostren les coordenades UTM del centre d'aquests emplaçaments junt amb el radi d'obertura màxim de cada array. Les mesures de soroll

sísmic s'han realitzat amb un equip format per 11 sensors Mark L4C 1Hz i un digitalitzador Summit de 48 canals (DMT).

El processat de les dades i la inversió amb el programa Geopsy ha permès obtenir el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) de tots els emplaçaments de mesura. A la figura 8 es mostren els resultats obtinguts en els dos arrays realitzats a la població de Vielha (pàrking i camp de futbol). La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value). El model del perfil vertical de V_s de l'array del pàrking de Vielha (figura 8 esquerra) mostra dues capes, una primera d'uns 18 metres amb una velocitat de 325 m/s i una altra capa amb una velocitat aproximada de 1300 m/s. El model del perfil vertical de V_s de l'array del camp de futbol de Vielha (figura 8 dreta) mostra dues capes, una primera capa d'uns 20 metres amb una velocitat de 330 m/s i una altra capa amb una velocitat d'uns 1400 m/s. En ambdós casos, s'interpreta que la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

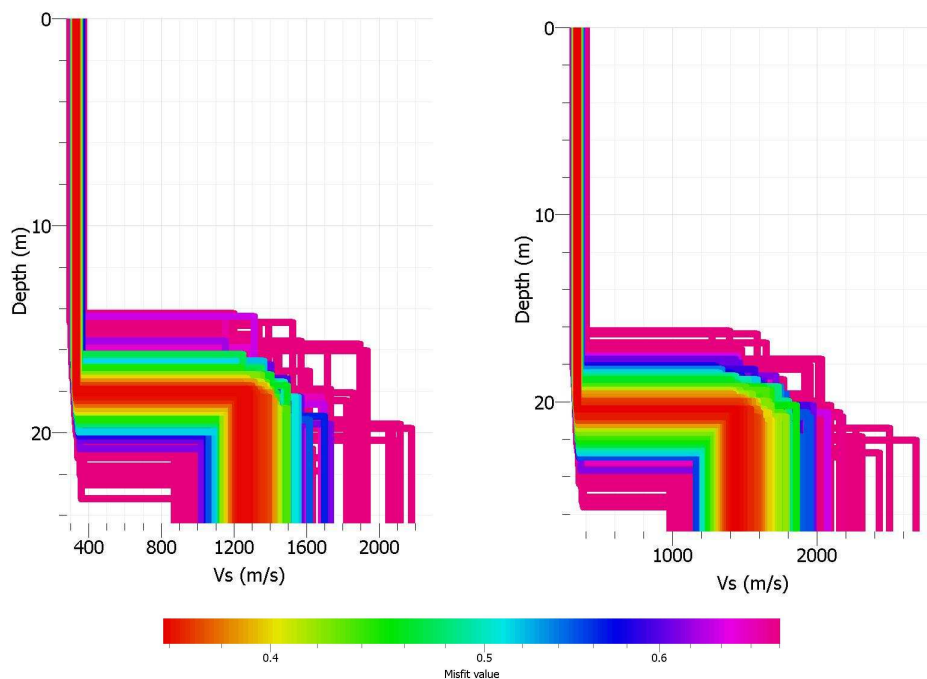


Figura 8: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'array del pàrking de Vielha (esquerra) i a l'array del camp de futbol de Vielha (dreta).

La freqüència fonamental del sòl es pot relacionar amb la profunditat del basament rocós utilitzant l'expressió (Bard, 1985):

$$H=Vs/(4 \cdot f_0)$$

On f_0 és la freqüència fonamental del sòl (Hz), H la profunditat del basament rocós (m) i V_s la velocitat de propagació de les ones de cisalla (m/s). Amb aquesta expressió es pot calcular la profunditat del basament rocós si es coneix el valor de la freqüència fonamental de sòl i la velocitat de propagació de les ones de cisalla. A la població de Vielha es coneix el perfil de V_s en dos emplaçaments, tenen valors semblants, al voltant de 325 m/s. A la figura 9 es presenta un mapa de la profunditat del basament rocós calculat utilitzant la freqüència fonamental del sòl i aquest valor de V_s (325 m/s). La zona amb el basament rocós més profund s'ubica al centre de la cubeta amb un valor de 30 metres. A mesura que ens movem cap als vessants el gruix de dipòsits va disminuint fins que el basament rocós aflora en superfície.

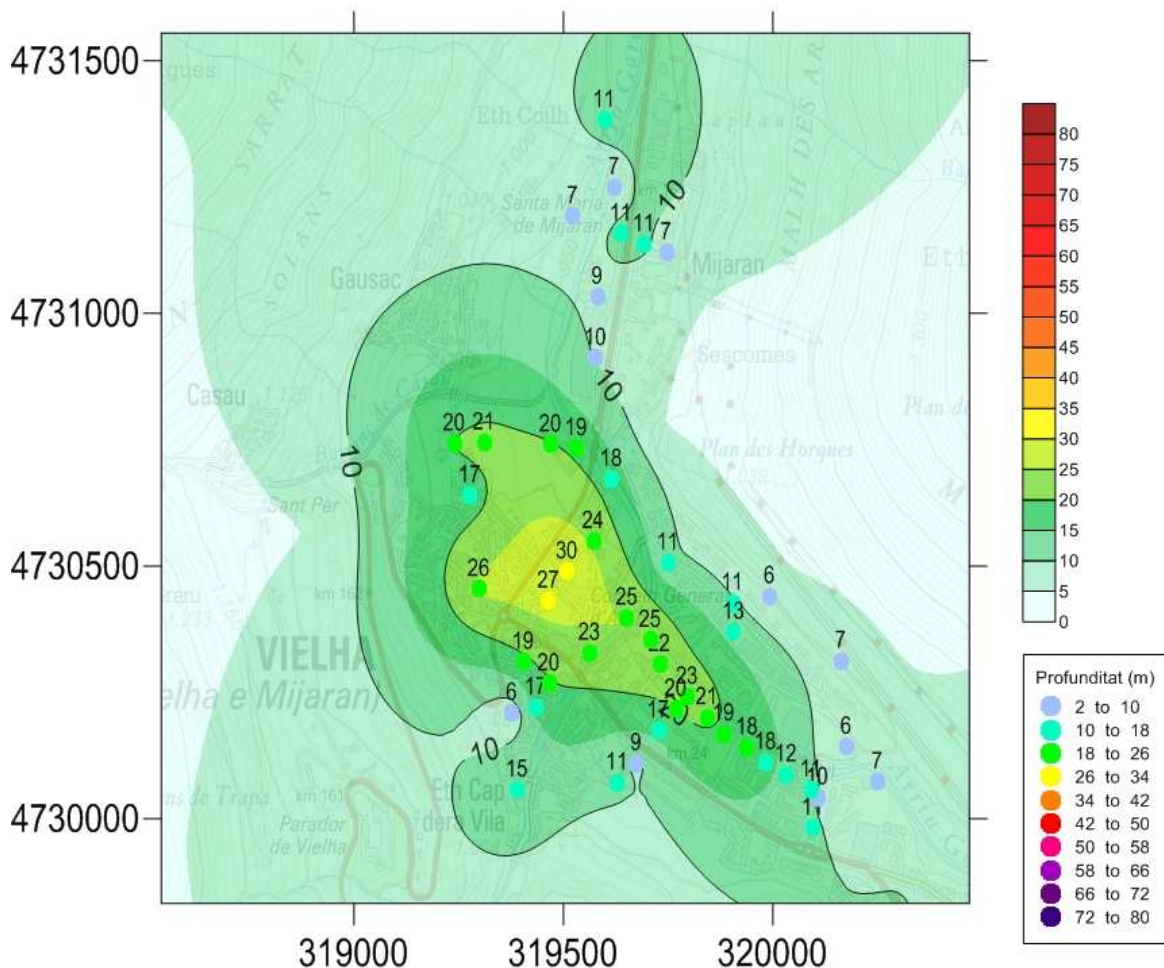


Figura 9: Mapa de la profunditat del basament rocós de la població de Vielha obtingut a partir de la freqüència fonamental del sòl (mètode H/V) i del valor de V_s de la tècnica d'array (325 m/s).

5 Càlcul de la resposta del sòl (simulació numèrica)

5.1 Classificació sòls EC8

S'ha calculat la mitjana de la velocitat de propagació de les ones de cisalla dels 30 primers metres de sòl (V_{s30}) a tots els emplaçaments on s'han realitzat mesures de soroll sísmic amb la tècnica de array a la Val d'Aran. Aquests valors es mostren a la taula 1, junt amb la classificació segons l'Eurocodi EC8 (CEN, 2003) i la geologia de l'emplaçament descrita al mapa geològic 1:50.000 de la Val d'Aran.

Taula 1: Mitjana de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_{s30}), classe EC8 i geologia dels emplaçaments on s'han realitzat mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array a la Val d'Aran.

Array	V_{s30} (m/s)	Classe EC8	Sòl
Camp de futbol Les	553	B	Al·luvions
Les	530	B	Al·luvions
Camp de futbol Bossòst	429	B	Al·luvions
Bossòst	560	B	Al·luvions
Pàrking Vielha	464	E	Vessant d'esbaldregalls
Camp de futbol Vielha	443	E	Vessant d'esbaldregalls
Arties	441	B	Al·luvions
Vaquèira	916	A	Al·luvions

La major part dels emplaçaments de la Val d'Aran s'han classificat com a classe de sòl B. De totes maneres s'ha de tenir en compte que alguns punts tenen valors molt propers al límit entre les classes B i C (360 m/s), per exemple el camp de futbol de Bossòst i Arties. A la localitat de Vielha els emplaçaments dels arrays tenen classe E, ja que els sòls tenen un gruix màxim de 20 metres recobrint el basament rocós.

5.2 Modelització de la resposta sísmica del sòl (ProShake 1D)

El programa ProShake calcula la resposta d'ones de cisalla propagant-se verticalment per un sistema unidimensional de capes horitzontals homogènies, viscoelàstiques i infinites. El programa es basa en la solució continua de l'equació d'ona adaptada per considerar

moviments transitoris a partir de l'algorisme de la transformada de Fourier. La no linealitat del mòdul de cisalla i l'esmoreïment es considera utilitzant la propietat lineal-equivalent del sòl i mitjançant un procés iteratiu per obtenir valors del mòdul de cisalla i l'esmoreïment compatibles amb les deformacions efectives induïdes a cada capa (Figueras, 1994). Per tant, són necessàries les dades que defineixen les columnes de sòl, com ara el nombre de capes, gruixos, densitat, velocitats de propagació de les ones de cisalla i les corbes de la variació del mòdul de cisalla i l'esmoreïment amb la deformació. Per a la modelització de la propagació de les ones sísmiques amb aquest programa també és necessari un sisme d'entrada en el basament rocós.

5.2.1 Definició de la columna de sòl

S'ha definit una columna de sòl en cada un dels emplaçaments on s'han realitzat mesures amb la tècnica d'array. Les dades necessàries per a definir les capes d'aquestes columnes (litologia, gruix, V_s ,...) s'han extret dels mapes geològics, sondeigs, estudis geotècnics i resultats dels arrays (taula 2). A partir dels mapes de la profunditat del basament rocós s'han generat columnes de sòl tipus per conèixer la resposta del sòl en altres punts de cada municipi. Donada la poca informació disponible, tant pel que fa a estudis geotècnics o perfils geològics, les columnes de sòl s'han definit extrapolant els resultats dels arrays fins a les profunditats definides al mapa de la profunditat del basament rocós.

Taula 2: Principals característiques de les columnes de sòl definides a la Val d'Aran.

Població	Array	Material	Gruix (m)	Densitat (kN/m ³)	V _s (m/s)
Vielha	Pàrking	Blocs i còdols	18	20.6	325
		Pissarres	∞	24.5	1300
	Camp de futbol	Blocs i còdols	20	20.6	330
		Pissarres	∞	24.5	1400
Les	Camp de futbol	Sòl vegetal	1	13.3	212
		Graves amb matriu sorrenca	20	17.6	420
		Pissarres	∞	24.5	1500
	Les	Sòl vegetal	1	13.3	212
		Graves amb matriu sorrenca	52	17.6	530
		Pissarres	∞	24.5	1700
Bossòst	Camp de futbol	Graves amb matriu sorrenca	9	17.6	300
		Graves amb matriu sorrenca	39	17.6	525
		Pissarres	∞	24.5	2000
	Bossòst	Graves amb matriu sorrenca	32	17.6	560
		Pissarres	∞	24.5	1600
Arties	Arties	Graves amb matriu sorrenca	27	17.6	415
		Pissarres	∞	24.5	1700*

5.2.2 Sisme d'entrada

Per a seleccionar el sisme d'entrada en roca s'ha consultat la base de dades d'accelerogrames creada en el projecte NERIES (Network of Research Infrastructure for European Seismology, 2006 – 2010). En el procés de selecció s'ha tingut en compte l'estudi de perillositat sísmica (mètode probabilista) en termes de l'acceleració espectral (SA) obtingut per Secanell et al., (2008), considerant els valors corresponents a un període de retorn de 475 anys. Inicialment es fa una selecció de registres per a sismes de magnituds entre 5 i 6, i distàncies menors de 30 km, que, segons un estudi estadístic realitzat amb els registres de la base de dades (Gassol, 2011), estan associats a espectres de rangs semblants a l'espectre proposat. Successivament es passa a una selecció més estricta, on només s'han tingut en compte els valors espectrals per a

freqüències mitges i per a valors de PGA semblants a l'espectre proposat. En aquest procés s'obtenen 6 sismes (figura 10) que tenen un espectre de resposta promig semblant a l'espectre proposat per Secanell et al., (2008).

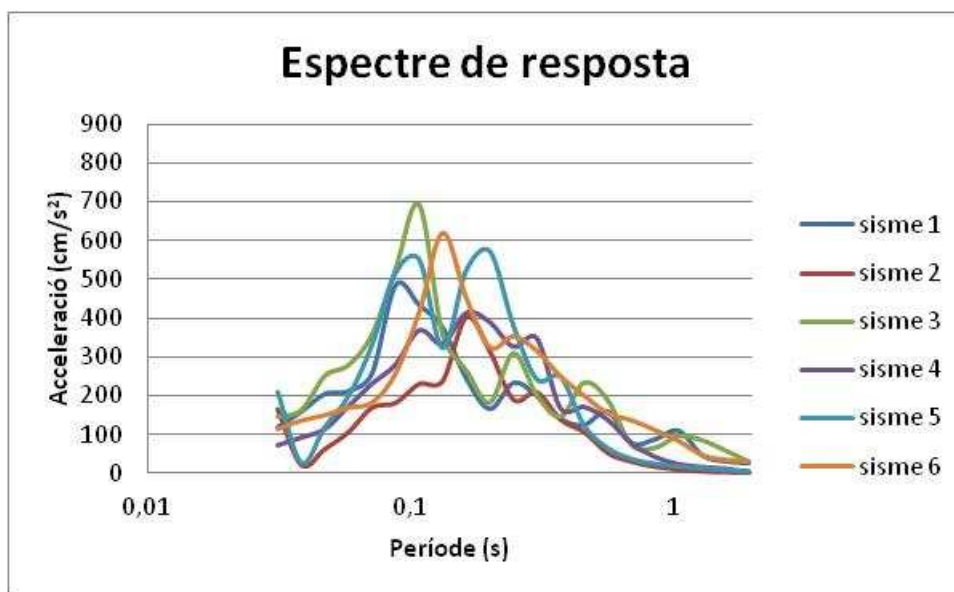


Figura 10: Espectres de resposta en termes d'acceleració dels sismes seleccionats de la base de dades del projecte NERIES.

5.3 Funció de transferència del sòl

Una vegada s'han seleccionat els accelerogrames d'entrada, s'ha calculat la funció de transferència per a cada una de les columnes de sòl definides. Les funcions de transferència s'han obtingut per a cada un dels sis accelerogrames seleccionats com a registre d'entrada en roca (figura 10). A les figures 11 a 14 es mostren les funcions de transferència calculades a les columnes de sòl més representatives de cada població. Només es representen els resultats per un dels accelerogrames (earthquake 4), ja que no s'aprecien diferències importants entre els càlculs amb els diferents accelerogrames.

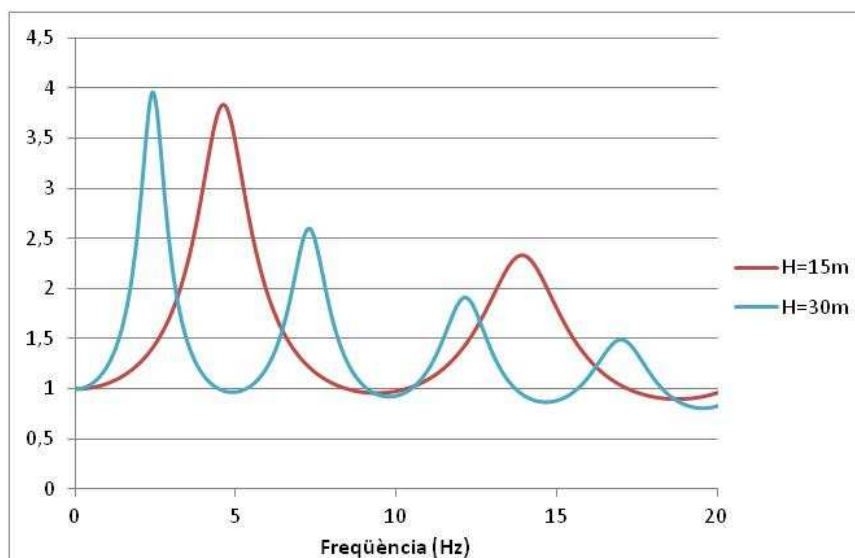


Figura 11: Comparació entre les funcions de transferència calculades amb el mètode lineal equivalent en dos emplaçaments de Vielha amb gruixos de 15 i 30 metres respectivament.

Els resultats que s'obtenen a les quatre poblacions són força semblants, tant pel que fa al valor de l'amplificació màxima de la funció de transferència, entre 4 i 5, com pel que fa a la freqüència fonamental del sòl, que varia entre 2 i 9 Hz. Els valors més baixos s'obtenen allà on el basament rocós és més profund i els valors més alts on el basament rocós és més superficial. Aquesta semblança entre les funcions de transferència dels diferents municipis és coherent amb la geologia de la zona, ja que les quatre poblacions tenen una geologia molt semblant, amb valors similars de la velocitat de propagació de les ones de cisalla i gruixos de dipòsits de sòls tous similars.

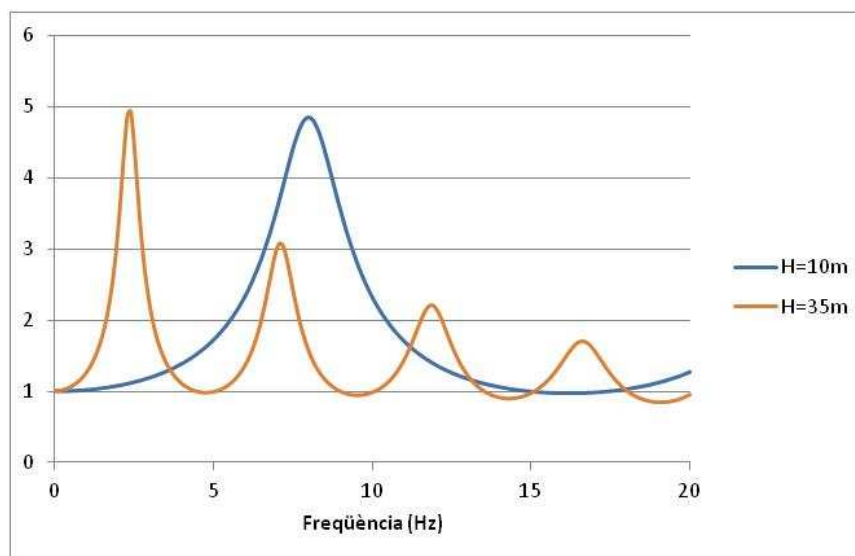


Figura 12: Comparació entre les funcions de transferència calculades amb el mètode lineal equivalent en dos emplaçaments d'Arties amb gruixos de 10 i 35 metres respectivament.

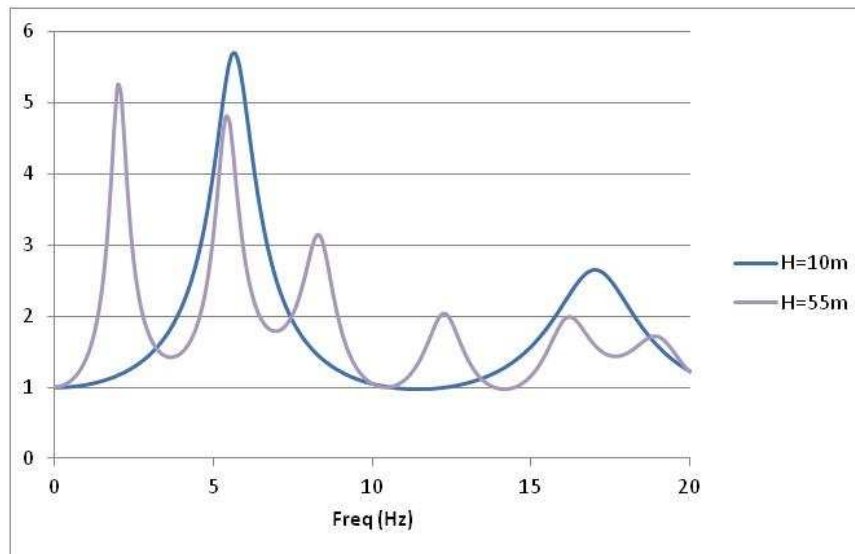


Figura 13: Comparació entre les funcions de transferència calculades amb el mètode lineal equivalent en dos emplaçaments de Bossòst amb gruixos de 10 i 55 metres respectivament.

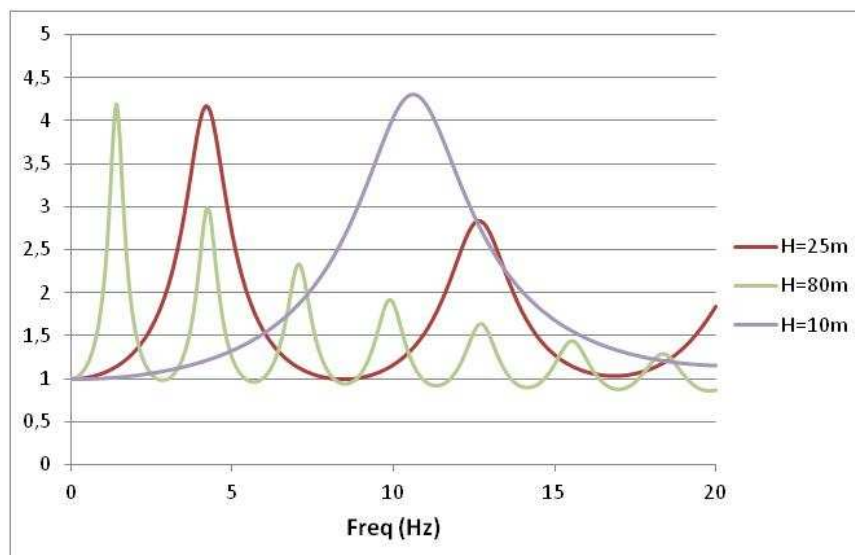


Figura 14: Comparació entre les funcions de transferència calculades amb el mètode lineal equivalent en tres emplaçaments de Les amb gruixos de 10, 25 i 80 metres respectivament.

5.4 Espectre de resposta en termes d'acceleració (SA)

Amb el programa ProShake, s'ha calculat l'espectre de resposta en termes d'acceleració (SA) a partir dels accelerogrames obtinguts a la part superior de la columna de sòl. A les figures 15 a 18 es representa, per a cada una de les localitats, la mitjana dels espectres de resposta d'entrada en roca i els calculats a la part superior de la columna de sòl considerant els sis sísmes d'entrada seleccionats per a cada una de les columnes de sòl.

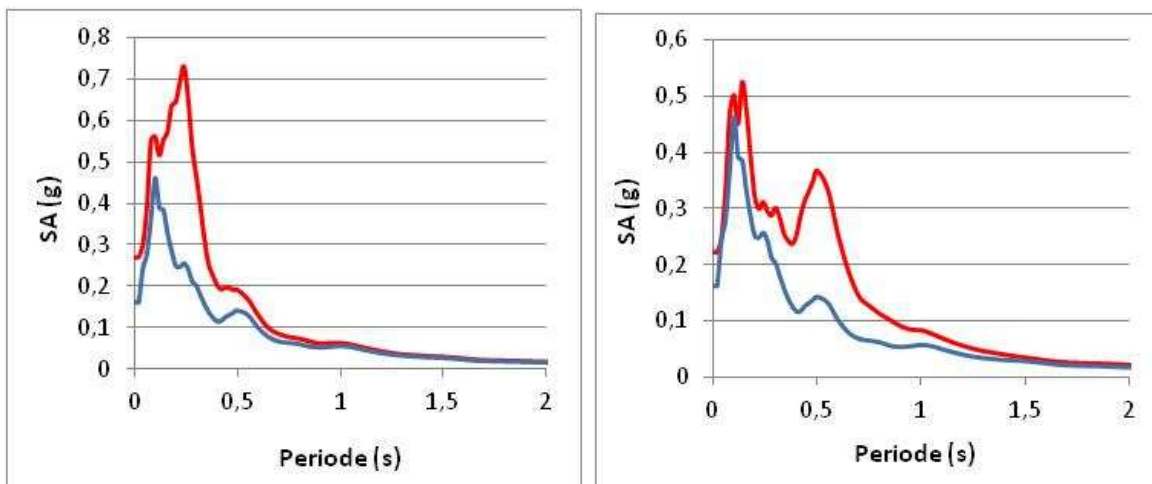


Figura 15: Espectres de resposta (esmoreïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de les columnes definides a Vielha amb gruixos de 15 metres (esquerra) i de 30 metres (dreta). En vermell es representa l'espectre de resposta en sòl i en blau l'espectre de resposta en roca.

