

Caracterització de l'esllavissada de La Riba (Tarragona) a partir de dades LiDAR i fotogrametria

Autora: Marta Torné i Albert

Tutora: Marta Guinau i Sellés

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics

Especialitat: Riscos Geològics

Juliol 2014



Universitat de Barcelona



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

Índex

Abstract	2
1. Introducció.....	2
1.1 LiDAR.....	2
1.2 Fotogrametria	2
1.3 Moviments de massa	3
1.4 Objectius.....	3
1.5 Context geològic i geogràfic	4
2. Metodologia.....	4
2.1 Caracterització estructural	4
2.1 LiDAR.....	5
2.1.1 Models mitjançant dades LiDAR	6
2.2 Fotogrametria	6
2.2.1 Fotografies digitals	6
2.2.2 Models mitjançant fotogrametria.....	7
2.3 Anàlisi de discontinuïtats	8
2.3.1 Regressió planar	8
2.3.2 Filtrat	8
2.3.3 Classificació d'atributs	9
2.3.4 Clústers	9
2.4 Càlcul de volums	10
2.4.1 Volums a partir de superfícies (Gocad).....	10
2.4.2 Volums per comparació de models (PolyWorks).....	11
3. Resultats	12
3.1 Núvols de punts obtinguts	12
3.2 Anàlisi de discontinuïtats	12
3.3 Càlcul de volums	14
3.3.1 Volums a partir de superfícies (Gocad).....	14
3.3.2 Volums per comparació de models (PolyWorks).....	16
3.3.3 Comparació entre els dos mètodes utilitzats.....	16
4. Discussió	17
5. Conclusions	18
6. Agraïments	19
7. Referències	20

Abstract

This paper characterizes a landslide that occurred the 5th of May 2013 in the village of La Riba (Tarragona). Following the landslide some controlled blastings were done due to stabilize the slope.

This study applied techniques of photogrammetry and LiDAR data. The objective of this study is to compare the results obtained to explain the advantages and limitations of each technique.

To characterize the landslide have been done two photogrammetric models and two LiDAR data models, corresponding to the pre and post blast. With these dataset have been obtained 4 points clouds, and the same processing has been done to both of them, with two main objectives: The first one, is to identify and characterize the discontinuity families, and the second objective is to calculate the volumes of material involved in the blast. For the volume calculation have been used two different methods: the construction of simplified surfaces enclosing volumes obtained with simplified models at pre and post blast (software *Gocad* (Paradigm - www.pdgm.com)) and comparison of models before and after blasting (software *PolyWorks* (InnovMetric - www.innovmetric.com)).

Finally, the results are compared to determine and justify the differences obtained and identify the limitations and advantages of each technique.

1. Introducció

Els moviments de massa són processos geològics externs freqüents, lligats a l'evolució dels vessants per trobar el seu estat d'equilibri. Conèixer les seves característiques és important ja que ens permet preveure'ls i prendre les mesures necessàries per a la mitigació del risc.

Aquest treball proposa la utilització de dues tècniques per tal de caracteritzar i analitzar una esllavissada: la fotogrametria i les dades LiDAR.

Ambdues tècniques permeten obtenir informació 3D de l'aflorament, a partir de la qual es pot fer una caracterització estructural i un càlcul de volums del material potencialment inestable.

1.1 LiDAR

El LiDAR és una tècnica que mesura distàncies mitjançant reflexions d'un raig làser sobre una superfície. El resultat obtingut és un núvol de punts d'alta densitat amb el valor de la intensitat, que depèn de les característiques reflectores de cada material.

Quan el raig làser xoca amb un objecte, part de l'energia és reflexada i retorna a la unitat receptora, on l'ona és analitzada per determinar les característiques i la localització de l'objecte amb una precisió centimètrica (Heritage i Large, 2009).

L'escàner genera un núvol de punts de dades geomètriques definit per un sistema de coordenades inicialment referenciat al capçal de l'instrument com a $x=0$, $y=0$ i $z=0$. La posició de cada punt es determina utilitzant el temps de recorregut combinat amb les dades angulars en què el raig ha estat emès.

1.2 Fotogrametria

La fotogrametria és una tècnica que permet obtenir models 3D a partir dels quals es poden determinar les propietats geomètriques dels objectes i les situacions espacials a partir d'imatges fotogràfiques basant-se en uns algorismes.

En aquest cas s'utilitza la fotogrametria digital terrestre, és a dir, el tractament dels fotogrames es realitza en sistemes fotogramètrics digitals i l'estació de recollida de dades es situa en l'espai terrestre. El principi fonamental que utilitza la fotogrametria digital terrestre per la construcció de models 3D és la triangulació, basant-se en les anomenades condicions de coplanaritat i col·linealitat, mitjançant un procés de mínims quadrats (Sánchez Sobrino, 2007).