Els espectres de resposta en termes d'acceleració de la població de Vielha mostren amplifícacions moderades a períodes baixos ($T < 1$ s). En sòls somers s'observa una elevada amplifícació en $T < 0.5$ s.

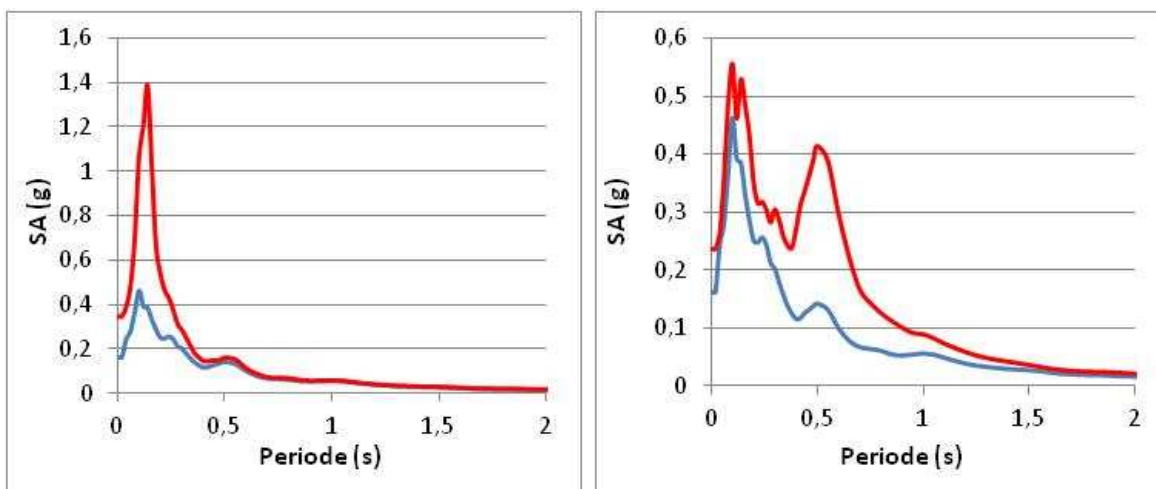


Figura 16: Espectres de resposta (esmoreïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de les columnes definides a Arties amb gruixos de 10 metres (esquerra) i de 35 metres (dreta). En vermell es representa l'espectre de resposta en sòl i en blau l'espectre de resposta en roca.

A Arties s'observa un comportament molt similar al obtingut a Vielha, amb amplifícacions moderades a períodes baixos ($T < 1$ s) i alta amplifícació en sòls somers en els períodes més baixos ($T < 0.5$ s).

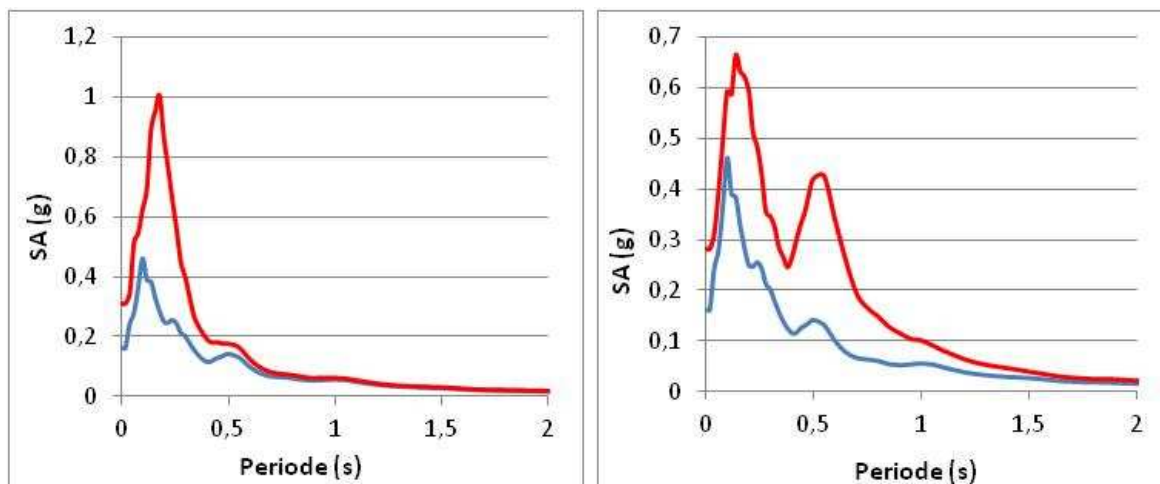


Figura 17: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de les columnes definides a Bossòst amb gruixos de 10 metres (esquerra) i de 55 metres (dreta). En vermell es representa l'espectre de resposta en sòl i en blau l'espectre de resposta en roca.

Els espectres de resposta de la població de Bossòst presenten lleugeres diferències respecte els obtinguts a Vielha i Arties, ja que s'observa una elevada amplificació en tot el rang de períodes per sota 1.5 s.

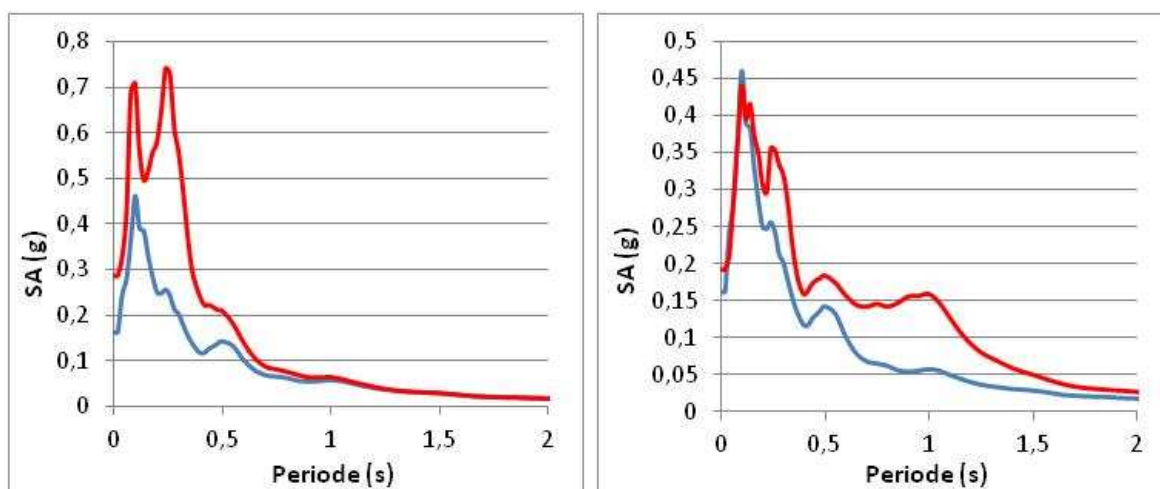


Figura 18: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de les columnes definides a Les amb gruixos de 25 metres (esquerra) i de 80 metres (dreta). En vermell es representa l'espectre de resposta en sòl i en blau l'espectre de resposta en roca.

Els espectres de resposta de la localitat de Les mostren amplificacions moderades fins a períodes alts ($T = 2$ s). Com a la resta de poblacions estudiades a la Val d'Aran, s'observa un elevada amplificació en sòls somers en $T < 0.5$ s.

5.5 Microzonació sísmica en termes de ΔI

Per a considerar l'amplificació del moviment del sòl en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI), s'ha seguit una metodologia basada en la Intensitat d'Arias (Macau, 2008). La Intensitat d'Arias (AI) és una intensitat instrumental que es defineix com:

$$AI = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int a_i^2(t) dt$$

on $a_i(t)$ és l'accelerograma de cada una de las components del moviment del sòl. Es pot relacionar la Intensitat d'Arias amb la Intensitat macrosísmica amb la relació empírica proposada per Cabañas et al. (1997) per a la zona del Mediterrani:

$$\ln(AI) = 1.50 \cdot I_L - 6.42$$

on AI és la Intensitat d'Arias (en cm/s) i I_L és la intensitat local MSK. Les Intensitats d'Arias dels accelerogrames en roca i en sòl permeten obtenir, per a cada columna, el valor de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI)

$$\Delta I = 0.66 \cdot \ln(AI_S/AI_R)$$

on ΔI és l'increment d'intensitat per a la columna de sòl, AI_S és la Intensitat d'Arias del registre al cim de la columna de sòl i AI_R és la Intensitat d'Arias en roca. A la taula 3 es mostra l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI) produït per l'amplificació del moviment del sòl en funció del valor del quocient entre la Intensitat d'Arias calculada al cim de la columna de sòl i en roca (AI_S/AI_R).

Taula 3: Valors de l'increment d'Intensitat Macrosísmica en funció del quocient entre la Intensitat d'Arias calculada en sòl i en roca.

A_{IS}/A_{IR}	ΔI
1.0 – 1.4	0.0
1.5 – 2.9	0.5
3.0 – 6.6	1.0
6.7 – 14.0	1.5
14.1 – 34.0	2.0

El mètode de càlcul de l'amplificació del moviment del sòl en termes de la intensitat macrosísmica s'ha aplicat als registres obtinguts amb la simulació numèrica al cim de les columnes de sòl definides a la Val d'Aran. A partir d'aquests resultats, junt amb el patró observat en els valors de la freqüència fonamental del sòl, s'ha realitzat una microzonació sísmica en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica de les quatre poblacions estudiades (figures 19 a 22).

A la Val d'Aran s'identifiquen tres zones, dues d'elles amb increment d'intensitat. A les poblacions de Vielha, Arties i Les s'obtenen dues zones amb increment d'intensitat: +0.5 a la zona del centre de la cubeta on el basament rocós és més profund i +1.0 a la zona de la vora de la cubeta on la roca és més somera. A la localitat de Bossòst, on ja s'ha observat una amplificació més important en els espectres de resposta en termes d'acceleració, s'obté un increment +1.0 a tota la cubeta. En totes les poblacions de la Val d'Aran no hi ha increment d'intensitat a la zona rocosa. Aquestes diferències entre els valors d'amplificació a Bossòst i a la resta de localitats estudiades de la Val d'Aran estan relacionades amb l'estructura del subsòl. A diferència de la resta de la Val d'Aran, on només s'ha identificat una capa de sòl tou sobre el basament rocós, a Bossòst hi ha dues capes de sòls tous sobre roca. Aquestes dues capes generen contrastos que provoquen una major amplificació de les ones sísmiques.

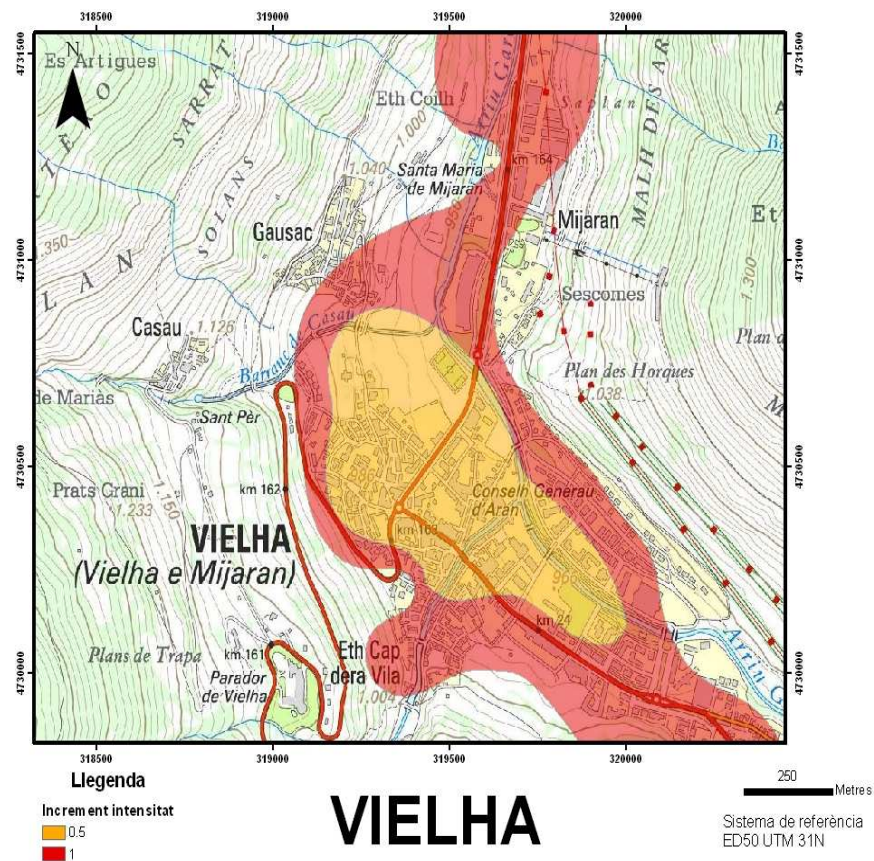


Figura 19: Microzonació sísmica de Vielha en funció de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI).

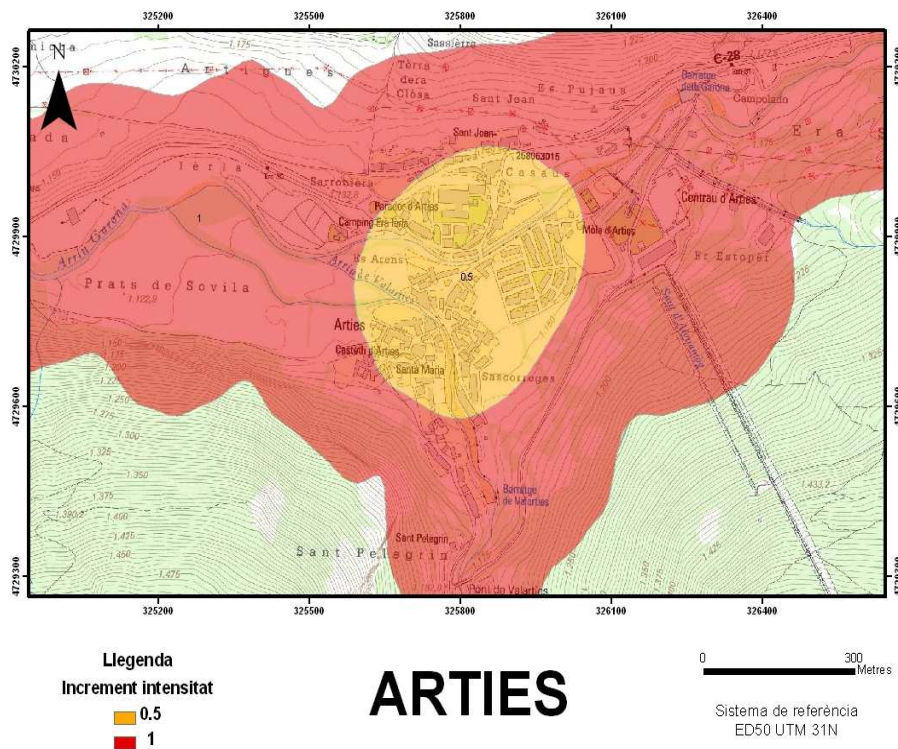


Figura 20: Microzonació sísmica d'Arties en funció de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI).

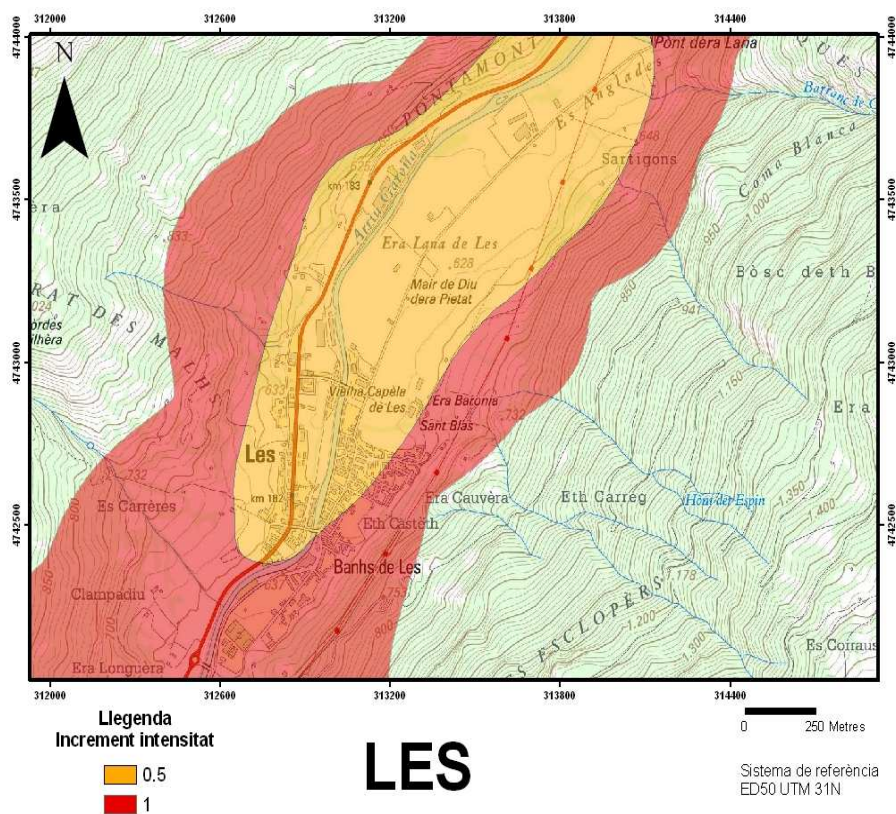


Figura 21: Microzonació sísmica de Les en funció de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI).

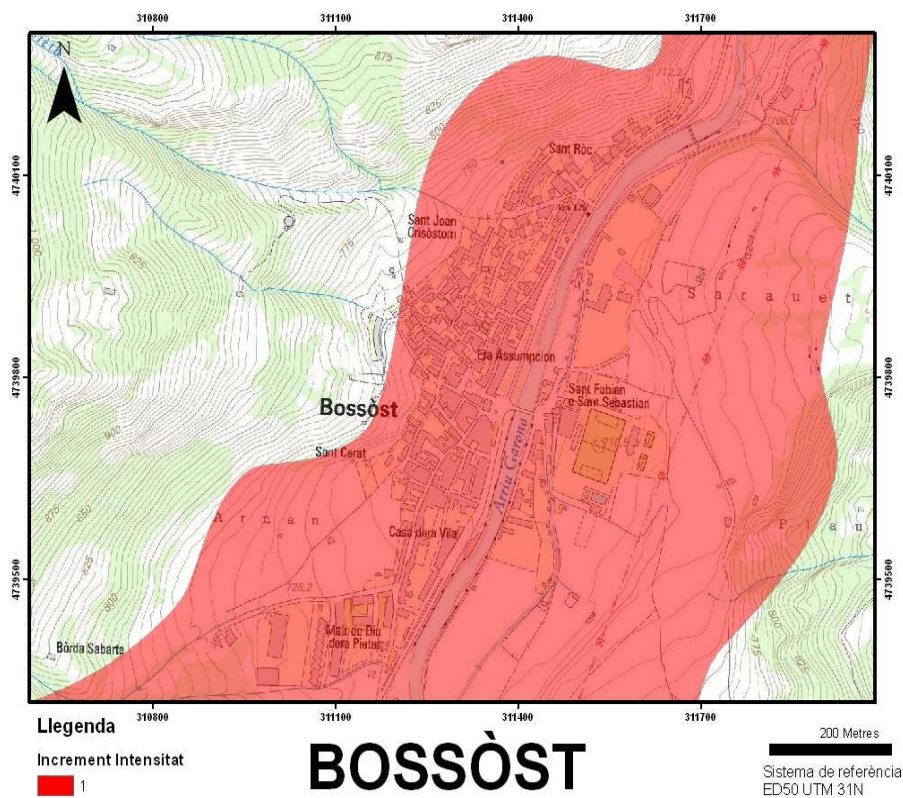


Figura 22: Microzonació sísmica de Bossòst en funció de l'increment d'intensitat macrosísmica (ΔI).

6 Conclusions

L'objectiu d'aquest estudi ha estat l'avaluació de la resposta sísmica local a la Val d'Aran, que és una zona pilot del projecte Sispyr, i l'elaboració dels mapes de microzonació sísmica. Els treballs s'han concentrat a les poblacions de Vielha, Arties, Les i Bossòst.

Per a dur a terme aquest treball s'ha aplicat una metodologia de nivell avançat que ha consistit en la utilització de mètodes experimentals i de simulació numèrica per a l'avaluació de l'amplificació del moviment del sòl per efecte de lloc.

Amb l'aplicació de la tècnica d'array s'han obtingut els perfils verticals de V_s en les diferents poblacions estudiades de la Val d'Aran, cosa que ha permès definir columnes de sòl representatives de cada geologia. La majoria d'emplaçaments d'array estan situats sobre sòls de la classe B segons la classificació de sòls proposada per l'Eurocode EC8 (CEN, 2003).

La combinació dels valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V i els perfils verticals de V_s ha permès obtenir un mapa del gruix de sediments (Quaternari) de les localitats estudiades a la Val d'Aran. A les poblacions de Vielha i Arties el basament rocós és bastant somer, amb profunditats màximes d'uns 30 metres. A les cubetes de Bossòst i Les augmenta el gruix del dipòsit de sòls tous fins a 51 i 77 metres respectivament.

S'ha obtingut la microzonació sísmica de quatre localitats de la Val d'Aran en funció de la freqüència fonamental del sòl i l'increment d'intensitat macrosísmica. El resultat mostra uns mapes de microzonació sísmica en detall on s'identifiquen tres zones. Les àrees on aflora el basament rocós no presenten amplificació del moviment del sòl. En general les zones situades al centre de les cubetes mostren amplifícacions baixes, tant en el valor de l'increment d'intensitat (+0.5) com en l'espectre de resposta en termes d'acceleració. L'amplificació del moviment del sòl va augmentant a mesura que ens acostem als vessants, amb un increment d'intensitat de +1.0, on trobem el basament rocós més somer.

Les diferències entre els valors d'amplificació a Bossòst i a la resta de localitats estudiades de la Val d'Aran estan relacionades amb l'estructura del subsòl. A diferència

de la resta de la Val d'Aran, on només s'ha identificat una capa de sòl tou sobre el basament rocós, a Bossòst hi ha dues capes de sòls tous sobre roca. Aquestes dues capes generen contrastos que provoquen una major amplificació de les ones sísmiques.

7 Referències

Bard, P.-Y. (1985) “Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats expérimentaux et théoriques”, A: Genie Parasismique. Ed: Victor Davidovici. Paris, pp 223-238.

Bordonau, J., Pous, J., Queralt, P., J. Vilaplana. (1989). Geometría y depósitos de las cubetas glaciolacustres del Pirineo. Estudios geol., 45: 71-79.

Cabañas, L., Benito, B., Herraiz, M. (1997) “An approach to the measurement of the potencial structural damage of earthquake ground motions”, Earthquake Engineering and Structural Dy-namics, Vol. 26, pp. 79-92.

CEN (Comité Européen de Normalisation). (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistente, Doc CEN/TC250/SC8/N335.

Figueras, S. (1994). Simulació numèrica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 279 pp.

GA-009/12. (2012) “Microzonació sísmica de nivell avançat a l'àrea urbana de Girona. SISPYR”. Institut Geològic de Catalunya, IGC.

Gassol, G. (2011) Anàlisi i validació dels paràmetres d'accelerogrames de la base dades europea (NERIES Distributed Database) calculats homogèniament. Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 372pp.

Macau, A. (2008) “Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas”, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Secanell, R.; Bertil, D.; Martin, C.; Goula, X.; Susagna, T.; Tapia, M.; Dominique, P.; Carbon, D. and Fleta, J. (2008). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. J. Seismol., 12, 323-341

Susagna, T. i Goula, X. (2013) “Selección de registros para el análisis de amplificación de suelos en las dos zonas piloto. Zona1, región Val d'Aran, Luchon y St. Beat y Zona 2, Girona ciudad.”, Informe R11. Projecte SISPYR. Interreg IVA.

Software PROSHAKE 1D (2001) “User's manual version 1.1 EduPro Civil System”, Inc. Red-mond, Washington.

Annex

Caracterització geofísica del subsòl a la Val d'Aran

**Caracterització
geofísica del
subsòl a la Val
d'Aran**

Codi: GA-017/10

Novembre 2010

Índex

1	Resum executiu	2
2	Zona d'estudi	3
2.1	Situació geogràfica	3
2.2	Entorn geològic	4
3	Descripció dels mètodes geofísics utilitzats	6
3.1	Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic	6
3.2	Tècnica d'array	8
4	Treball de camp i processat	13
4.1	Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic	13
4.2	Tècnica d'array	16
5	Resultats i interpretació	20
5.1	Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic	20
5.2	Tècnica d'array	23
6	Conclusions	49
7	Bibliografia	51

1 Resum executiu

El treball que es presenta s'ha dut a terme a la Unitat de Tècniques Geofísiques de l'IGC com a suport al projecte SISPYR (Sistema d'informació sísmica dels Pirineus), finançat per un programa europeu Interreg IV-A 2007-2013 entre França-Espanya-Andorra. En el projecte SISPYR, hi participen l'IGC (liderant el projecte), l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) i el BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et minières) de França, l'IGN (Instituto Geográfico Nacional) y la UPC. Un dels objectius del projecte és la avaluació del risc sísmic de la zona Pirenenca, a aquest efecte s'ha plantejat una avaluació de la perillositat sísmica a escala local per diferents zones d'estudi, una d'elles és la Val d'Aran.

Les poblacions estudiades han estat: Les, Bossòst, Vielha, Arties i Vaqueira, s'han fet mesures de soroll sísmic ambiental en diferents perfils per aplicar el mètode del quocient espectral H/V i en "arrays". Amb la tècnica H/V s'ha obtingut la freqüència fonamental del sòl, aplicant la tècnica de l'array s'ha obtingut el perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla de la columna de sòl així com el gruix de la capa de sòl.

Tenint en compte els resultats obtinguts amb les tècniques de sísmica passiva aplicades podem concloure que a la major part de la Val d'Aran la capa de sòls tous (quaternari) no supera els 50 metres de gruix i la velocitat de propagació de les ones de cisalla V_s varia entre 300 i 500 m/s (sòls classe B segons la classificació de l'Eurocode EC8), la V_s del basament rocós varia entre 1000 i 2000 m/s.

Són autors d'aquest informe Albert Macau (responsable del projecte,) i Fabian Bellmunt (execució treballs de camp, processat de dades e interpretació). Per als treballs de camp s'ha comptat amb la col·laboració de Carolina Meneses, Víctor Schmidt i Tànit Frontera i Yolanda Colom.

Sara Figueras Vila
Cap de la Unitat de Tècniques
Geofísiques

Xavier Beràstegui Batalla
Subdirector Tècnic

2 Zona d'estudi

2.1 Situació geogràfica

La caracterització geofísica del subsòl s'ha dut a terme als municipis de Vielha e Mijaran, Bossòst, Les i als nuclis de Vaqueira i Arties (situats al municipi de Naut Aran), a la comarca de la Val d'Aran (Figura 1).

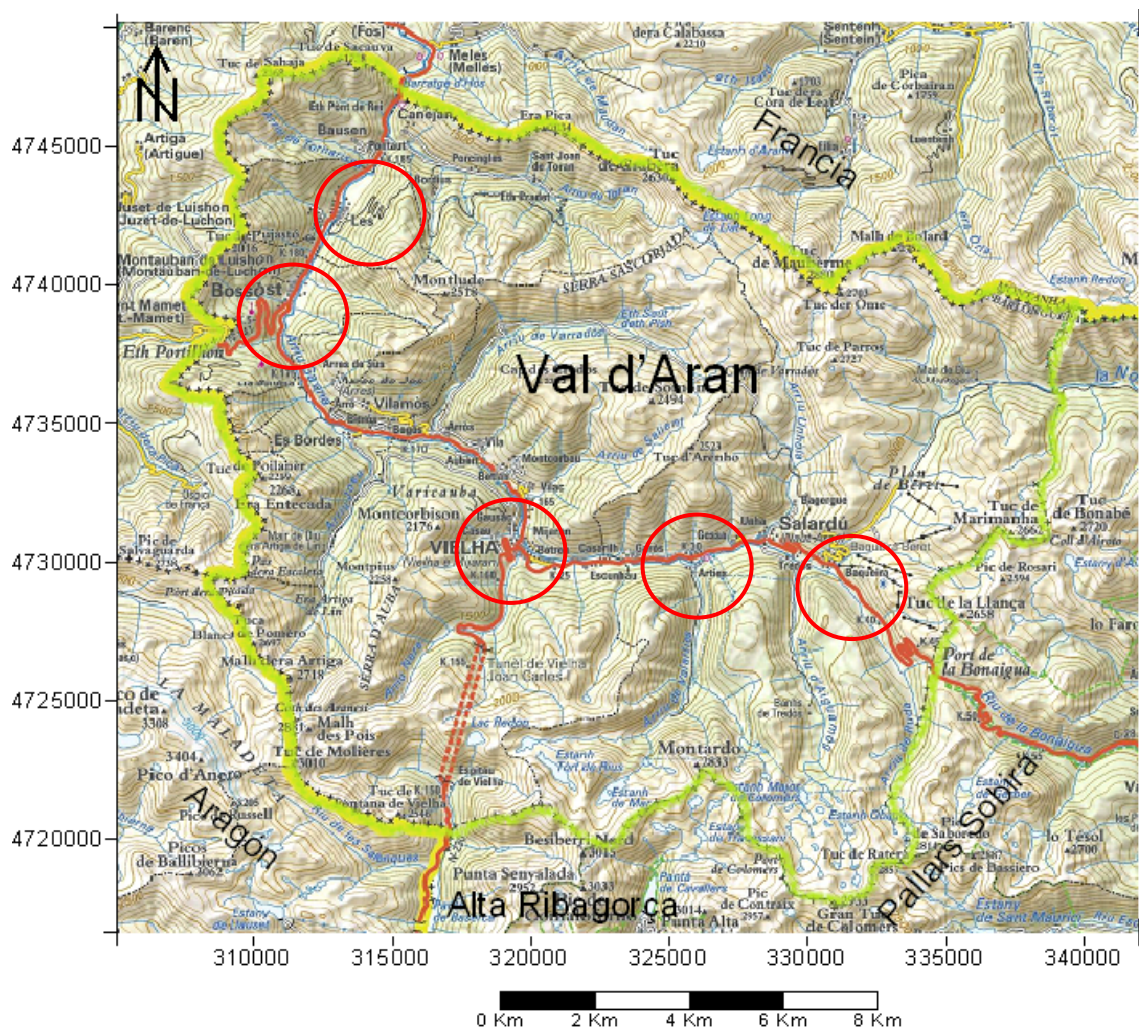
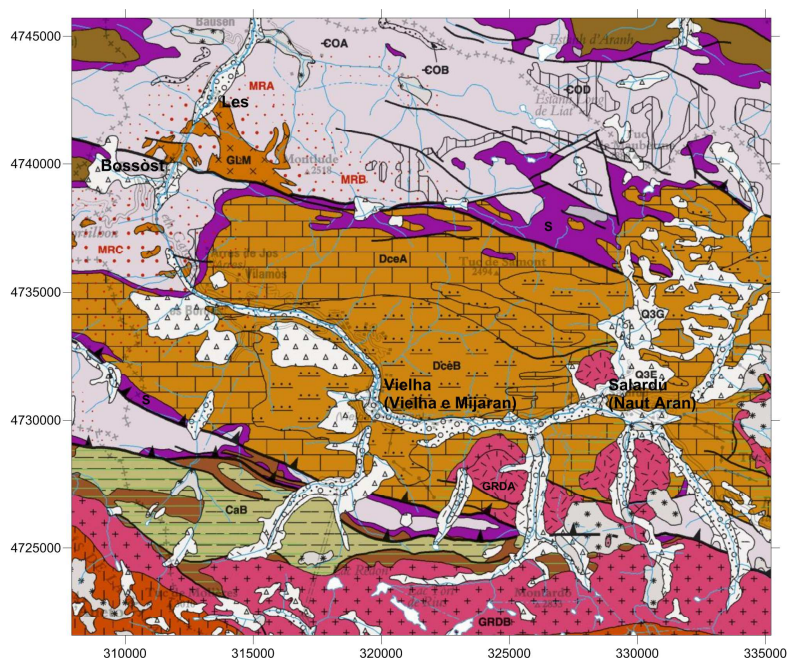


Figura 1: Localització (cercles vermells) dels municipis i nuclis de població de la Val d'Aran on s'ha caracteritzat el subsòl (ICC, 2010).

2.2 Entorn geològic

La zona en estudi es troba situada a la comarca de la Val d'Aran, ubicada a l'extrem occidental dels Pirineus Catalans, a la província de Lleida. El substrat rocós de la Val d'Aran forma part de l'eix central de la Serralada Pirinenca, i és constituït gairebé exclusivament per roques paleozoiques plegades durant l'orogènia herciniana, amb intrusions de roques plutòniques tardohercinianes, considerades com el sòcol pirinenc. La posterior orogènia alpina va provocar un rejuveniment dels materials, fent aflorar petits retalls de roques del permian, mentre que la distensió miopliocènica va permetre sedimentar roques lacustres abans del definitiu encaixament de la xarxa hidrogràfica actual (Figura 2).



Q3_E: Llims i còdols (col·luvions, dipòsits fluvioglacials); F: Còdols i llims (fons de vall); G: Graves, gresos i lutites (cons de dejecció). Quaternari.

Ca_B: Microconglomerats, calcofil·lites, pelites i carbonats. Carbonífer inferior i mitjà.

Dce_A: Alternances detriticocarbonàtiques, calcàries, pelites i calcàries, turbidites carbonàtiques; B: Turbidites siliciclàstiques. Devonià.

S: Pissarres ampel·litzes, localment calcàries, lidites i radiolarites. Silurià.

EO_A: Pelites, gresos i grauvaques (ritmites) amb intercalacions de B: Microconglomerats i gresos, C: materials volcànics i D: calcàries. Cambrià-Ordovicià.

GRD_A: Granodiorites biotítics. B: Granits leucocràtics. Roques intrusives tardohercinianes.

MR Zones d'isometamorfisme en metapelites. A: Zona de la biotita. B: Zona de la cordierita-andalusita. C: zona de la sil·limanita-moscovita. Metamorfisme regional Hercinià.

Figura 2. Mapa geològic de Catalunya 1:250.000. IGC, 2002.

A l'àmbit del Riu Garona, i en general, als fons de vall, afloren típicament les litologies més tardanes fruit dels processos de sedimentació del Cenozoic (Quaternari), i estan formades bàsicament per dipòsits fluvioglacials, col·luvions, llims i còdols, graves i gresos. En algunes valls transversals també es poden trobar blocs i argiles provinents de les morenes glacials.

Es creu que, l'última fase glacial fou la que originà un macromodelat més clar a la Val d'Aran. Durant el màxim glacial, de la darrera glaciació que va afectar els Pirineus, els gruixos de glaç arribaren a prop dels mil metres a la zona de Les i Bossòst, i cobriren gran part del territori aranès. L'empremta d'aquestes glaceres es manifesta, principalment, a les zones de capçalera, amb la presència de centenars de cubetes lacustres que ocupen les sobreexcavacions subglacials quan desapareix el glaç. Si bé les cubetes de fons de circ són les més nombroses, hi ha també cubetes de fons de vall (Figura 3). L'existència de cubetes de sobreexcavació a les valls glacials demostra que l'acció erosiva s'incrementa a les zones de màxima acumulació de glaç: en la confluència de diverses llengües glacials, al peu de les parets rocoses y en les zones on el flux glacial es frena degut, per exemple, a l'existència de ressalts rocosos formats per roques molt competents (Bordonau et al., 1989).

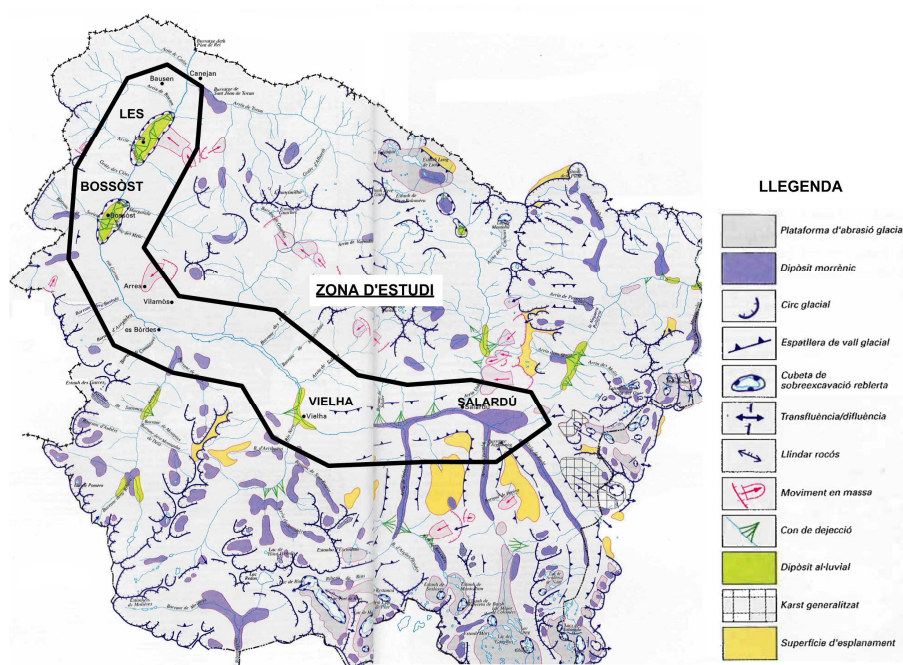


Figura 3. Mapa geomorfològic de la Val d'Aran. *Atles comarcal de Catalunya - Val d'Aran, 1994.*

Les cubetes de Bossòst i Les tenen un origen glacial, i actualment estan reblertes pels sediments transportats per la Garona, que els dona la morfologia plana que hom pot observar, i pels sediments fluviotorrencials (con de dejecció) situats a les zones de confluència de les valls tributaries amb el principal. La forma en U del perfil transversal de les valls araneses és conseqüència també de la presència glacial, i es va perdent cap a alçades inferiors, per la menor durada d'aquesta presència glacial (formes de V).

3 Descripció dels mètodes geofísics utilitzats

3.1 Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic

Els sòls compostats per materials tous i/o poc consolidats poden produir amplifícacions de les ones sísmiques, però cal tenir en compte que l'amplificació del moviment del sòl no es produeix per igual en tot el rang de freqüències. La funció de transferència, definida com el quocient espectral entre el registre del moviment del sòl en superfície i el registre en el basament rocós, informa del valor de l'amplificació del moviment del sòl assignat a cada freqüència. La freqüència fonamental de la funció de transferència es defineix com la freqüència més baixa on es produeix amplificació de l'ona sísmica, i habitualment coincideix amb la freqüència on es produeix la màxima amplificació del moviment del sòl

La tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic és un mètode experimental que permet obtenir la freqüència fonamental a partir del quocient espectral entre les components horitzontals (H) i la component vertical (V) de mesures de soroll sísmic en superfície (Nakamura, 1989). La funció de transferència de les capes superficials (S_T) es defineix com el quocient dels espectres d'amplitud de Fourier de les components horitzontals del moviment en superfície (S_{HS}) i del moviment incident en el basament rocós (S_{HB}). Considerant que el soroll sísmic està format principalment d'ones superficials, s'obté que la funció de transferència de la capa de sòls es pot estimar com el quocient espectral entre la component horitzontal (S_{HS}) i la component vertical (S_{VS}) del registre de soroll sísmic en superfície:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \rightarrow S_T \cong \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

D'aquesta manera es pot determinar la funció de transferència, i per tant la freqüència fonamental, de les capes de sòl a partir d'una sola mesura del moviment del sòl en superfície.

Per obtenir el quocient espectral H/V s'ha utilitzat el programa Geopsy. El càlcul s'ha realitzat de la forma següent:

$$\frac{H}{V} = \frac{S_{NS} + S_{EW}}{2 \cdot S_V}$$

- S_{NS} : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component N-S.
- S_{EW} : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component E-W.
- S_V : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component vertical, V.

El suavitzat dels mòduls de Fourier s'ha realitzat dividint el registre de soroll sísmic en finestres i solapant-les un 50% entre elles. La longitud de les finestres és un paràmetre que es pot modificar, habitualment es treballa amb finestres d'una longitud que varia entre 40 i 60 segons.

A la Figura 4 es mostra un exemple de la representació del quocient espectral H/V en funció de la freqüència de dos emplaçaments diferents, un sobre sòl (esquerra) i l'altre sobre roca (dreta). Es pot observar com el quocient espectral de l'emplaçament en sòl presenta un pic important al voltant de 3.5Hz, que correspon a la freqüència fonamental del sòl, mentre que el quocient espectral H/V de l'emplaçament en roca no mostra cap pic, ja que en aquest punt no s'espera que es produeixi amplificació de les ones sísmiques.

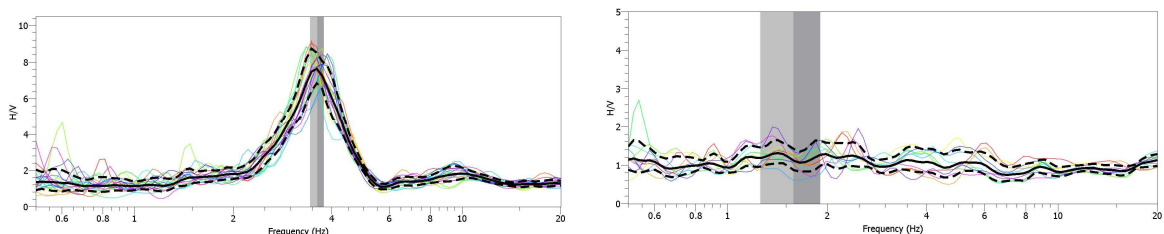


Figura 4. Exemple de relacions espectrals H/V obtingudes en emplaçaments en sòl (esquerra) i roca (dreta). En color es representen els quocients espectrals per a cada finestra de càlcul, i en negre la mitjana de totes les finestres junt amb les seves bandes d'error (en discontinu).

Si el basament rocós està cobert per una capa de sòl tou podem relacionar la freqüència fonamental del sòl (v), el gruix de la capa de sòls (H) i la velocitat mitjana de les ones de cisalla de la capa de sòls ($\bar{V}_s$) amb l'expressió següent (Bard, 1985):

$$v = \frac{\bar{V}_s}{4 \cdot H}$$

Per tant, en aquells emplaçaments on s'obtinguin valors elevats de la freqüència fonamental del sòl, s'espera que el basament rocós sigui somer i, en canvi, quan s'obtinguin valors baixos de la freqüència fonamental del sòl s'espera un basament rocós més profund. D'aquesta manera, coneixent la velocitat de les ones de cisalla de la capa de sòls i la seva freqüència fonamental, es pot obtenir la profunditat del basament rocós.

3.2 Tècnica d'array

Les tècniques d'array sísmic es basen en l'adquisició, a través de diferents sensors, de les vibracions ambientals (soroll sísmic) durant una finestra temporal determinada. El soroll sísmic es defineix com el moviment de fons de la terra generat per fonts no sísmiques (no sismogenètiques) distingint-los dels microsismes. Les fonts que produeixen aquest soroll sísmic poden trobar-se en diferents rangs de freqüència:

- Freqüències baixes ($< 0.3\text{-}0.5$ Hz): ones oceàniques que es produeixen a grans distàncies.
- Freqüències mitges (entre $0.3\text{-}0.5$ Hz i 1 Hz): ones de mar de costes properes.
- Freqüències altes (> 1 Hz): fonts lligades a activitat humana (trànsit, maquinària pesada).

Aquestes tècniques es coneixen també amb el nom de sísmica passiva ja que no requereixen de cap font sísmica activa. A més a més, no cal tenir informació de la localització i el nombre de fonts que generen el soroll sísmic enregistrat. Les principals suposicions requerides per l'aplicació de les tècniques d'array són:

- Les vibracions ambientals consisteixen principalment en ones superficials incloent modes fonamentals i harmònics.
- El medi és estratificat en capes subhoritzontals.

En aquest tipus de medi (estratificat) les ones superficials són dispersives, per tant, mostren variació de la velocitat aparent amb la freqüència, la qual cosa permet obtenir un perfil de velocitat d'ones S , V_s , amb la fondària (model 1D). Els modes Love i Rayleigh coexisteixen en les components horitzontals mentre que les components verticals només es veuen afectades per les ones superficials Rayleigh.

Els mètodes més utilitzats per a l'anàlisi de soroll sísmic adquirit en un array sísmic són el mètode espectral FK (freqüència - nombre d'ona) i el mètode SPAC (Spatial Autocorrelation). El processat amb tots dos mètodes presenta dos passos comuns per obtenir el perfil de V_s :

- Derivar la corba espectral característica de les ones que es propaguen (corba de dispersió pel mètode FK i corbes d'autocorrelació pel mètode SPAC).
- Invertir aquestes corbes per obtenir la estructura del subsòl.

La resolució està intrínsecament relacionada amb les amplituds espectrals del camp d'ones i amb les característiques de l'array.

El processat de les dades es farà amb el software Sesarray desenvolupat per Marc Wathelet (<http://www.geopsy.org/>). Es presenten, tot seguit, les nocions bàsiques de cadascun dels mètodes i la seva implementació en aquest software.

3.2.1 Mètode FK (Lacoss et al., 1969; Horike, 1985)

Aquest mètode suposa que les ones que s'enregistren a l'array són planes. Suposant una direcció i una velocitat de propagació per una ona de freqüència f (o els paràmetres k_x i k_y) es calculen els temps d'arribada relatius a cadascun dels sensors de l'array i els registres es desplacen segons aquests temps. La direcció, la velocitat de propagació i la freqüència varien en un procés iteratiu dins d'un rang de valors i amb uns increments determinats. La sortida de l'array o espectre de potència del feix (*beam power*) s'obté a partir de la suma dels senyals desplaçats en el domini de la freqüència per a cada direcció i velocitat de prova. Un màxim en aquesta sortida proporciona una estimació de la velocitat i l'azimut de les ones enregistrades. A la pràctica, la cerca es realitza en un *grid* en el domini del nombre d'ona (k_x - k_y) o en el de lentitud (s_x - s_y) per una banda estreta de freqüències i una finestra temporal (Figura 5).

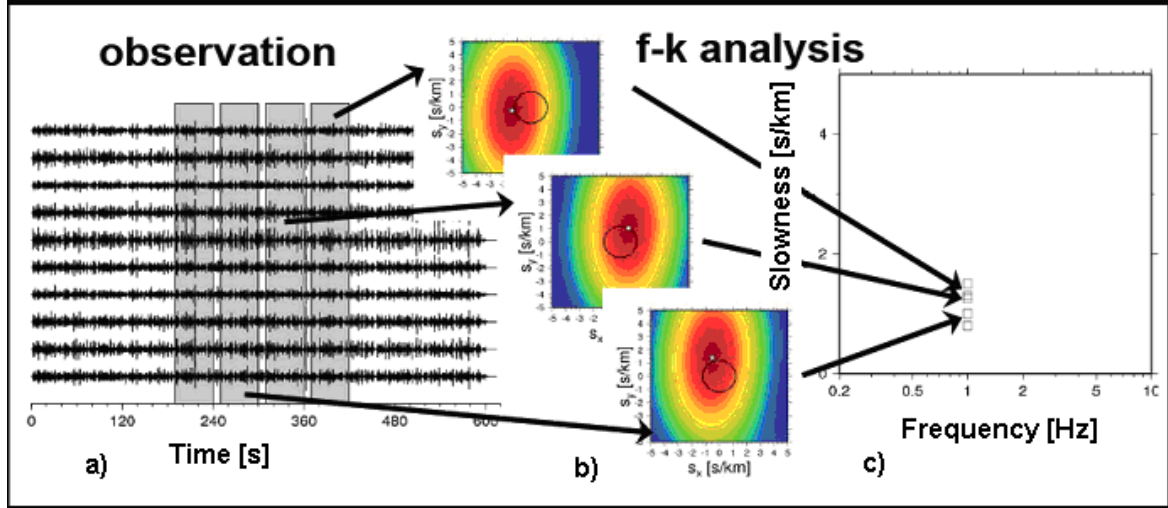


Figura 5: Esquema de la tècnica grid per obtenir la corba de dispersió. a) Senyals enregistrades amb quatre finestres temporals marcades. b) Espectre de potència del feix en el domini de la lentitud per una freqüència determinada. c) Representació de la lentitud on es troba el màxim de l'espectre per cada freqüència. (Figura de Matthias Ohrnberger – Curs de Ambient Vibrations).

3.2.2 Mètode d'autocorrelació espacial SPAC (Aki, 1957; Ohori et al., 2002; Roberts i Asten, 2004)

Una altra possibilitat per analitzar els senyals enregistrats és el mètode d'autocorrelació espacial que suposa que la distribució de fonts del camp d'ones del soroll sísmic és aleatòria en el temps i en l'espai. Aki (1957) demostrà que els quocients d'autocorrelació dels senyals enregistrats en dos sensors són funcions de les velocitats de fase i de l'obertura de l'array. A la pràctica, s'utilitza la mitjana dels quocients d'autocorrelació per parelles de sensors separats una distància r per a tots els azimuts ($\bar{\rho}(r, \omega)$) (Figura 6). Així:

$$\bar{\rho}(r, \omega) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right)$$

On J_0 és la funció de Bessel d'ordre zero. $c(\omega)$ és la velocitat de fase per una determinada freqüència ω . Aki proposà l'ús de configuracions circulars d'arrays per calcular els coeficients $\bar{\rho}(r, \omega)$ per a diferents radis i freqüències determinades i d'aquesta manera obtenir $c(\omega)$.