La condició de coplanaritat s'estableix a partir de que els centre de projecció de cada fotograma (O_1 i O_2), un punt qualsevol del terreny (A) i els seus homòlegs continguts en el fotograma (a_1 i a_2), es troben en el mateix pla, anomenat pla epipolar. La condició de col·linealitat implica que el centre de projecció (O), el punt contingut en el fotograma (a) i el punt del terreny (A) es troben alineats sobre la mateixa recta (Figura 1.1).

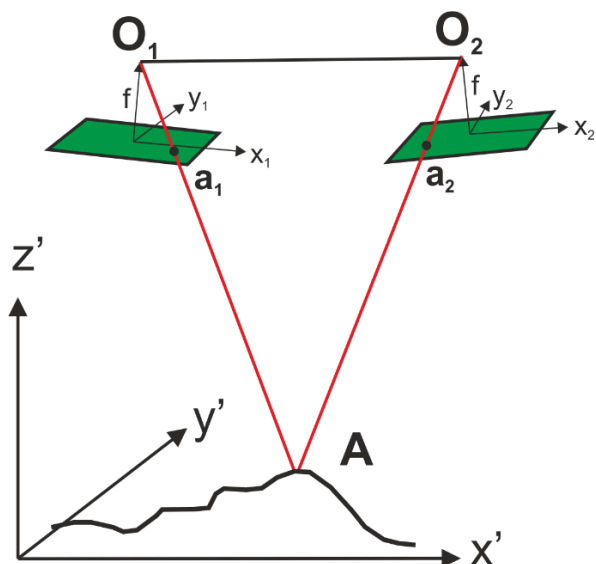


Figura 1.1: Representació de la condició de coplanaritat i col·linealitat (modificat de Sánchez Sobrino, 2007).

Coneixent l'orientació de la càmera en cada una de les fotografies, s'utilitzen les línies d'intersecció en l'espai definides per les condicions de coplanaritat i col·linealitat, i es calcula la ubicació de cada punt.

1.3 Moviments de massa

Les tècniques de dades LiDAR i fotogrametria s'han aplicat en diversos treballs per a l'estudi dels moviments de massa.

En el cas del LiDAR per a la detecció i caracterització, la realització de mapes de susceptibilitat i perillositat, la modelització i la monitorització dels moviments de massa. S'utilitza en diferents tipologies, com ara en esllavissades, desprendiments de roques i corrents d'esbaldregalls (Jaboyedoff *et al.*, 2010). Alguns exemples són l'estimació de volums per fer una relació de freqüència i magnitud dels desprendiments de roques (Santana *et al.*, 2012) i la quantificació de les orientacions de les discontinuïtats (Sturzenegger i Stead 2009*1).

També hi ha diversos estudis que caracteritzen les discontinuïtats comparant les tècniques de fotogrametria i dades LiDAR (Lato i Vöge, 2012; Sturzenegger i Stead 2009*2).

En el marc d'aquest treball es realitza la caracterització d'un lliscament planar que es situa a la Província de Tarragona (Catalunya).

Entre el 2013 i el 2014 s'han donat diversos esdeveniments i recollit un determinat tipus de dades que es representen a la Figura 1.2. El dia 5 de maig es va produir l'esllavissada i el 22 es van realitzar les fotografies per fer el model fotogramètric. Seguidament es va desprendre un bloc i després es va fer el primer escaneig LiDAR. Entre l'agost i el setembre es van realitzar dues voladures controlades per tal de sanejar el vessant. Finalment es van fer les fotografies digitals per realitzar el model fotogramètric post voladura i l'escaneig LiDAR post voladura.

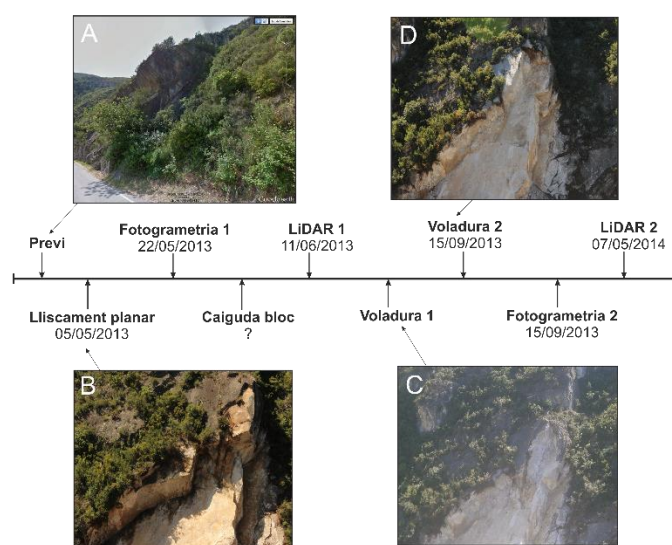


Figura 1.2: Cronologia de la recollida de dades i esdeveniments de l'esllavissada de La Riba. A, Previ a l'esllavissada (Google Earth). B, Posterior a l'esllavissada (Grup RISK NAT). C, Posterior a la voladura 1 (Grup RISK NAT). D, Posterior a la voladura 2 (Grup RISK NAT).