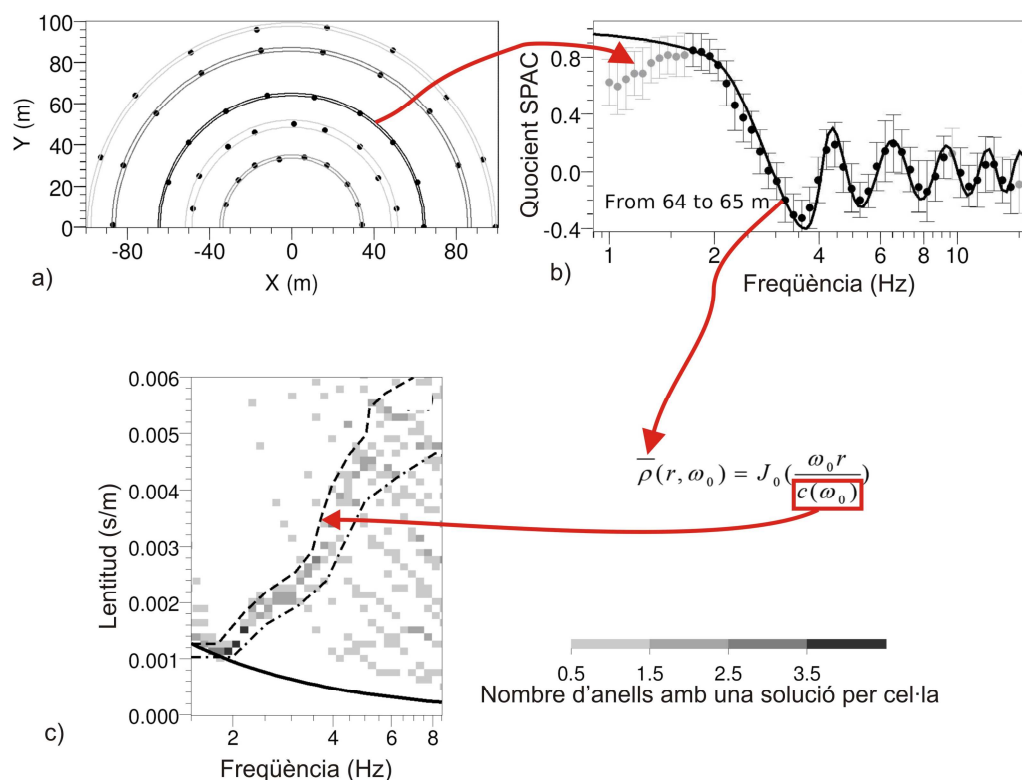


Figura 6: a) Diagrama representant distància – azimuth entre dues estacions. Cada punt representa una parella d'estacions. Les parelles de cercles amb el mateix to grisenc representen els límits seleccionats pels diferents anells. b) Exemple de corba d'autocorrelació corresponent a l'anell definit pels radis 64 a 65 m (punts amb barra d'error). La línia contínua correspon a la funció de Bessel. c) Diagrama representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació i la relació mostrada a la figura i introduïda en el text.

Bettig et al. (2001) va presentar una modificació de l'idea original del mètode SPAC que permet aplicar aquest mètode per configuracions d'array menys ideals que les proposades per Aki. Per qualsevol geometria, els coeficients d'autocorrelació es calculen a partir de parelles d'estacions amb separacions r entre $r_1 \leq r \leq r_2$ en comptes d'un radi fix r . L'avantatge d'aplicar aquesta modificació és que una mateixa configuració d'array és adient tant pel mètode FK com pel de SPAC.

3.2.3 Inversió

La inversió de les corbes espectrals (corba de dispersió o d'autocorrelació) es realitza a partir de l'algorisme del veí més proper (Nearest Neighbor Algorithm) desenvolupat per Wathelet et al. (2004). Les corbes d'autocorrelació normalment es transformen a corba de dispersió com a pas previ per la inversió. Tanmateix, Wathelet et al. (2005) presenten una

adaptació del procés d'inversió per obtenir el perfil V_s directament de les corbes d'autocorrelació.

4 Treball de camp i processat

Els treballs de camp es van dur a terme durant els mesos de juny i juliol de 2010. Es van realitzar mesures puntuals de soroll sísmic per aplicar la tècnica del quocient espectral H/V a les poblacions de Vielha, Les, Bossòst i Arties. Mentre que les mesures en array es van fer a Vielha, Les, Bossòst, Arties i Vaqueira.

4.1 Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic

S'ha mesurat el soroll sísmic en 98 emplaçaments (24 a la població de Les, 17 a Bossòst, 50 a Vielha i 7 a Arties) amb l'objectiu d'aplicar la tècnica del quocient espectral H/V. A les Figura 7, Figura 8, Figura 9 i Figura 10 es mostren, respectivament, la situació dels emplaçaments on es van realitzar mesures de soroll sísmic a les poblacions de Les, Bossòst, Vielha i Arties. En general, les mesures s'han organitzant en perfils longitudinals i transversals a la vall de cara a facilitar la interpretació dels resultats. A les taules de l'annex s'indiquen les coordenades UTM d'aquests emplaçaments.

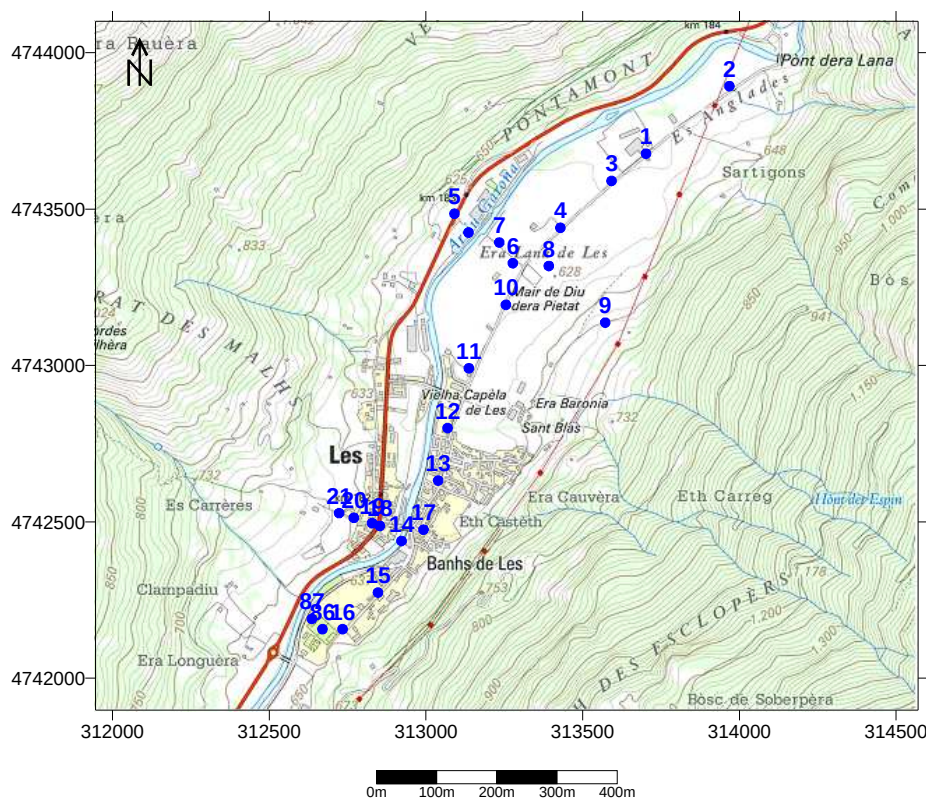


Figura 7: Localització de les mesures de soroll sísmic (punts blaus) realitzades a la població de Les (ICC, 2010).

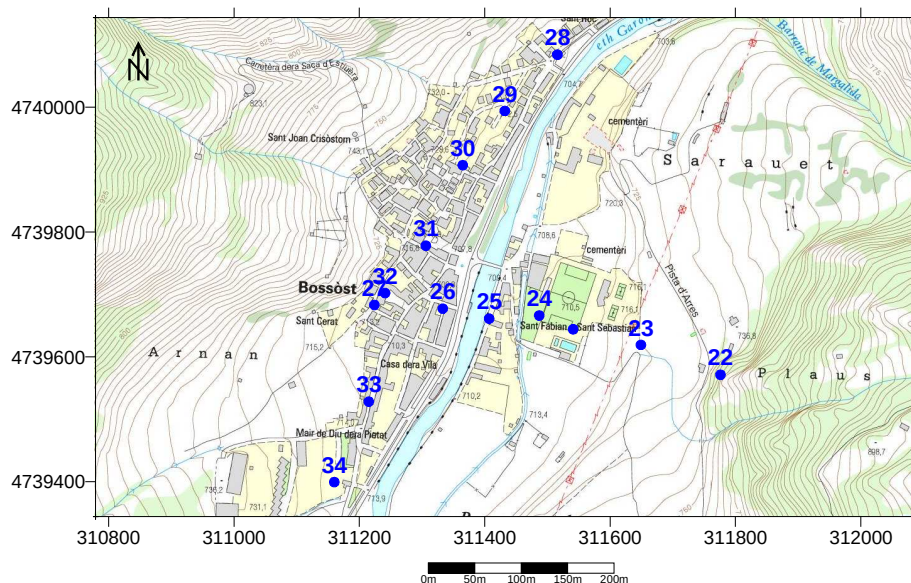


Figura 8: Localització de les mesures de soroll sísmic (punts blaus) realitzades a la població de Bossòst (ICC, 2010).

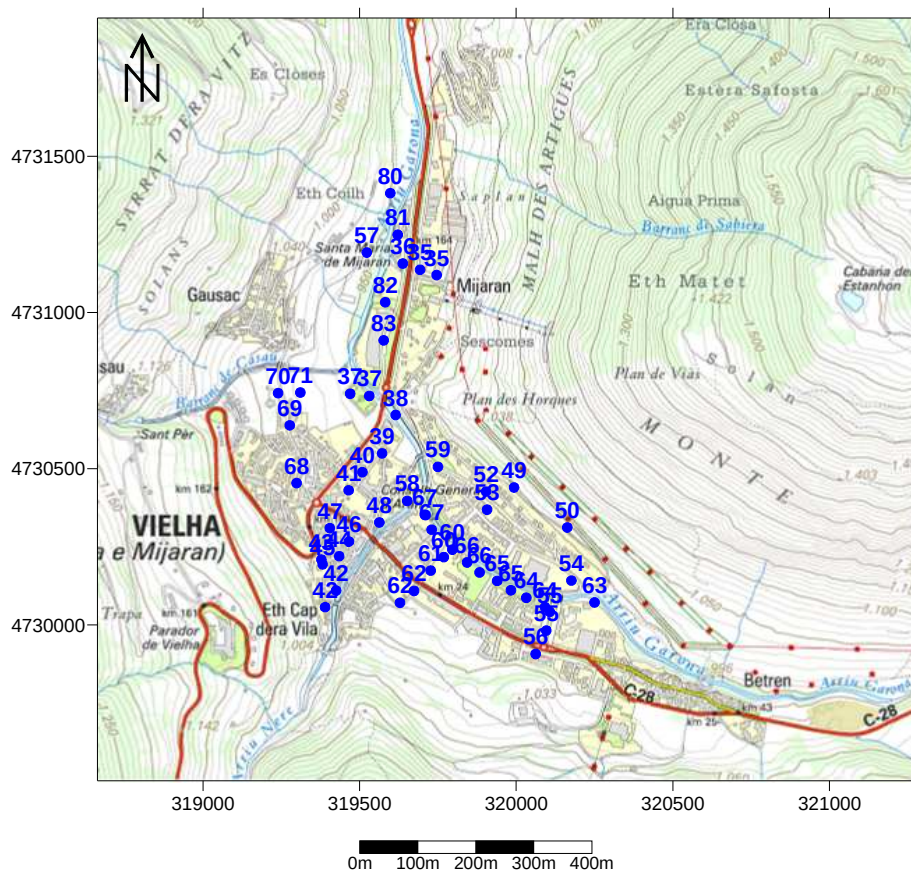


Figura 9: Localització de les mesures de soroll sísmic (punts blaus) realitzades a la població de Vielha (ICC, 2010).

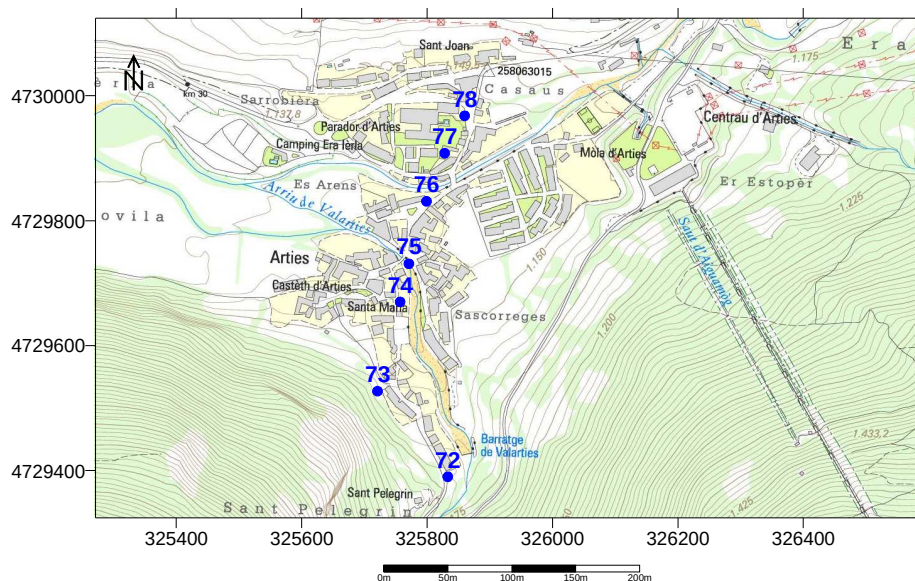


Figura 10: Localització de les mesures de soroll sísmic (punts blaus) realitzades a la població d'Arties (ICC, 2010).

Les mesures de soroll sísmic s'han realitzat amb un equip CityShark, format per un digitalitzador de la casa Leas (Figura 11, esquerra) i un sismòmetre triaxial Lennartz de 5 segons (Figura 11, dreta). L'equip treballa amb un període de mostreig que es pot seleccionar entre 100 i 1000 mostres per segon. Disposa de sis canals on s'hi connecten dos sismòmetres triaxials amb una separació de fins a 50 metres, de manera que es poden fer les mesures de soroll sísmic en dos emplaçaments simultàniament. L'equip disposa de diferents guanys que permeten treballar amb la màxima resolució sense arribar a la saturació.



Figura 11: Equip de mesura de soroll sísmic: digitalitzador CityShark (esquerra) i sismòmetre Lennartz 5s. (dreta).

En tots els emplaçaments la longitud de registre ha estat de 600 segons i s'han adquirit les dades amb un interval de mostreig de 100Hz. En general, s'ha treballat amb guanys de 512 i 1024. A la Figura 12 es mostren dues fotografies preses durant la mesura de soroll sísmic en dos emplaçaments de les poblacions de Bossòst i Vielha.

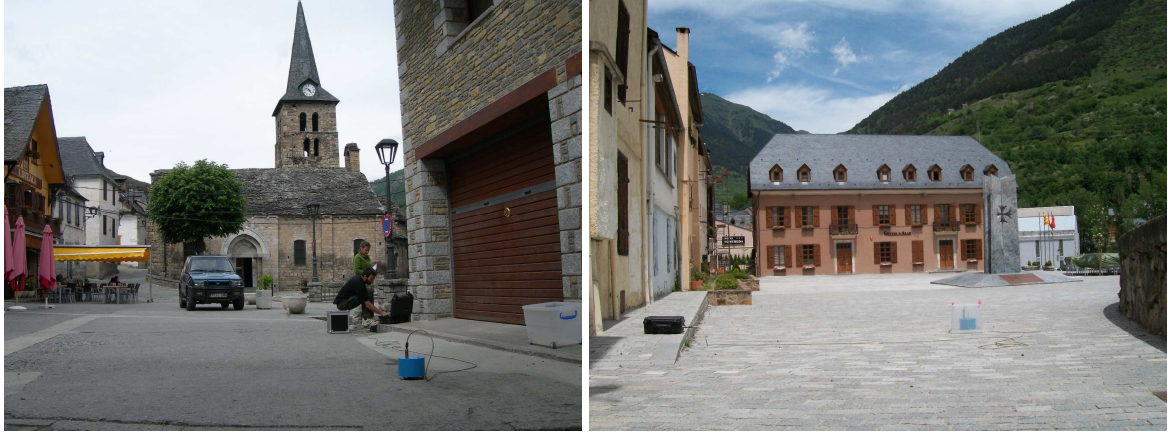


Figura 12: Fotografies de diferents emplaçaments on s'ha mesurat el soroll sísmic: punt 31 a la població de Bossòst (esquerra) i punt 48 a la població de Vielha (dreta).

4.2 Tècnica d'array

S'han realitzat mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array en 8 emplaçaments (2 a la població de Les, 2 a Bossòst, 2 a Vielha, 1 a Arties i 1 a Vaqueira). A la Taula 1 s'indiquen les coordenades UTM del centre d'aquests emplaçaments.

Taula 1: Coordenades UTM del sensor central i radis interior i exterior dels arrays realitzats a la Val d'Aran.

Nom array	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)	Radi interior (m)	Radi exterior (m)
Les camp de futbol	312667	4742160	15	30
Les	313427	4743389	15	30
Bossòst camp de futbol	311533	4739696	15	30
Bossòst	310819	4738737	25	50
Vielha pàrking	319856	4730156	15	30
Vielha camp de futbol	319503	4730732	14	28
Arties	325227	4729790	23	46
Vaqueira	330426	4729771	25	50

A la Taula 2 es poden veure els paràmetres d'adquisició de soroll sísmic amb la tècnica d'array i a la Taula 3 les característiques de la instrumentació emprada.

Taula 2: Paràmetres d'adquisició de les mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array a la Val d'Aran.

Paràmetres	
Nombre de sensors	11
Nombre de registres	2
Interval de mostreig (ms)	8
Longitud registre (minuts)	16

Taula 3: Característiques de la instrumentació sísmica emprada en la tècnica d'array a la Val d'Aran.

Sismògraf	Summit DMT de 48 canals
Geòfons	11 Sensors Mark L4C 1Hz
Font d'energia	Soroll sísmic
Cables sísmics	Cables de 50m
Equip addicional	Cintes mètriques, bateries i caixa de connexions amb 11 sortides i amb entrada dels cables dels sensors Mark.

A la Figura 13 es mostra la disposició dels sensors utilitzada en els arrays realitzats a la Val d'Aran. Els sensors es disposen formant dos cercles concèntrics al voltant d'un sensor central (S001), de manera que el radi del cercle exterior és el doble del radi del cercle interior. La longitud dels radis de l'array (Taula 1) depèn de les dimensions de l'emplaçament on es fan mesures. La Figura 14 mostra un dels sensors Mark L4C 1Hz utilitzat en les tècniques d'array, junt amb el sistema d'adquisició. A la Figura 15 s'observen les panoràmiques de les mesures en array al camp de futbol de Les i al pàrking de Vielha.

Per altra banda, en diferents punts dels arrays s'ha calculat la freqüència fonamental del sòl amb la tècnica del quocient espectral H/V amb l'objectiu de validar la hipòtesis de capes de sòls subhorizontals. Per a la mesura i processat del soroll sísmic s'ha seguit la mateixa metodologia descrita a l'apartat 4.1.

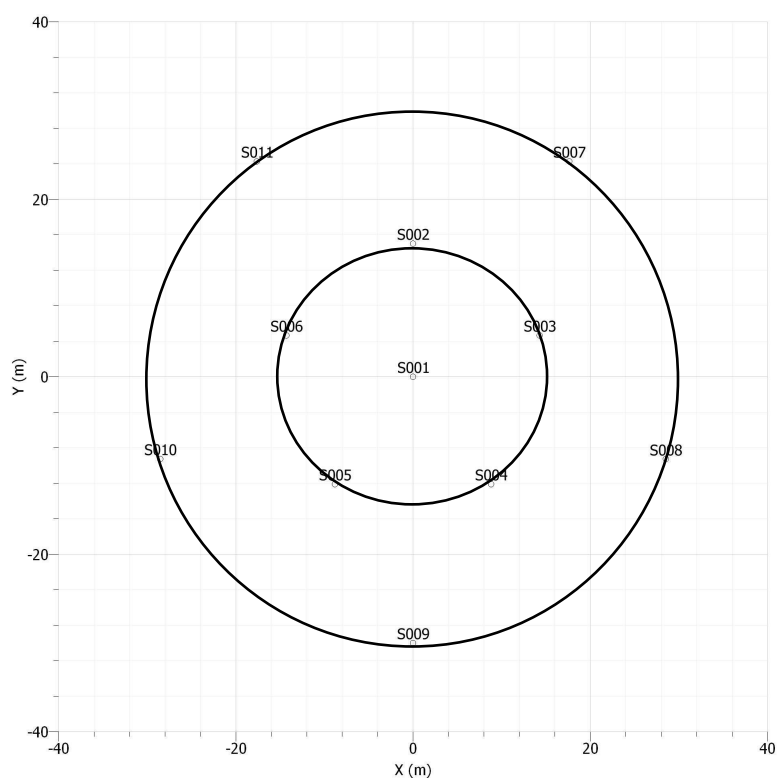


Figura 13: Disposició dels sensors utilitzada en les mesures amb la tècnica array realitzades a la Val d'Aran. La longitud dels radis dels cercles depèn de les dimensions de cada emplaçament.

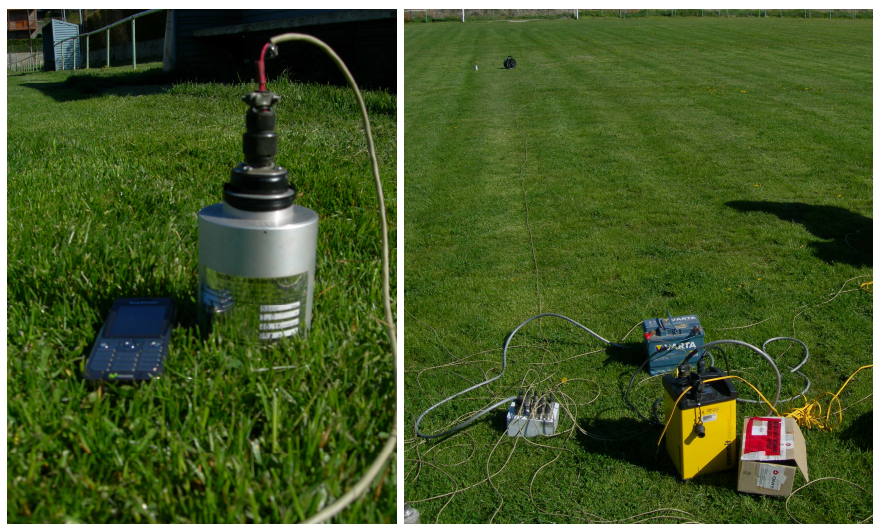


Figura 14: Sensor Mark L4C 1Hz utilitzat en les tècniques d'array i MASW (esquerra), sistema d'adquisició de dades sísmiques (dreta).



Figura 15: Panoràmiques de les mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array: Les camp de futbol (esquerra) i Vielha pàrking (dreta).

5 Resultats i interpretació

Els resultats i la interpretació de les dues tècniques, quocient espectral H/V i array, es mostren per separat.

5.1 Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic

5.1.1 Les

A la Figura 16 es mostren els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en el càlcul del quocient espectral H/V de les mesures de soroll sísmic realitzades en els emplaçaments de la població de Les. El valor mínim de la freqüència fonamental del sòl és de 1,7Hz, correspon a l'emplaçament 3. Mentre que el valor màxim és de 8,1Hz, correspon a l'emplaçament 15. Els valors més baixos de la freqüència fonamental del sòl es troben al nord de la població de Les, que correspon a la part més ampla de la cubeta, on s'espera que el gruix de la capa de sediments sigui màxim. Els valors més alts s'observen al nucli urbà de Les, on la vall es fa més estreta, i varien entre 2,3 i 8,1Hz. Tot i que alguns punts de mesura estaven situats a prop dels vessants de la vall, no s'observen emplaçaments ubicats sobre roca o sobre sòls on l'espessor és negligible.

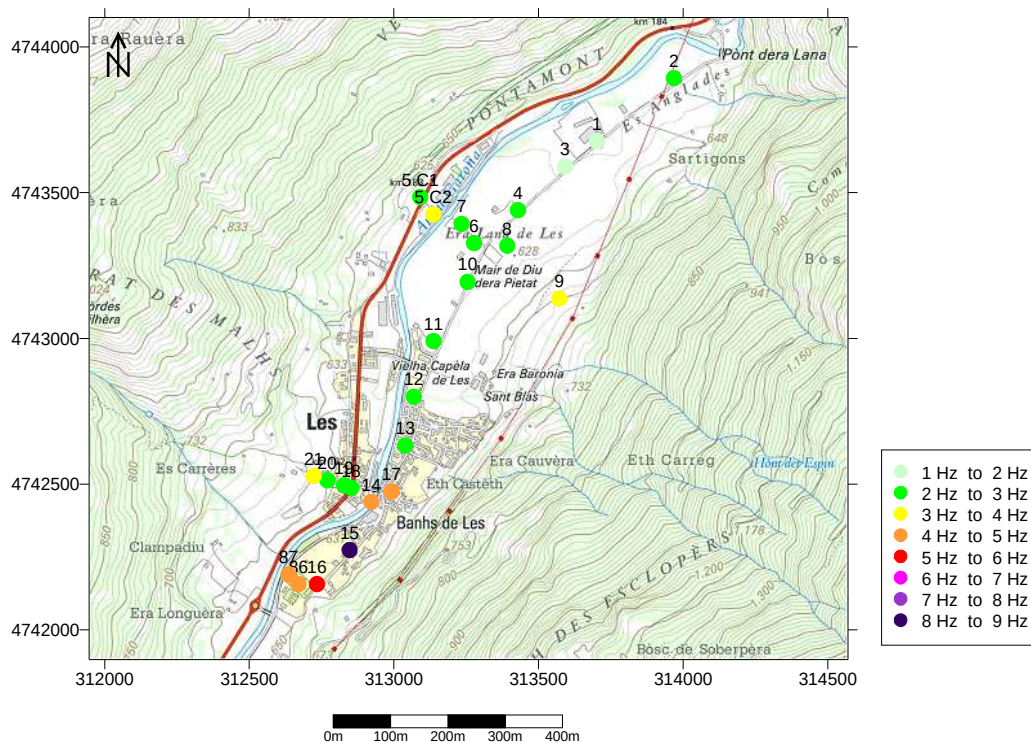


Figura 16: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts als emplaçaments estudiats a Les.

5.1.2 Bossòst

A la Figura 17 es mostren els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en el càlcul del quocient espectral H/V de les mesures de soroll sísmic realitzades en els emplaçaments de la població de Bossòst. El valor mínim de la freqüència fonamental del sòl és de 2,1Hz que correspon a l'emplaçament 85. Mentre que el valor màxim és de 7,7Hz que correspon a l'emplaçament 22. Els valors més baixos de la freqüència fonamental del sòl es troben a la part central de la cubeta, a l'est del nucli urbà de Bossòst, on s'espera que el gruix de la capa de sediments sigui màxim. Els valors de la freqüència fonamental del sòl al nucli urbà de Bossòst varien entre 4 i 6Hz. A l'emplaçament 28, situat al nord del nucli urbà on la cubeta es tanca, s'obté un quocient H/V sense pics significatius, registre característic de punts ubicats sobre roca o sobre sòls on l'espessor és negligible.

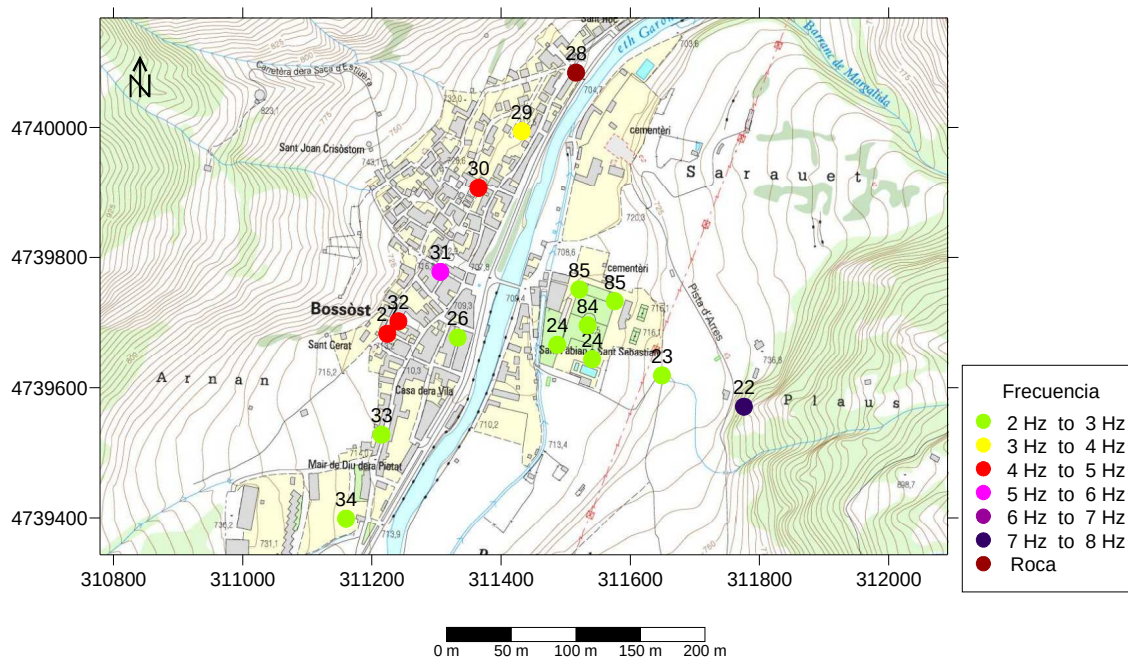


Figura 17: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts als emplaçaments estudiats a la població de Bossòst.

5.1.3 Vielha

A la Figura 18 es mostren els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en el càlcul del quocient espectral H/V de les mesures de soroll sísmic realitzades en els emplaçaments de la població de Vielha. El valor mínim de la freqüència fonamental del

sòl és de 2,8Hz que correspon a l'emplaçament 40 situat al centre del nucli urbà de Vielha. Mentre que el valor màxim és de 9,0Hz que correspon a l'emplaçament 82 ubicat a l'extrem nord de la zona. S'observa com els valors més baixos de la freqüència fonamental del sòl es troben al centre de la cubeta, on s'espera que el gruix de la capa de sediments sigui màxima. A mesura que ens anem apropant als vessants de la vall la freqüència fonamental va augmentant fins que trobem emplaçaments sense pics significatius i, per tant, ubicats sobre roca (representats amb un cercle de color marró). Aquest patró no es segueix al nord de Vielha on s'observen emplaçaments amb valors elevats de la freqüència fonamental del sòl (>7Hz) al centre de la vall. Aquesta disminució del recobriment respecte el centre de Vielha pot ser deguda a un procés de sobreexcavació durant l'erosió glacial al centre de la cubeta, a la intersecció entre les valls dels rius Negre i Garona.

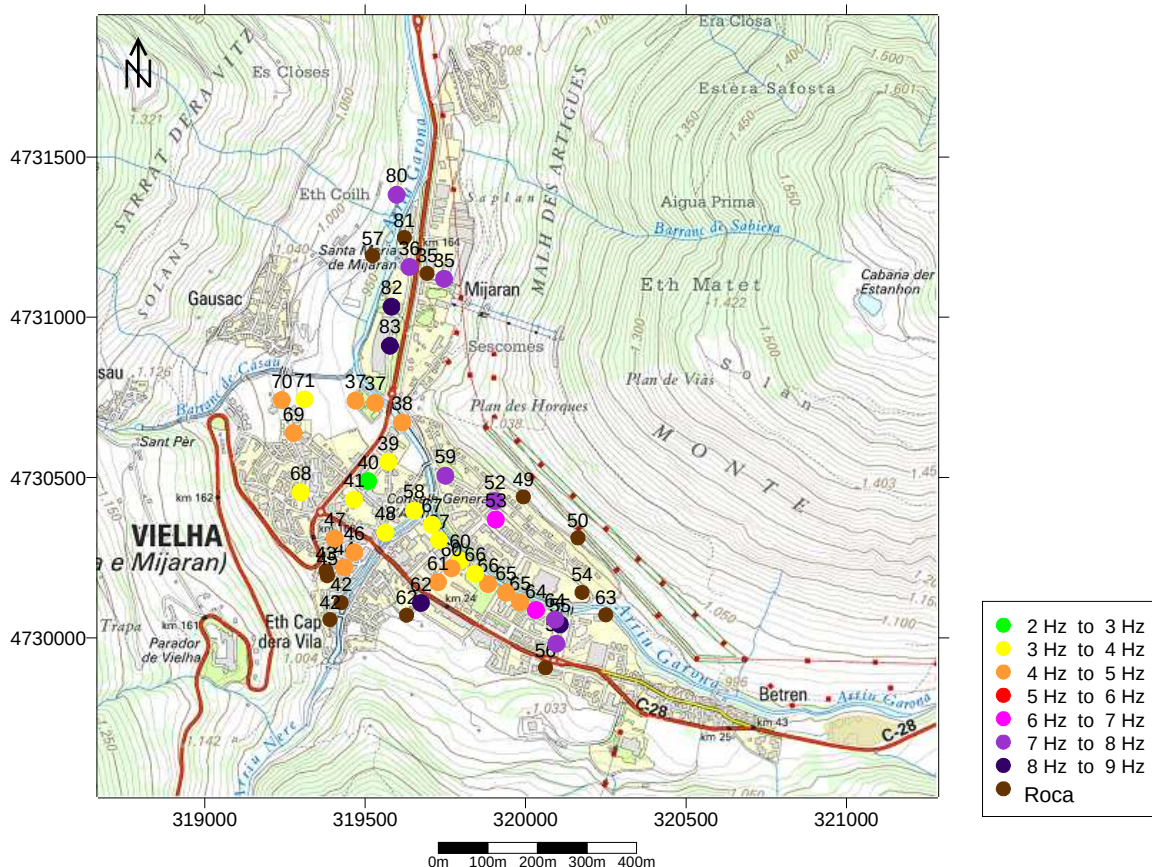


Figura 18: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts als emplaçaments estudiats a la població de Vielha.

5.1.4 Arties

A la Figura 19 es mostren els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en el càlcul del quocient espectral H/V de les mesures de soroll sísmic realitzades en els emplaçaments de la població d'Arties. El valor de la freqüència fonamental del sòl varia entre 2,8 i 7,1Hz, el mínim es troba al centre de la cubeta i el màxim s'observa al sud de la població a prop del vessant. No s'observen emplaçaments ubicats sobre roca o sobre sòls on l'espessor és negligible

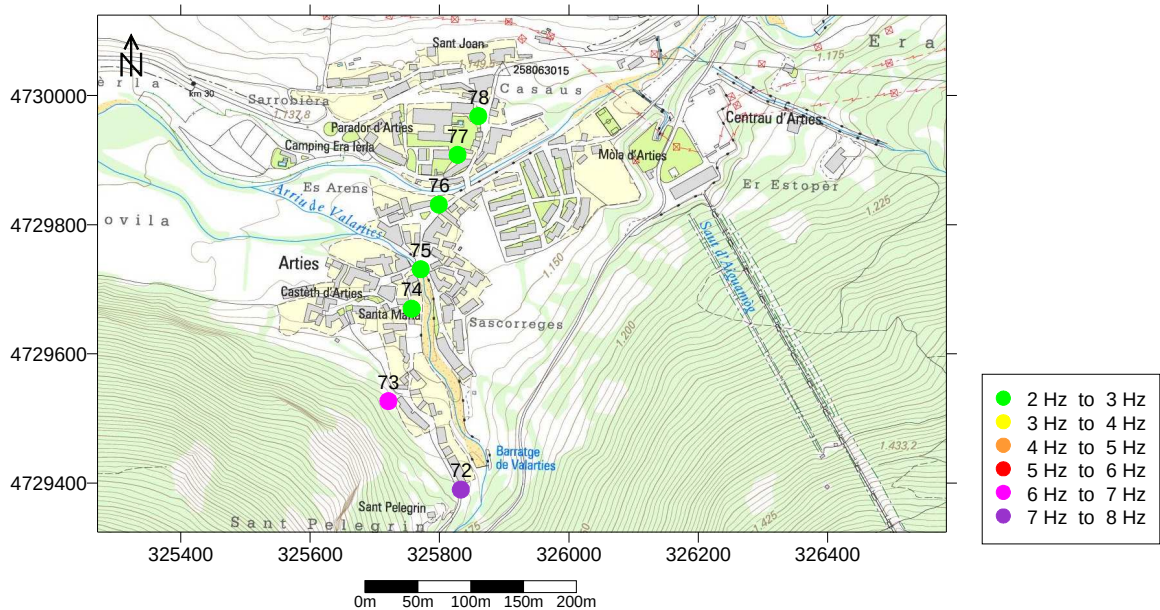


Figura 19: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts als emplaçaments estudiats a la població d'Arties.

5.2 Tècnica d'array

En aquest apartat es presenten els resultats del processat amb els mètodes FK i SPAC dels registres de soroll sísmic obtinguts amb la tècnica d'array.

5.2.1 Les, camp de futbol

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 20) mostra corbes força similars, tot i que la freqüència fonamental del sòl varia entre 4,6 i 5,6Hz i, per tant, el basament rocós presenta un lleuger cabussament.

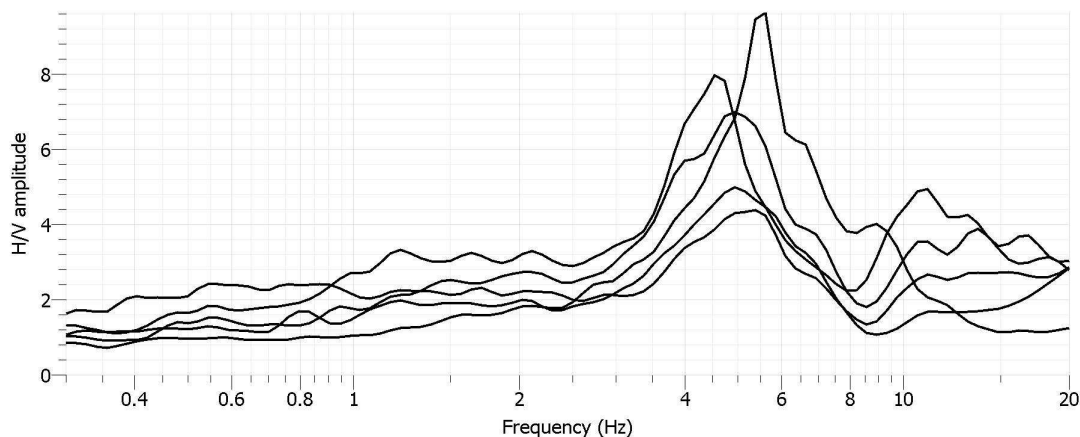


Figura 20: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array del camp de fútbol de Les.

A la Figura 21 es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Les. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 22).

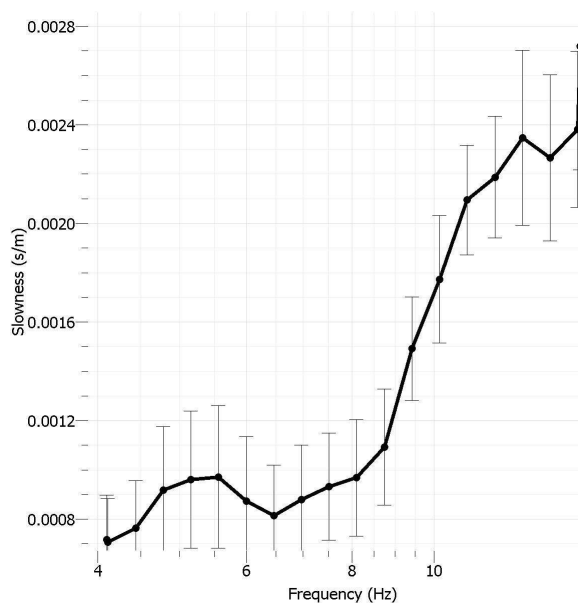


Figura 21: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Les.

En el model del perfil vertical de V_s s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,35), mostra una primera capa d'uns 20 metres amb una velocitat de 420 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1500 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

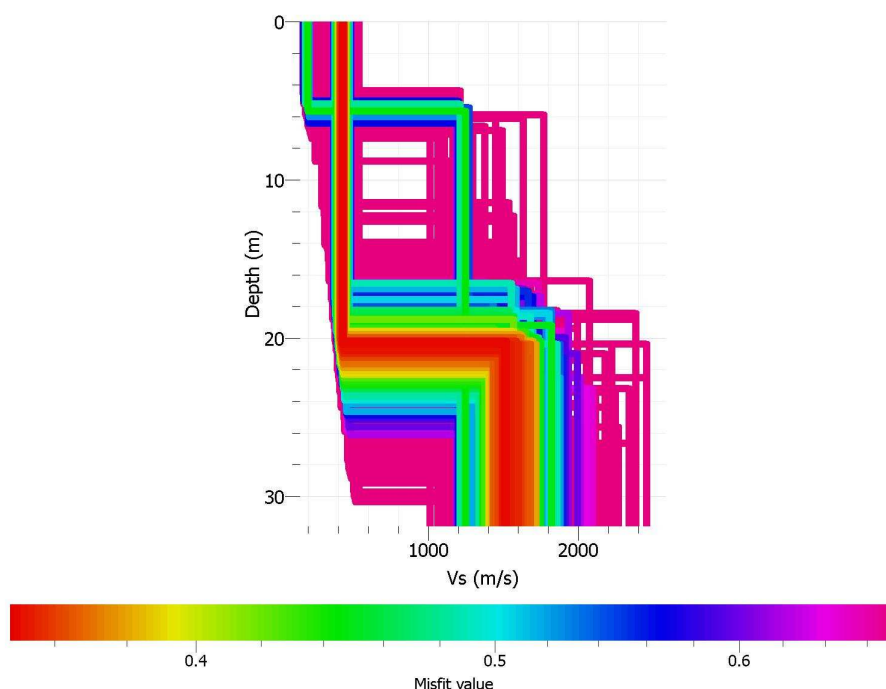


Figura 22: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda al camp de futbol de Les (misfit < 0,65).

A la Figura 23 es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 24). S'observa que l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,64) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,35). Això probablement és degut a que a l'emplaçament de l'array les fonts de soroll sísmic no envolten l'emplaçament en totes direccions, tal i com suposa el mètode SPAC, cosa que provocaria que la propagació del soroll tingués una direcció privilegiada (tal i com suposa el mètode FK).

El model del perfil vertical V_s mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,64), mostra una primera capa d'uns 19 metres amb una velocitat de 400 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 1100 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants, les principals diferències es troben en el valor de V_s del basament rocós. El model del perfil vertical de V_s obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament del camp de futbol de Les, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

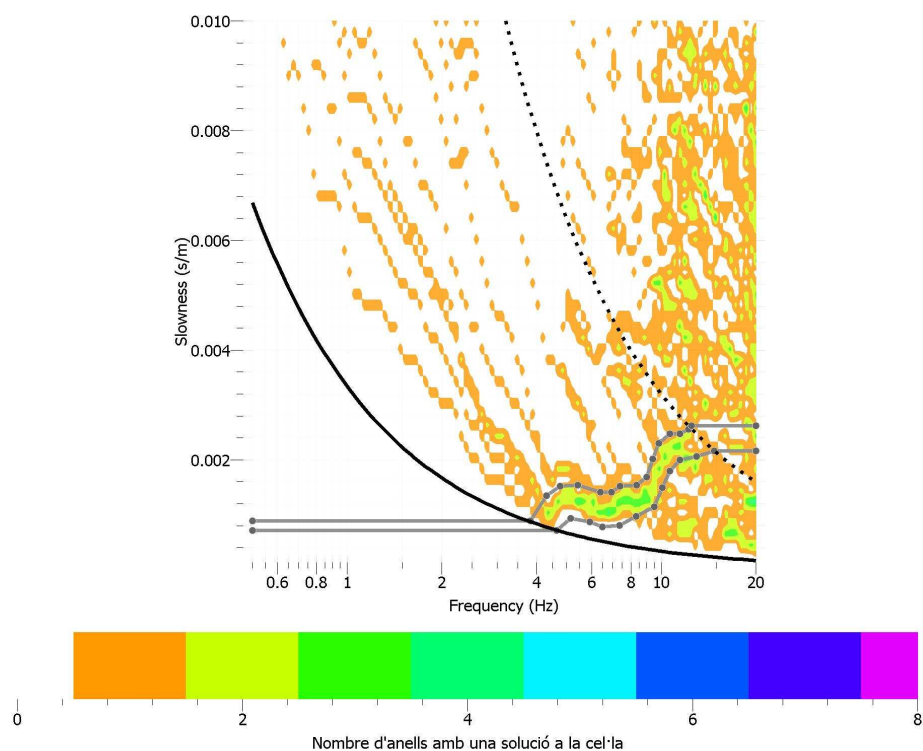


Figura 23: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

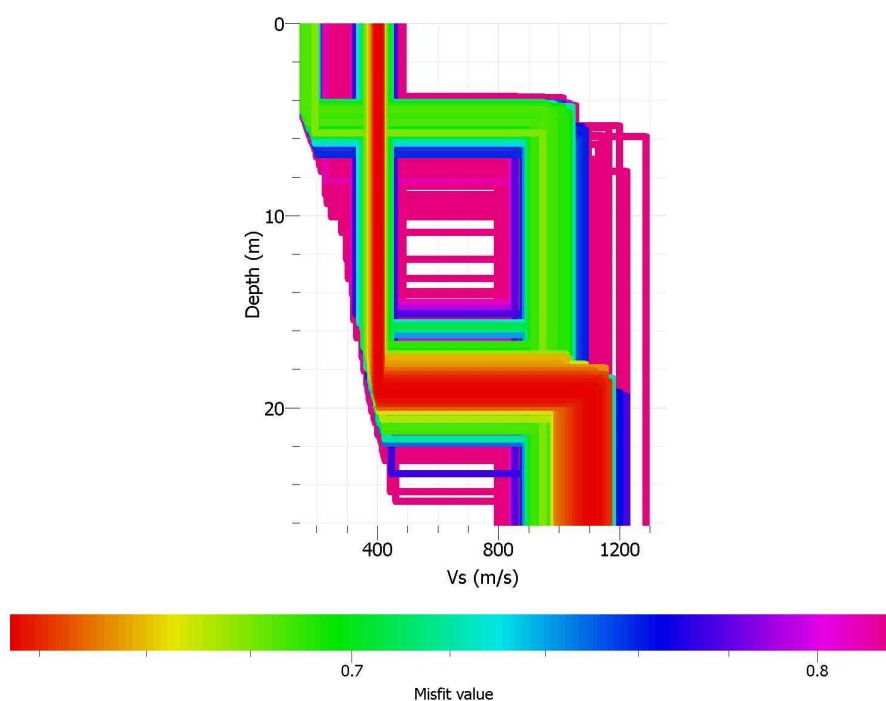


Figura 24: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda al camp de futbol de Les (misfit < 0,82).

A la Taula 4 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament, suposant que la segona capa arriba fins a, com a mínim, 30 metres de profunditat.

Taula 4: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos al camp de futbol de Les.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	420
20	420
30	553

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 5,25 Hz, que és coherent amb els resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (4,6 – 5,6 Hz).

5.2.2 Les

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 25) mostra diferències en la forma de les corbes per sota 2Hz, on la major part de registres presenten valors d'amplitud H/V per sobre de 1. De totes maneres, és probable que aquest efecte no sigui degut a l'estructura del subsòl sinó a la presència de fonts que introdueixen soroll a les components horitzontals del moviment del sòl (per exemple vent fort). La freqüència fonamental del sòl al llarg de l'array és força constant, entre 1,9 i 2,2 Hz, per tant, el basament rocós és subhoritzontal.

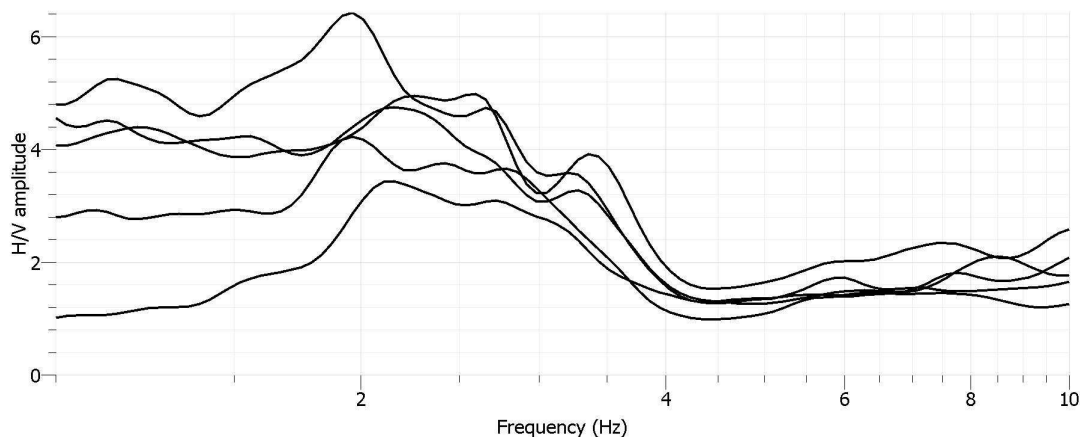


Figura 25: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array de Les.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array de Les. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 26). En el model del perfil vertical de Vs s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,23), mostra una primera capa d'uns 52 metres amb una velocitat de 530 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1700 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

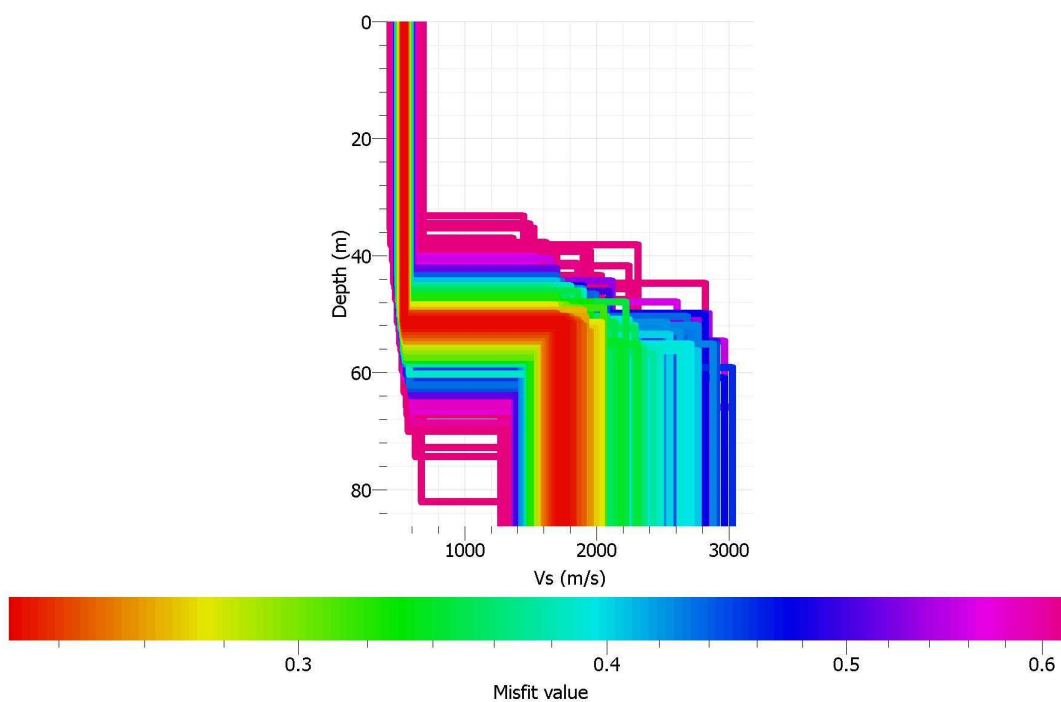


Figura 26: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a Les (misfit < 0,61).

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 27). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,87) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,23).