1.4 Objectius

L'objectiu del treball és caracteritzar l'esllavissada mitjançant dues tècniques, la fotogrametria i les dades LiDAR per tal d'obtenir:

- L'orientació de les discontinuïtats per fer una caracterització estructural.
- Càlcul del volum de material involucrat en la voladura.

Es valoren i comparen els resultats obtinguts per tal de determinar els avantatges i les limitacions de cada una de les tècniques.

1.5 Context geològic i geogràfic

L'esllavissada de La Riba es troba a la comarca de l'Alt Camp, entre el quilòmetre 30 i el 31 de la carretera C-240z, entre les poblacions de La Riba i Vilaverd (Figura 1.3) en les coordenades 347982 E, 4575786 N segons el sistema de coordenades UTM ETRS89 fus 31.

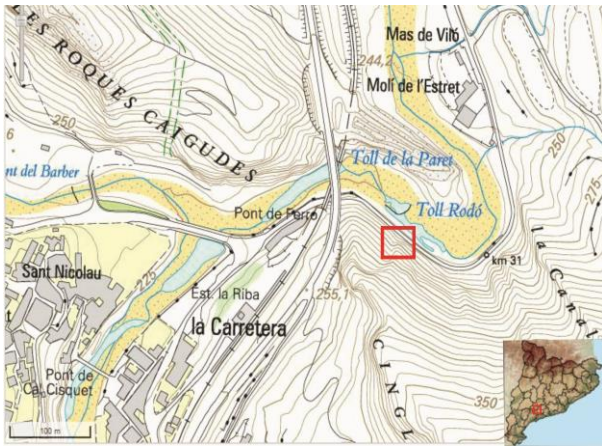


Figura 1.3: Situació geogràfica de la regió d'estudi, en un requadre vermell es troba marcada la zona de l'esllavissada de La Riba (modificat del ICGC [en línia]).

Geològicament es troba dins la depressió de Valls-Reus, on afloren materials triàsics de cobertora lleugerament deformats, que reposen sobre el sòcol Hercinià.

Els materials afectats per l'esllavissada són les Dolomies de La Riba del Muschelkalk Superior, que presenten una estratificació força marcada i diferents famílies de discontinuïtats.

L'esllavissada es va produir durant el migdia del 5 de maig, després d'unes pluges intenses. Les roques van cobrir més de 200 metres de la carretera i van destruir part de la calçada, cosa que va fer tallar la carretera en els dos sentits de la marxa. Es tracta d'una carretera secundària poc transitada, però és un tram molt freqüentat pels veïns de la Riba i Vilaverd, que acostumen a fer a peu el recorregut que separa les dues poblacions. Afortunadament l'esllavissada no va causar ferits (Nació Digital [en línia]).

Posteriorment es van realitzar els treballs per l'estabilització del talús on es van fer voladures controlades per sanejar el vessant, i es va reconstruir el tram de carretera afectat. Finalment s'obre el trànsit de la carretera el 30 de novembre de 2013.

2. Metodologia

La metodologia que s'ha dut a terme per a la realització d'aquest treball es mostra esquemàticament a la Figura 2.1.

El treball es pot dividir en 3 blocs: la caracterització estructural, les dades LiDAR i la fotogrametria.

La caracterització estructural consta en mesurar discontinuïtats amb la brúixola i caracteritzar la seva continuïtat i repetició en l'aflorament.

Les dades LiDAR s'obtenen a partir dels escàners realitzats al camp, posteriorment es fa un tractament per tal de georeferenciar i alinear els diferents escàners per obtenir finalment dos núvols de punts, un previ a la voladura i un altre de posterior. Per facilitar la comprensió al llarg del treball els anomenarem model LiDAR pre i model LiDAR post respectivament.

Per la fotogrametria es realitzen fotografies digitals de l'esllavissada, posteriorment es fan els models 3D, la georeferenciació i l'alineació. Finalment s'obtenen dos núvols de punts, com en el cas anterior un previ a la voladura i un altre posterior, que els anomenarem model fotogrametria pre i model fotogrametria post respectivament.

Amb els 4 núvols de punts s'aplica el mateix processat per fer l'anàlisi de discontinuïtats i el càlcul de volums. A continuació s'explica tot el procés en més detall.