El model del perfil vertical Vs mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,87), mostra una primera capa d'uns 58 metres amb una velocitat de 540 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 1100 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants pel que fa a la capa de sòl tou, la principal diferència es troba en el valor de Vs del basament rocós. El model del perfil vertical de Vs obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament de Les, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

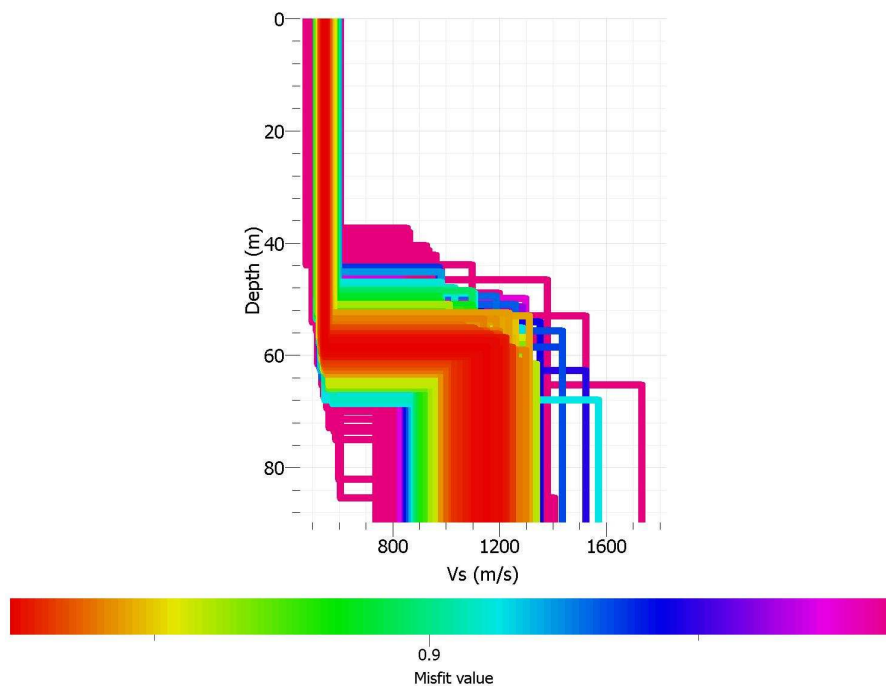


Figura 27: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a Les (misfit < 0,93).

A la Taula 5 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament, suposant que la segona capa arriba fins a, com a mínim, 30 metres de profunditat.

Taula 5: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos a Les.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	530
20	530
30	530

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és de 2,5 Hz, que és lleugerament superior als resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (1,9 – 2,2 Hz).

5.2.3 Bossòst, camp de futbol

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 28) mostra que la freqüència fonamental del sòl és constant, al voltant de 2,2 Hz, i, per tant, el basament rocós és subhoritzontal.

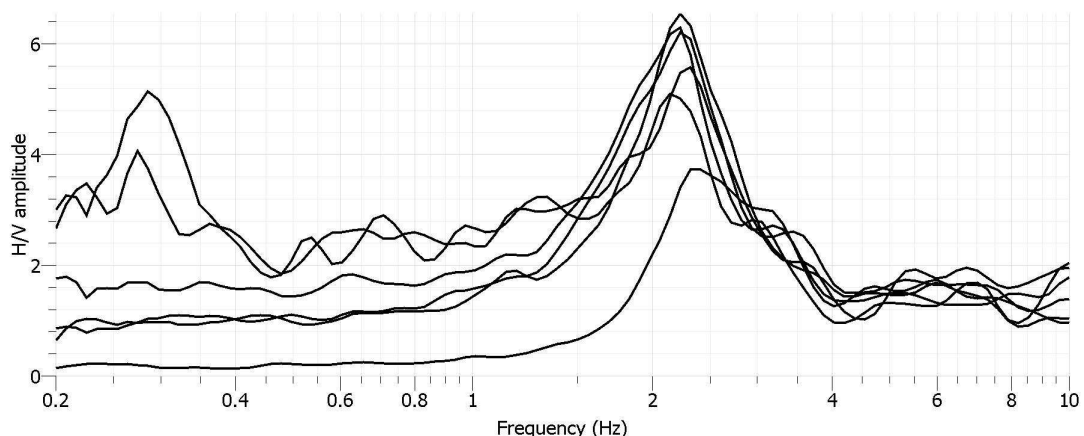


Figura 28: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array del camp de futbol de Bossòst.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Bossòst. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 29). En el model del perfil vertical de Vs s'hi identifiquen tres capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,64), mostra una primera capa d'uns 9 metres amb una velocitat de 300 m/s. Per sota d'aquesta s'observa una capa de 39 metres de gruix i una velocitat de 525 m/s, i finalment una altra capa amb una velocitat aproximada de 2000 m/s. Probablement en aquest emplaçament trobem dues capes de rebliment quaternari, la superior menys compactada que l'inferior, i per sota d'aquestes el basament rocós.

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 30). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,81) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,64).

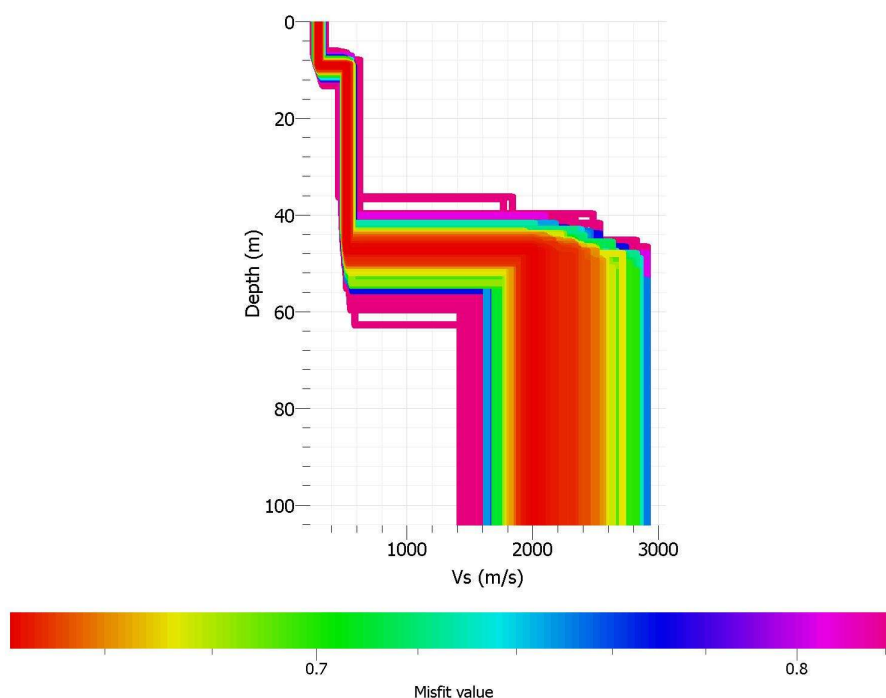


Figura 29: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda al camp de futbol de Bossòst (misfit < 0,82).

El model del perfil vertical Vs mostra tres capes (Figura 30). La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,81), mostra una primera capa d'uns 8 metres amb una velocitat que varia entre 150 i 450 m/s. Per sota d'aquesta s'observa una capa de 34 metres de gruix i una velocitat aproximada de 500 m/s, i finalment una darrera capa d'uns 950 m/s. En aquest cas, els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC presenten diferències importants, sobretot pel que fa a la velocitat de propagació de les ones de cisalla de la primera i tercera capa. En el gruix de les capes no hi ha tanta discrepància. El model del perfil vertical de Vs obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament del camp de futbol de Bossòst, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

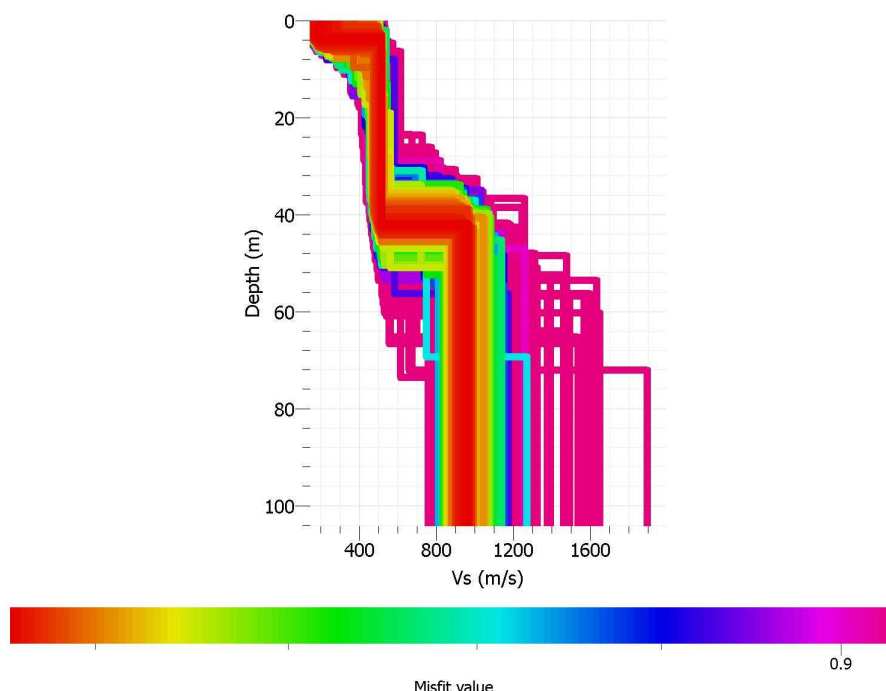


Figura 30: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda al camp de futbol de Bossòst (misfit < 0,91).

A la Taula 6 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 6: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos al camp de futbol de Bossòst.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	313
20	393
30	429

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 2,4 Hz, que és lleugerament superior als resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (2,2 Hz).

5.2.4 Bossòst

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 31) mostra corbes força similars, tot i que la freqüència fonamental del sòl varia entre 3,7 i 4,5 Hz i, per tant, el basament rocós presenta un lleuger cabussament.

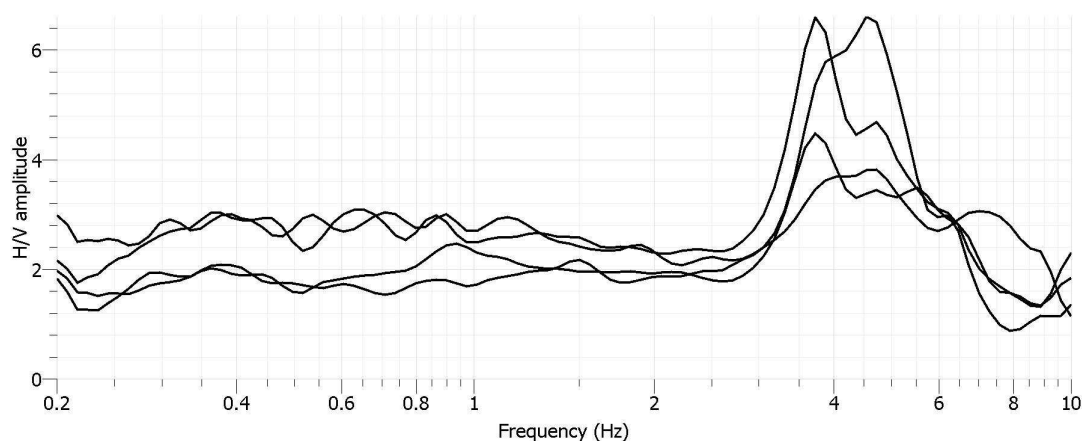


Figura 31: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array de Bossòst.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array de Bossòst. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la

velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 32). En el model del perfil vertical de Vs s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,24), mostra una primera capa d'uns 32 metres amb una velocitat de 560 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1600 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

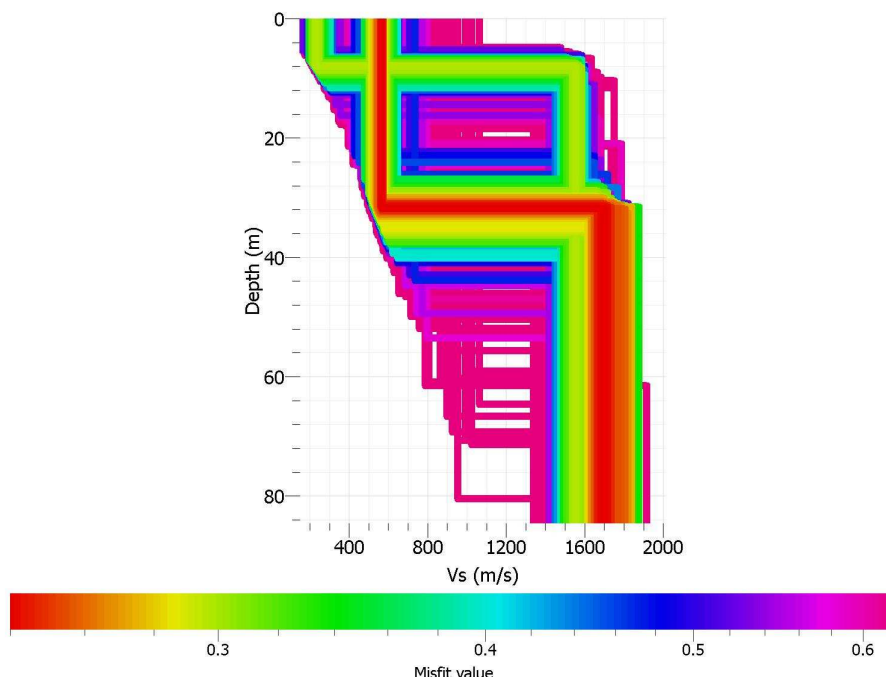


Figura 32: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a Bossòst (misfit < 0,62).

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 33). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,94) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,24).

El model del perfil vertical Vs mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,94), mostra una primera capa d'uns 24 metres amb una velocitat de 460 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 1500 m/s. En aquest cas els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC presenten diferències importants,

tant pel que fa al gruix de la capa de sòls com a la velocitat de propagació de les ones de cisalla. El model del perfil vertical de V_s obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament de Bossòst, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

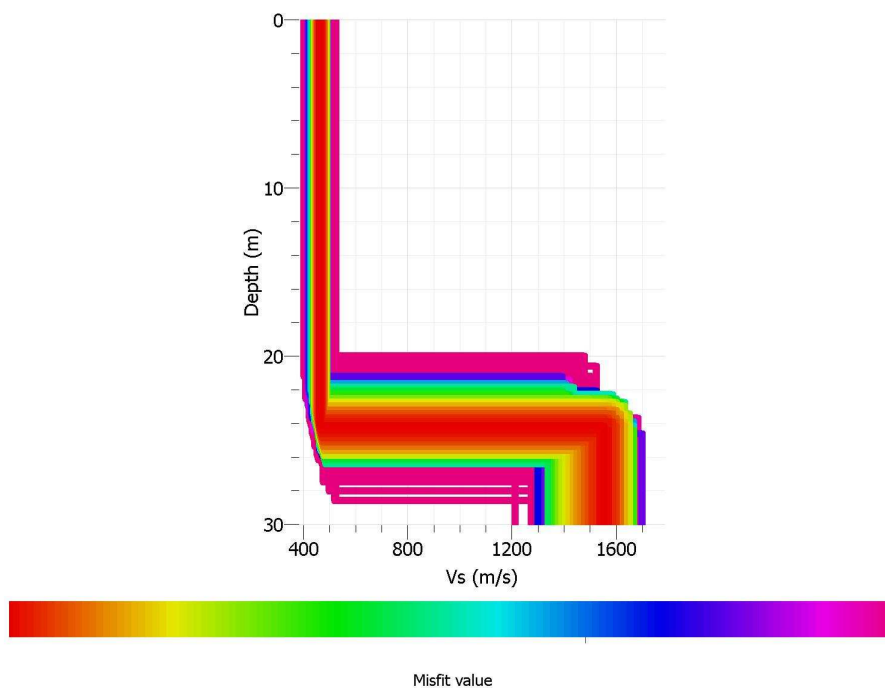


Figura 33: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a Bossòst (misfit < 0,98).

A la Taula 7 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 7: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos a Bossòst.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	560
20	560
30	560

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental

que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 4,4 Hz, que és coherent amb els resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (3,7 – 4,5 Hz).

5.2.5 Vielha pàrking

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 34) mostra corbes força similars, tot i que la freqüència fonamental del sòl varia entre 4,0 i 6,3 Hz i, per tant, el basament rocós presenta cabussament.

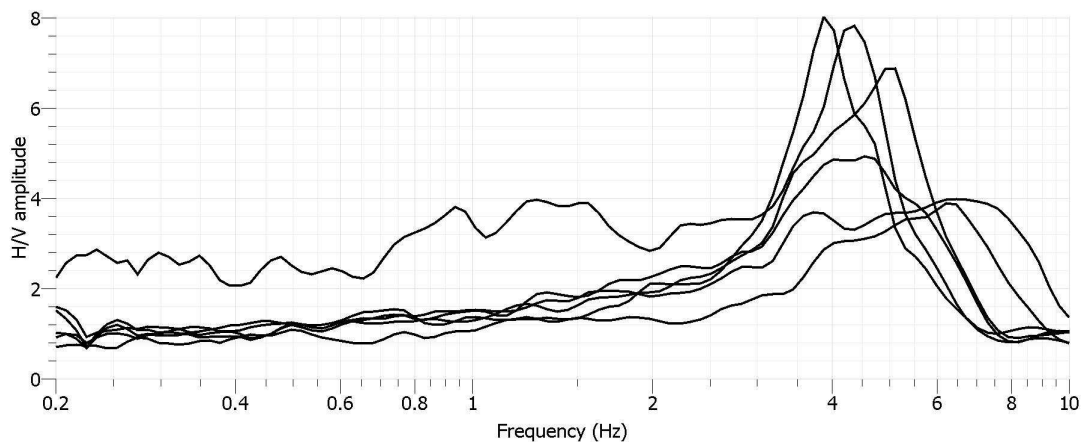


Figura 34: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array del pàrking de Vielha.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array del pàrking de Vielha. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 35). En el model del perfil vertical de Vs s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,30), mostra una primera capa d'uns 18 metres amb una velocitat de 325 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1300 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

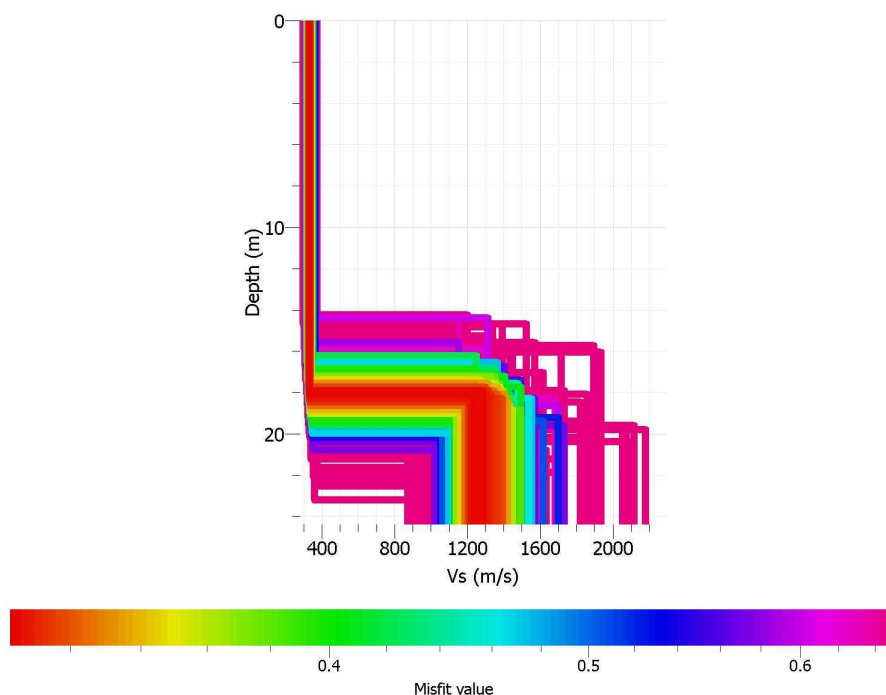


Figura 35: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda al pàrking de Vielha (misfit < 0,65).

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 36). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,63) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,30).

El model del perfil vertical V_s mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,63), mostra una primera capa d'uns 19 metres amb una velocitat de 350 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 800 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants, la principals diferències es troben en el valor de V_s del basament rocós. El model del perfil vertical de V_s obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament del pàrking de Vielha, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

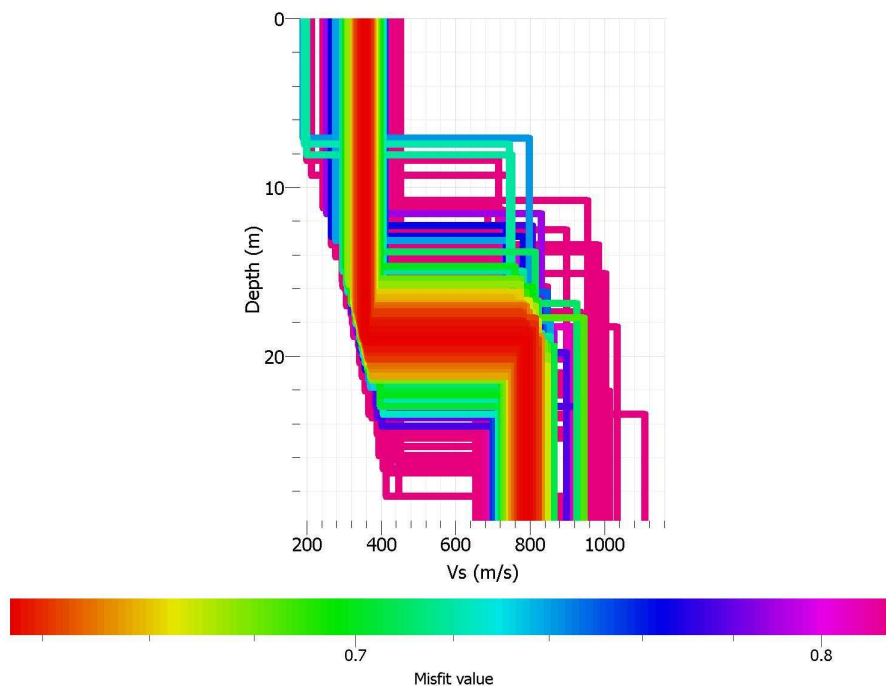


Figura 36: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda al pàrking de Vielha (misfit < 0,82).

A la Taula 8 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 8: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos al pàrking de Vielha.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	325
20	351
30	464

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 4,5 Hz, que és coherent amb els resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (4,0 – 6,3 Hz).

5.2.6 Vielha, camp de futbol

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 37) mostra corbes força similars, tot i que la freqüència fonamental del sòl varia entre 3,9 i 4,4 Hz i, per tant, el basament rocós és subhoritzontal.

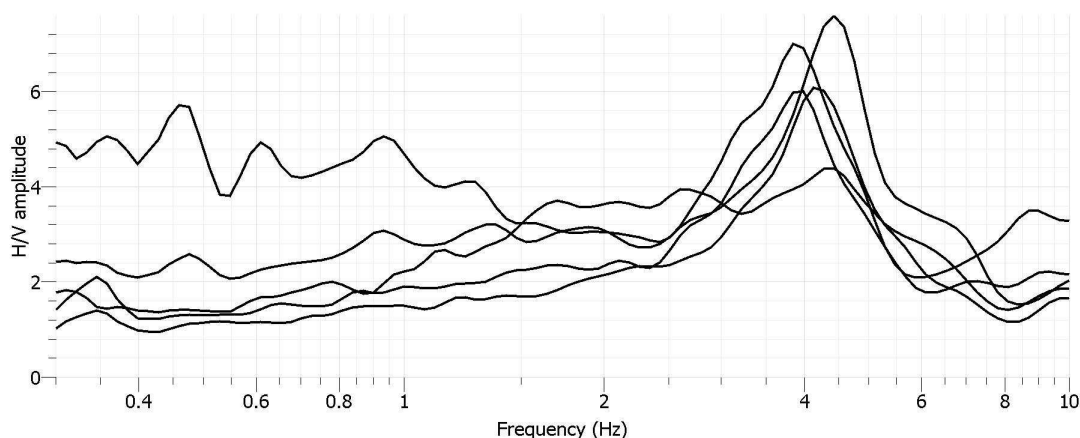


Figura 37: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array del camp de futbol de Vielha.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Vielha. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 38). En el model del perfil vertical de V_s s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,36), mostra una primera capa d'uns 20 metres amb una velocitat de 330 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1400 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 39). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,58) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,36).

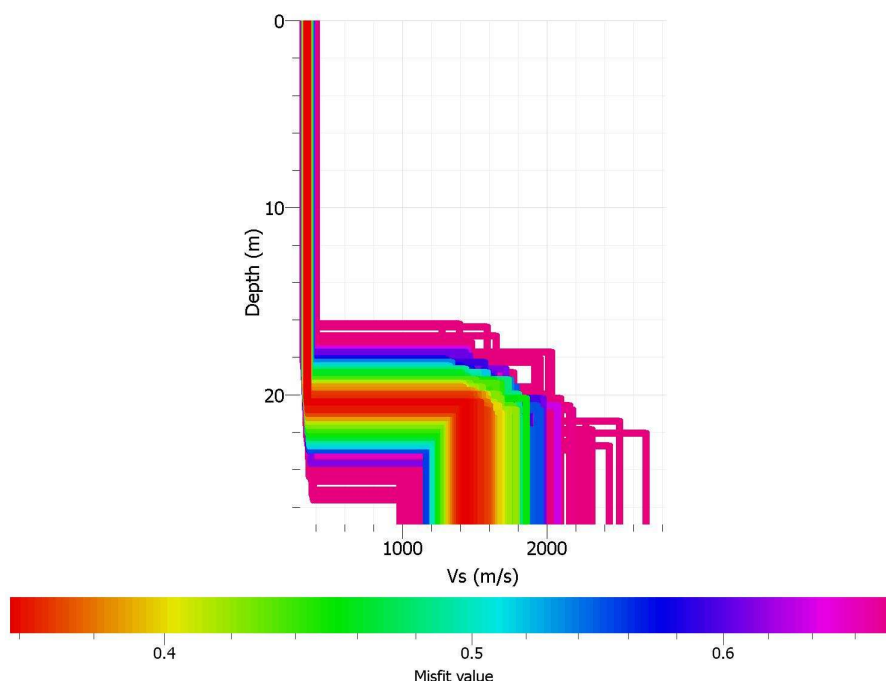


Figura 38: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda al camp de futbol de Vielha (misfit < 0,68).

El model del perfil vertical V_s mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,58), mostra una primera capa d'uns 20 metres amb una velocitat de 350 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 1000 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants, la principals diferències es troben en el valor de V_s del basament rocós. El model del perfil vertical de V_s obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament del camp de futbol de Vielha, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

A la Taula 9 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 9: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos al camp de futbol de Vielha.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	330
20	330
30	443

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 4,1 Hz, que és coherent amb els resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (3,9 – 4,4 Hz).

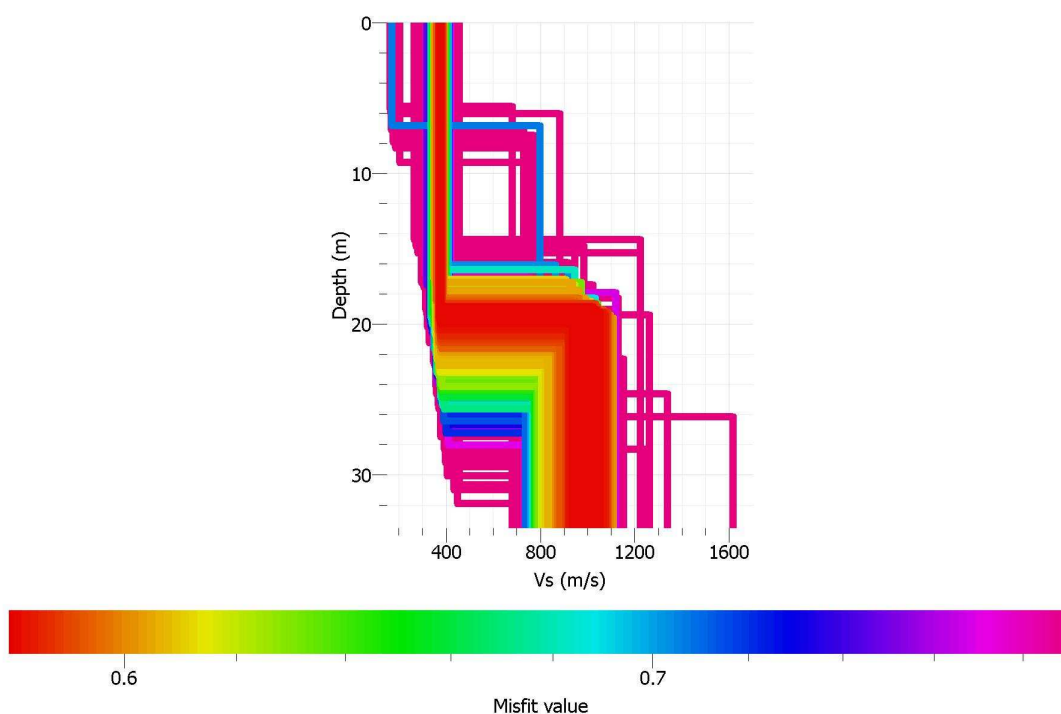


Figura 39: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda al camp de futbol de Vielha (misfit < 0,79).

5.2.7 Arties

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 40) mostra corbes força similars, tot i que la freqüència fonamental del sòl varia entre 3,6 i 3,7 Hz i, per tant, el basament rocós és subhoritzontal.

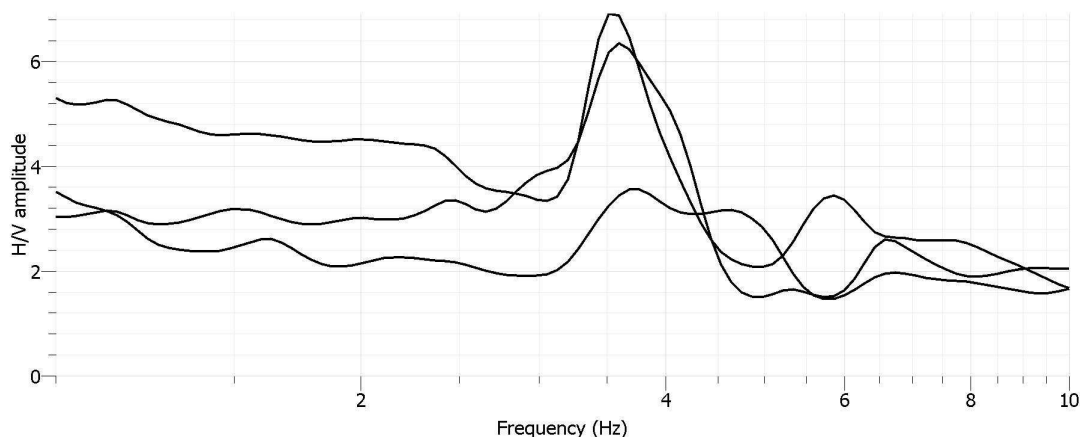


Figura 40: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array d'Arties.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array d'Arties. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 41). En el model del perfil vertical de Vs s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,33), mostra una primera capa d'uns 27 metres amb una velocitat de 415 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1000 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

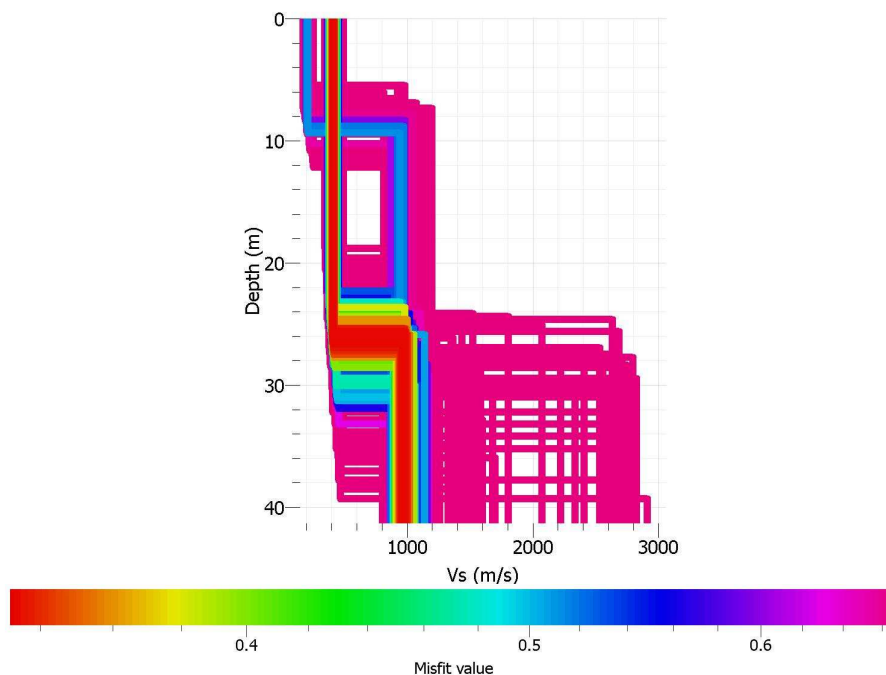


Figura 41: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a Arties (misfit < 0,67).

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 42). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 0,58) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,33).

El model del perfil vertical Vs mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 0,58), mostra una primera capa d'uns 28 metres amb una velocitat de 480 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 1000 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants, amb petites diferències en el valor de Vs de la capa de sòls. El model del perfil vertical de Vs obtingut amb el mètode FK s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament d'Arties, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

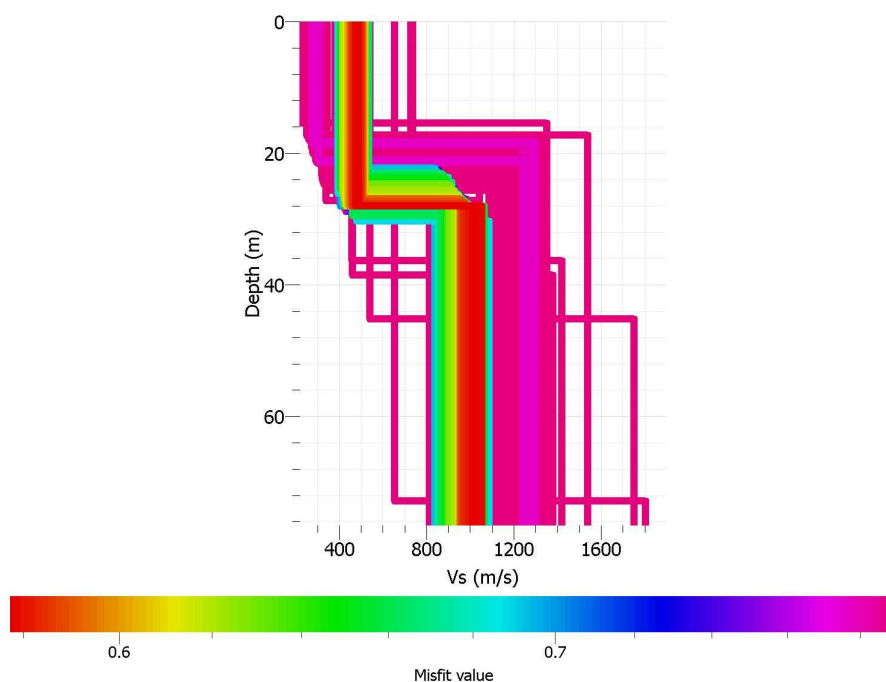


Figura 42: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a Arties (misfit < 0,79).

A la Taula 10 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 10: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos a Arties.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	415
20	415
30	441

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 3,8 Hz, que és lleugerament superior als resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (3,6 – 3,7 Hz).

5.2.8 Vaqueira

El càlcul del quocient espectral H/V al llarg de l'array (Figura 43) mostra tres emplaçaments que tenen corbes força similars, amb la freqüència fonamental del sòl que varia entre 6,9 i 7,5 Hz, i un altre emplaçament situat sobre roca. Per tant, en aquest array el basament rocós presenta un cabussament important.

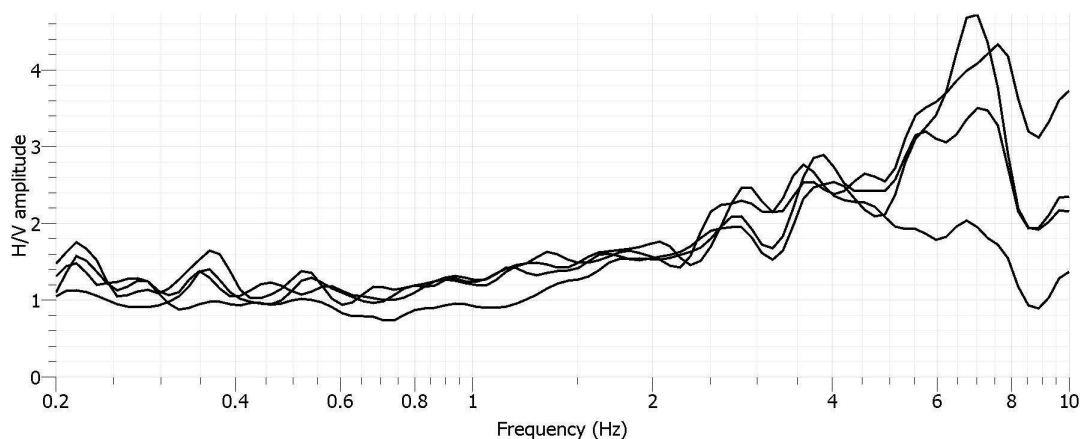


Figura 43: Resultats del quocient espectral H/V de soroll sísmic a diferents emplaçaments de l'array de Vaqueira.

A l'annex es mostra la corba de dispersió que s'ha obtingut amb el mètode FK a l'array de Vaqueira. Invertint la corba de dispersió s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 44). En el model del perfil vertical

de Vs s'hi identifiquen dues capes. La corba de color vermell, que és la que presenta menor error (Misfit value = 0,57), mostra una primera capa d'uns 10 metres amb una velocitat de 450 m/s. I una altra capa amb una velocitat aproximada de 1900 m/s. Probablement la primera capa està formada per rebliment quaternari i la segona capa és el basament rocós.

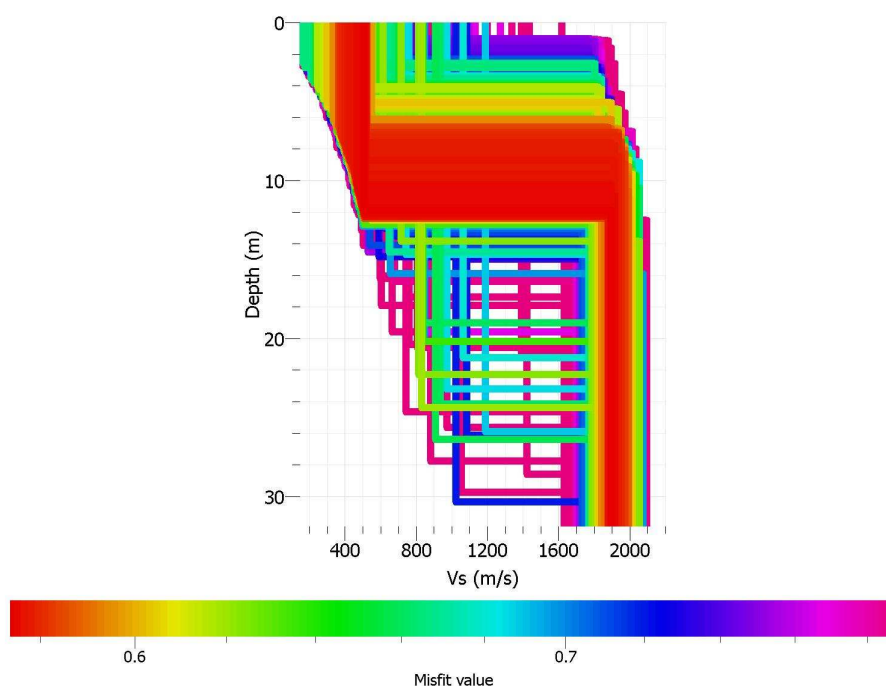


Figura 44: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a Vaqueira (misfit < 0,79).

A l'annex es mostra el diagrama en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació. Invertint la corba d'autocorrelació s'ha obtingut el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Figura 45). S'observa que, tal i com s'ha comentat a l'array del camp de futbol de Les, l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació (Misfit value = 1,11) és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió (Misfit value = 0,57).

El model del perfil vertical Vs mostra dues capes. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value = 1,11), mostra una primera capa d'uns 12 metres amb una velocitat de 550 m/s. I una segona capa amb una velocitat de 2000 m/s. Els resultats obtinguts amb els mètodes FK i SPAC són força semblants, amb diferències en el valor de Vs de la capa de sòls. El model del perfil vertical de Vs obtingut amb el mètode FK

s'ha seleccionat per caracteritzar l'emplaçament de Vaqueira, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

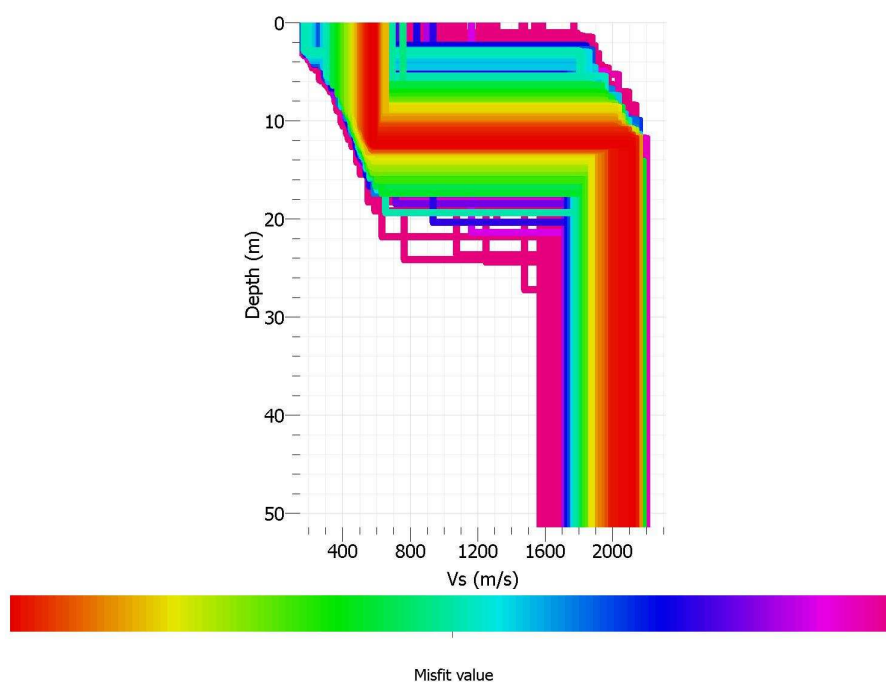


Figura 45: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (V_s) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a Vaqueira (misfit < 1,30).

A la Taula 11 es presenten els valors de la V_{sz} mitjana calculats per gruixos de sòl de 10, 20 i 30 metres respectivament.

Taula 11: Valors de velocitat mitjana de propagació de les ones de cisalla per diferents gruixos a Vaqueira.

Gruix (m)	V_{sz} (m/s)
10	450
20	728
30	916

Per tal d'avaluar els resultats obtinguts amb la tècnica de l'array podem calcular el valor de la freqüència fonamental del sòl a partir de l'expressió $V_s/4h$ (Bard, 1985) i comparar-la amb el valor obtingut de la tècnica del quocient espectral H/V. La freqüència fonamental que s'obté basant-nos amb els resultats del mètode FK és 11,3 Hz, que és superior als resultats obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V (6,9 – 7,5 Hz i roca). En aquest cas la tècnica d'array no resol correctament el gruix i la V_s de la capa de sòls,

probablement a causa del cabussament del basament rocós o a la presència de materials antròpics.

5.2.9 Classificació sòls EC8

Comparant els valors de V_{s30} obtinguts als emplaçaments dels arrays de la Val d'Aran amb els valors de V_{s30} proposats per diferents sòls a la classificació de l'Eurocode EC8 (CEN, 2003) (Taula 12) trobem la classe de sòls de cada emplaçament (Taula 13).

Taula 12: Condicions de la classificació de sòls de l'Eurocode EC8 (CEN, 2003).

Classe de sòl	Descripció del perfil estratigràfic	V_{s30} (m/s)
A	Roca o una altra formació amb menys de 5 m de material meteoritzat a superfície.	> 800
B	Dipòsits de sorra densa, grava o argila molt dura de varis metre de potència caracteritzada per un increment de les seves propietats mecàniques en profunditat.	360 – 800
C	Dipòsits profunds de sorra densa a mig densa, grava o argila dura amb potències de varies desenes a centenars de metres.	180 – 360
D	Dipòsits de sòls solts a mig cohesius (amb o sense nivells cohesius tous) o bé sòls cohesius tous a durs predominantment.	< 180
E	Perfil de sòl que consisteix en un nivell al·luvial a la superfície amb valors V_s de la classe C o D i potència variable entre 5 y 20 metres situats sobre un material més dur de $V_s > 800$ m/s.	-

Taula 13: Classe de sòl de l'Eurocode EC8 dels emplaçaments dels arrays de la Val d'Aran.

Nom array	Classe de sòl EC8
Les camp de futbol	B
Les	B
Bossòst camp de futbol	B
Bossòst	B
Vielha pàrking	E
Vielha camp de futbol	E
Arties	B
Vaqueira	A

6 Conclusions

S'ha calculat la freqüència fonamental del sòl amb la tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic. La freqüència fonamental del sòl al llarg de la Val d'Aran varia entre 1,7 i 9,0 Hz. A les poblacions de Les, Bossòst i Arties la major part dels emplaçaments tenen la freqüència fonamental compresa entre 2 i 3 Hz i a Vielha està compresa entre 3 i 5 Hz.

S'ha aplicat la tècnica de l'array per obtenir el gruix i la velocitat de propagació de les ones de cisalla de la columna de sòl en vuit emplaçaments de la Val d'Aran. A la major part dels emplaçaments la columna de sòl està formada per una capa de sòl tou (probablement quaternari) sobre el basament rocós. A la major part dels emplaçaments el gruix de la capa de sòl varia entre 20 i 50 metres i la velocitat de propagació de les ones de cisalla varia entre 300 i 500 m/s. La Vs del basament rocós varia entre 1000 i 2000 m/s (valors típics de roca sana).

En general els valors de la freqüència fonamental del sòl calculats amb l'expressió $V_s/4h$ i els resultats de l'array són coherents amb els valors obtinguts aplicant la tècnica del quocient espectral H/V en diferents punts de l'array. Aquest comportament serveix com a criteri per validar els resultats de l'array.

A tots els emplaçaments d'array s'observa que l'error mínim que s'obté en la inversió de la corba d'autocorrelació és més elevat que en la inversió de la corba de dispersió. Això probablement és degut a que les fonts de soroll sísmic no envolten l'emplaçament en totes direccions, tal i com suposa el mètode SPAC, cosa que provocaria que la propagació del soroll tingués una direcció privilegiada (tal i com suposa el mètode FK). Per tant, en tots els arrays s'ha seleccionat el model del perfil vertical de Vs obtingut amb el mètode FK per caracteritzar l'emplaçament, ja que aquest mètode és el que presenta menor error.

La majoria d'emplaçaments d'array estan situats sobre sòls de la classe B segons la classificació de sòls proposada per l'Eurocode EC8 (CEN, 2003).

Tenint en compte els resultats obtinguts amb les tècniques d'array i del quocient espectral H/V de soroll sísmic podem concloure que a la major part de la Val d'Aran la capa de sòls tous (quaternari) no supera els 50 metres de gruix.

7 Bibliografia

Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bull. Earthq. Res. Inst., 35, 415–456.

Bard, P.-Y. (1985). Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats expérimentaux et théoriques. A: Genie Parasismique. Ed: Victor Davidovici. Paris, pp 223-238.

Bordonau, J., Pous, J., Queralt, P., J. Vilaplana. (1989). Geometría y depósitos de las cubetas glaciolacustres del Pirineo. Estudios geol., 45: 71-79.

CEN (Comité Européen de Normalisation) (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Doc CEN/TC250/SC8/N335, gener.

Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. J. Phys. Earth, 33: 59-96.

Institut Cartogràfic de Catalunya. (2010) <http://www.icc.cat>

Lacoss, R.T., Kelly, E. J., Toksöz, M. N., 1969. Estimation of seismic noise structure using arrays. Geophysics, 34, 21–38.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute 30 (1) : 25-33.

Otori, M., Nobata, A., Wakamatsu, K., 2002. A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays. Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2323–2332.

Roberts, J.C., Asten, M. W., 2004. Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method. Exploration Geophysics, 35, 14–18.

Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., 2004. Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, 2, 211–221.

Wathelet., M., 2005. Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD thesis, Université de Liège, Belgium.

Annex

Annex	2
1.1 Coordenades dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic	2
1.2 Figures processat mètodes FK i SPAC	6

Annex

1.1 Coordenades dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic

Taula 1: Coordenades UTM dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic amb la tècnica del quocient espectral H/V a la població de Les.

Emplaçament	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)
1	313702	4743677
2	313968	4743893
3	313592	4743590
4	313429	4743440
5 C1	313091	4743485
5 C2	313136	4743425
6	313277	4743327
7	313234	4743393
8	313392	4743318
9	313572	4743137
10	313255	4743194
11	313137	4742991
12	313069	4742800
13	313039	4742632
14	312922	4742439
15	312847	4742274
16	312734	4742157
17	312992	4742475
18	312853	4742487
19	312828	4742496
20	312770	4742513
21	312723	4742528
86	312670	4742157
87	312636	4742190

Taula 2: Coordenades UTM dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic amb la tècnica del quocient espectral H/V a la població de Bossòst.

Emplaçament	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)
22	311776	4739571
23	311649	4739619
24 C1	311487	4739666
24 C2	311541	4739644
25	311391	4739645
26	311333	4739677
27	311224	4739683
28	311516	4740084
29	311432	4739994
30	311365	4739907
31	311306	4739778
32	311241	4739702
33	311215	4739528
34	311160	4739399
84	311534	4739696
85 C1	311521	4739751
85 C2	311576	4739733

Taula 3: Coordenades UTM dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic amb la tècnica del quocient espectral H/V a la població de Vielha.

Emplaçament	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)
35 C1	319746	4731120
35 C2	319693	4731137
36	319638	4731157
37 C1	319470	4730740
37 C2	319531	4730733
38	319615	4730672
39	319572	4730549
40	319509	4730489
41	319465	4730431
42 C1	319425	4730110
42 C2	319390	4730057
43	319378	4730209
44	319435	4730220
45	319382	4730194
46	319466	4730267
47	319405	4730310
48	319563	4730328
49	319993	4730440
50	320163	4730312
52	319904	4730427
53	319907	4730369
54	320176	4730142
55 C1	320096	4729982
55 C2	320107	4730042
56	320062	4729907
57	319523	4731192
58	319652	4730397
59	319750	4730506
60 C1	319796	4730241
60 C2	319769	4730217
61	319727	4730174
62 C1	319674	4730109
62 C2	319629	4730071
63	320250	4730072
64 C1	320092	4730057
64 C2	320032	4730087
65 C1	319983	4730111
65 C2	319939	4730141

66 C1	319883	4730168
66 C2	319843	4730200
67 C1	319730	4730305
67 C2	319708	4730353
68	319299	4730454
69	319277	4730639
70	319240	4730742
71	319311	4730744
80	319598	4731382
81	319622	4731249
82	319582	4731033
83	319577	4730911

Taula 4: Coordenades UTM dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic amb la tècnica del quocient espectral H/V a la població d'Arties.

Emplaçament	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)
72	325833	4729390
73	325721	4729527
74	325757	4729670
75	325771	4729731
76	325799	4729831
77	325828	4729908
78	325860	4729968

1.2 Figures processat mètodes FK i SPAC

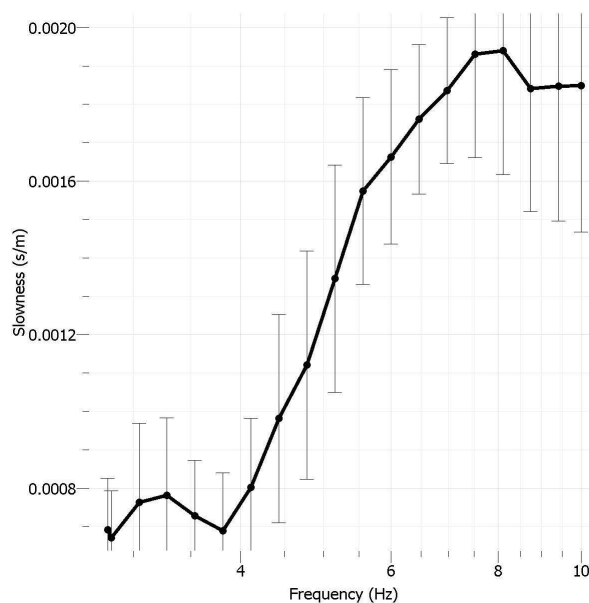


Figura 1: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array de Les.

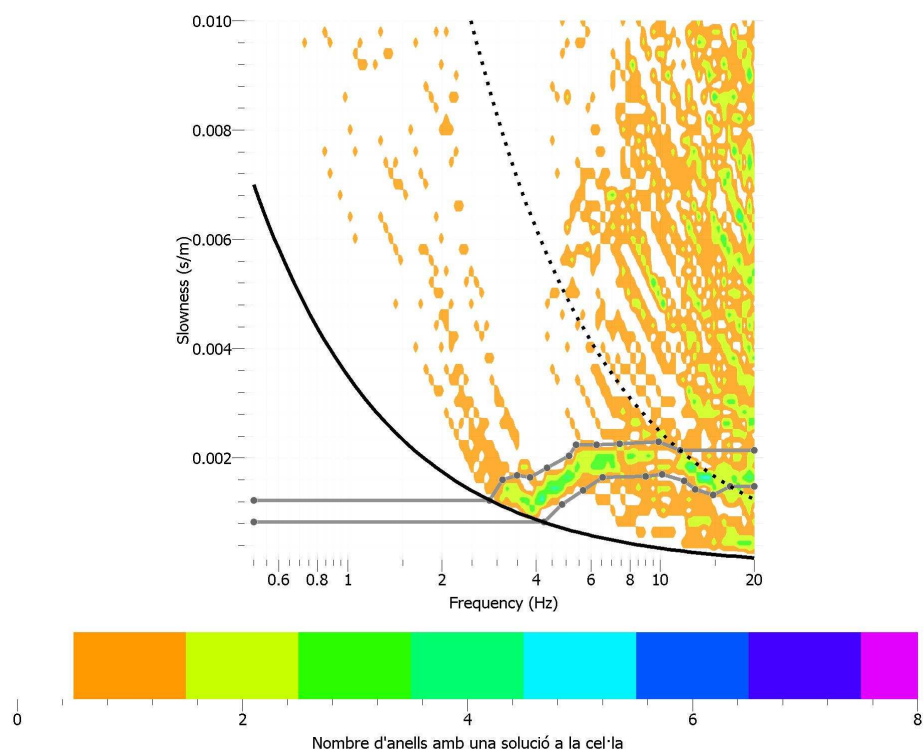


Figura 2: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array de Les. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

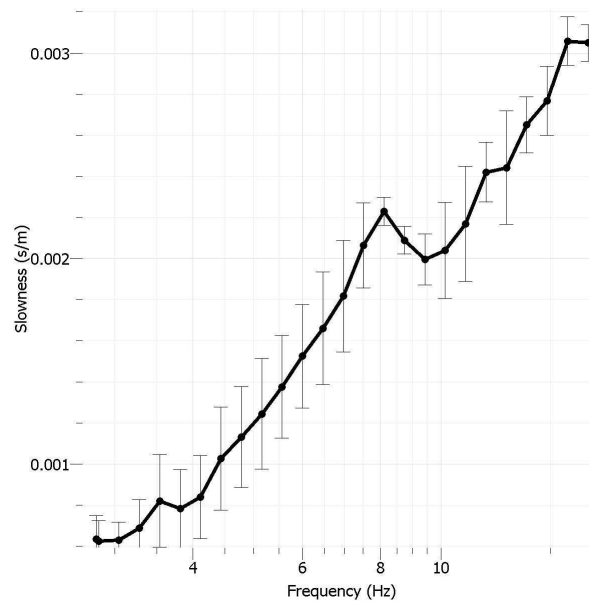


Figura 3: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Bossòst.

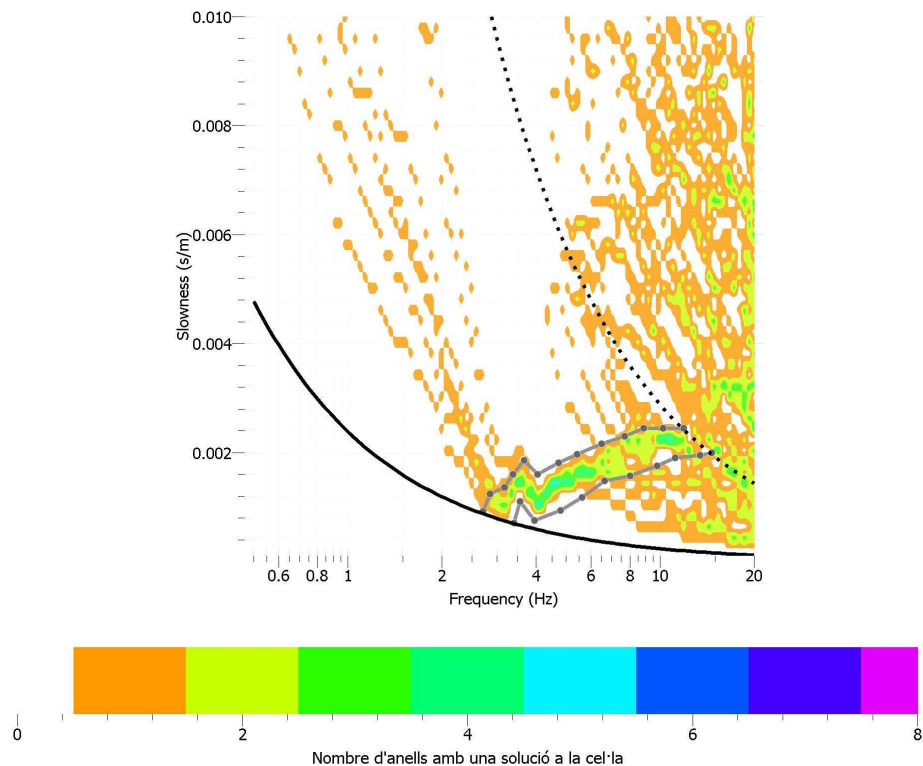


Figura 4: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array del camp de futbol de Bossòst. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

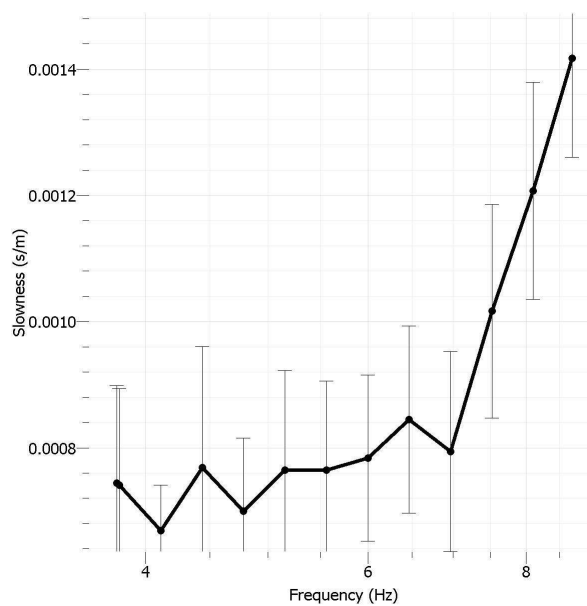


Figura 5: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array de Bossòst.

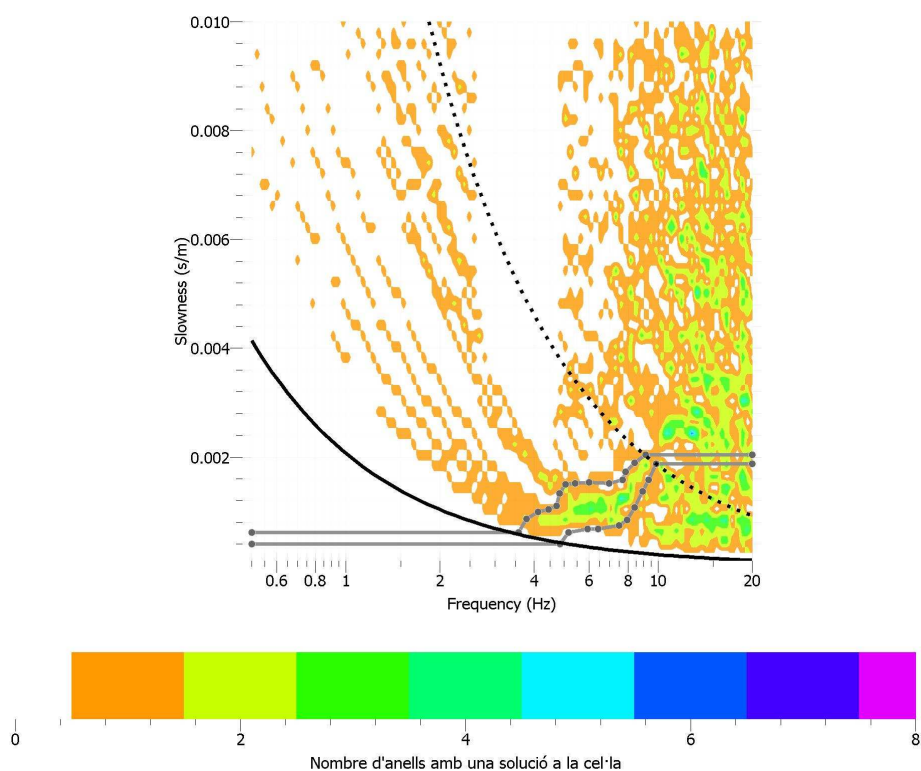


Figura 6: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array de Bossòst. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

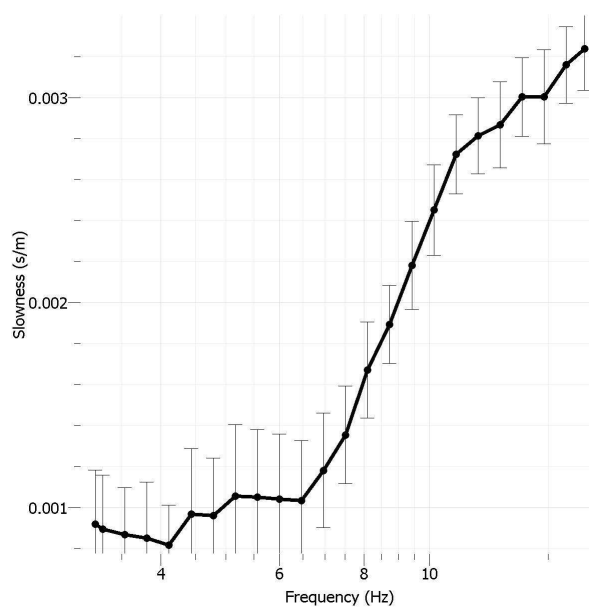


Figura 7: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array del pàrking de Vielha.

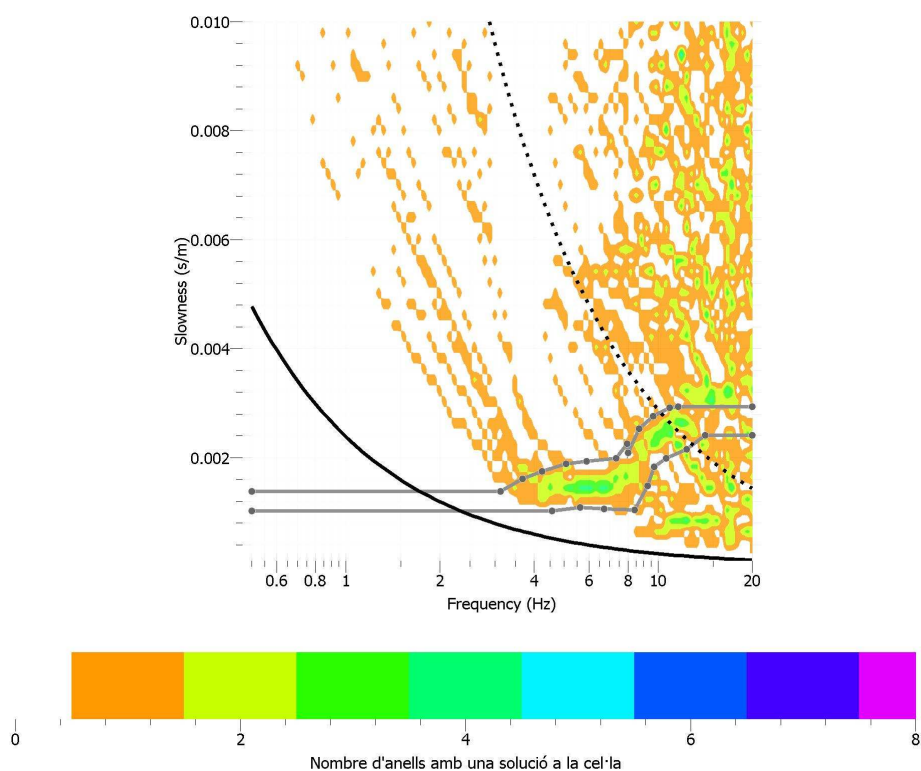


Figura 8: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array del pàrking de Vielha. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

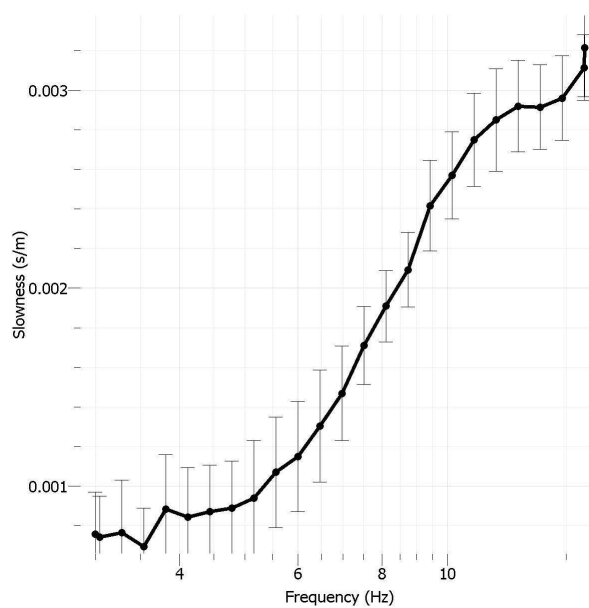


Figura 9: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array del camp de futbol de Vielha.

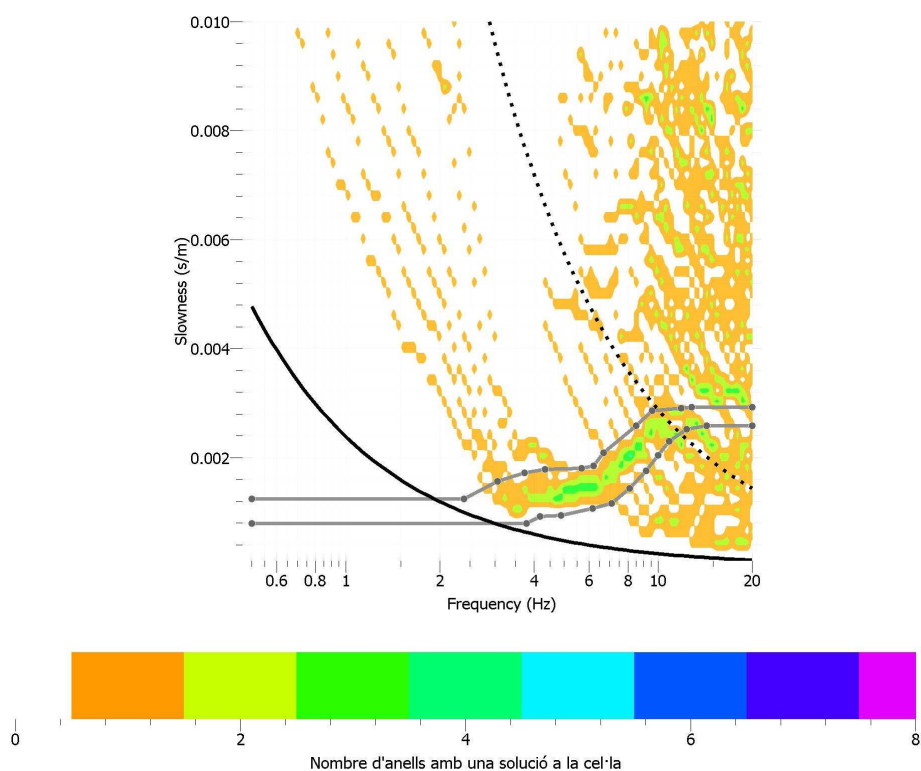


Figura 10: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array del camp de futbol de Vielha. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

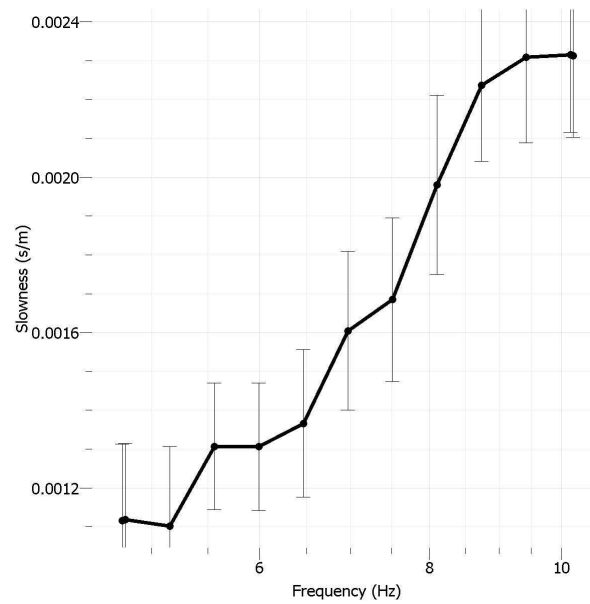


Figura 11: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array d'Arties.

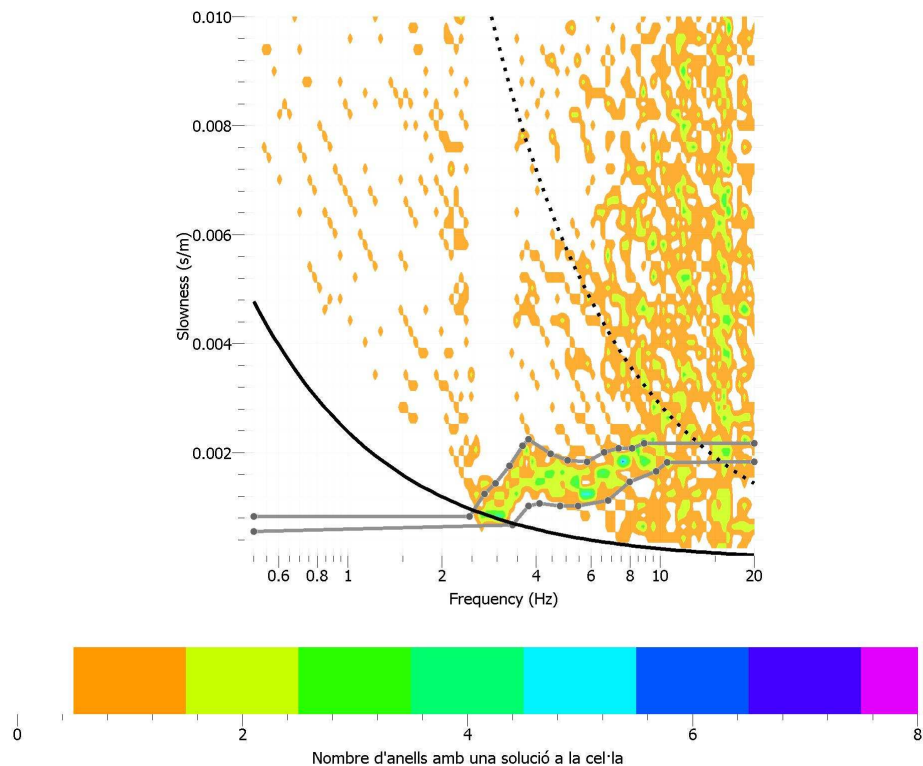


Figura 12: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array d'Arties. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.

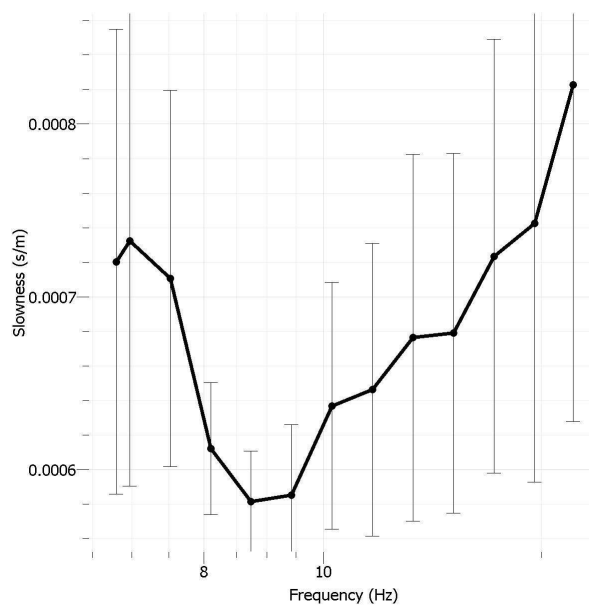


Figura 13: Corba de dispersió obtinguda amb el mètode FK a l'array de Vaqueira.

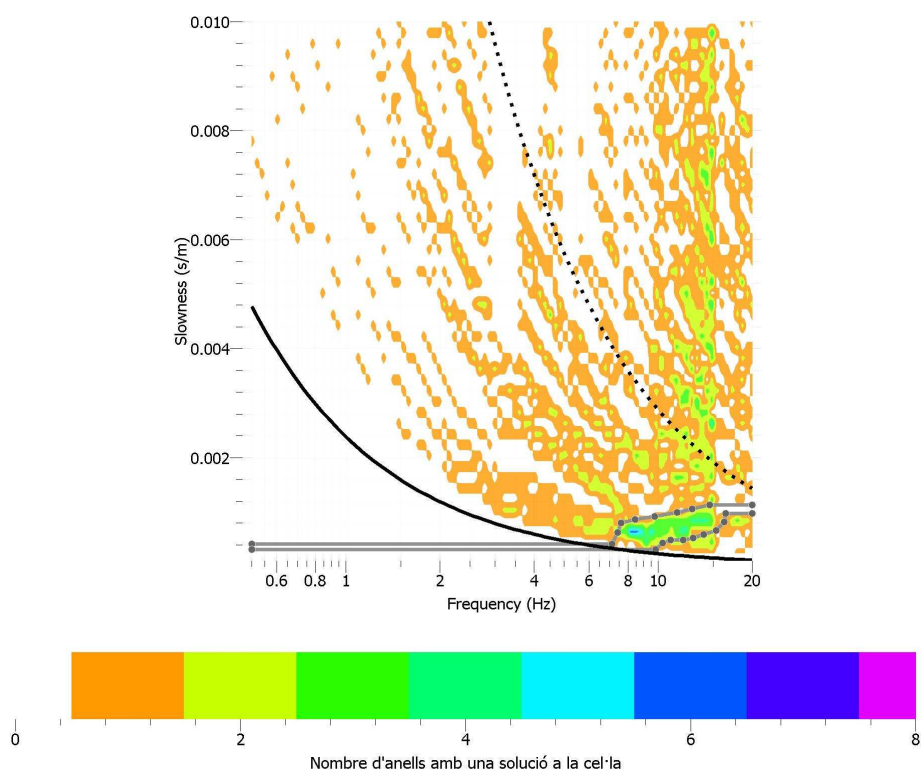


Figura 14: Grid en el domini freqüència – lentitud representant la densitat de solucions de la corba de dispersió del registre a l'array de Vaqueira. Les línies grises són els límits de la corba de dispersió o l'àrea amb una alta densitat de solucions $c(w)$.