2.1 Caracterització estructural

La caracterització estructural consta en identificar i caracteritzar les diferents discontinuïtats que presenta l'aflorament.

El 19 d'abril es va realitzar el treball de camp on es van mesurar les discontinuïtats, es van fer un total de 61 mesures amb la brúixola. També es va estudiar la continuïtat i repetició de les discontinuïtats amb una visió panoràmica de l'aflorament, per identificar les diferents famílies.

Posteriorment s'han importat les mesures de les discontinuïtats al software *GEORient* per tal de representar-les en una projecció estereogràfica en pols.

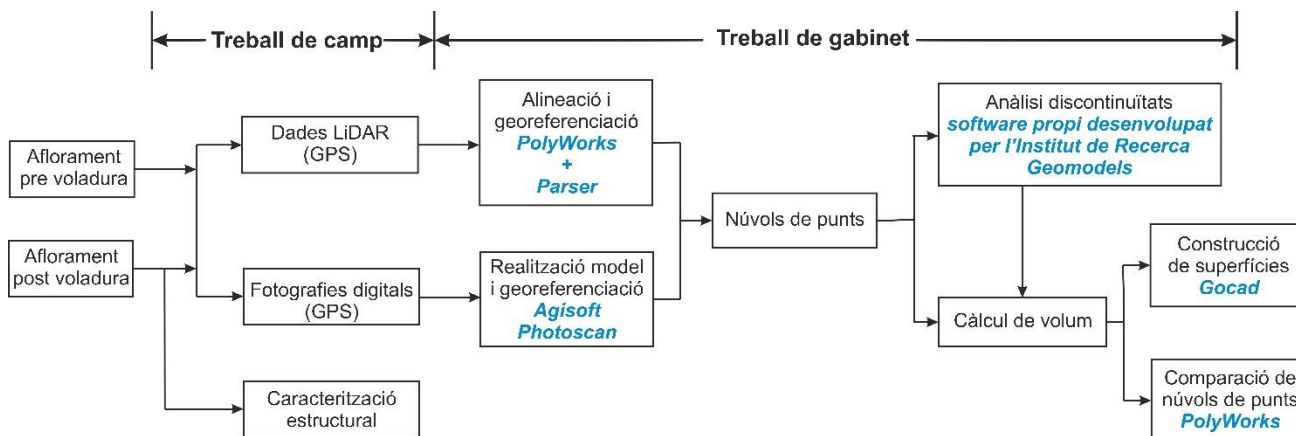


Figura 2.1: Esquema de la metodologia seguida per la realització del treball.

2.1 LiDAR

Les dades LiDAR s'han adquirit amb un Escàner Làser Terrestre (TLS), model ILRIS-3D fabricat per OPTECH. El material necessari per dur a terme l'escaneig són: el TLS que és l'instrument que mesura les distàncies i la intensitat de cada punt, la càmera que s'utilitza per visualitzar en detall la zona que s'estudia, el trípede que subjecta el TLS, la PDA que serveix per controlar el sistema i emmagatzema la informació, el generador de benzina que proporciona l'energia necessària i el GPS Diferencial que determina les coordenades del punt des d'on es realitza l'escaneig (Figura 2.2). El GPS utilitzat és el model GB-1000 de la marca TOPCON.

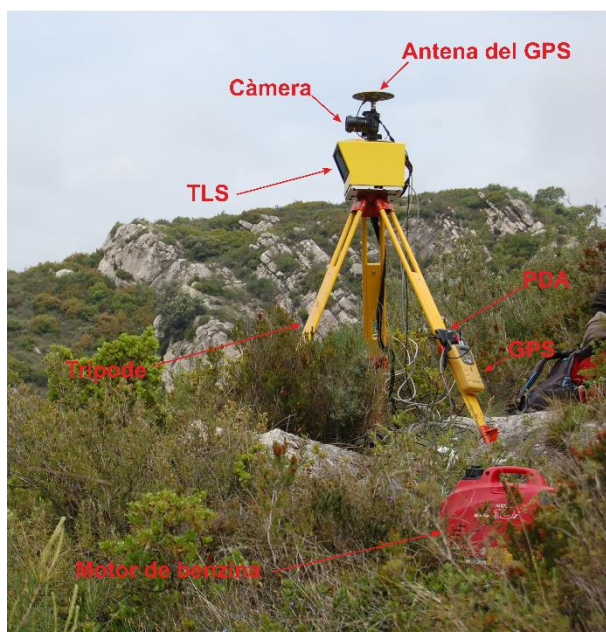


Figura 2.2: Instruments necessaris per fer l'escaneig a la zona de La Riba.

S'han realitzat un total de 8 escàners repartits en dues campanyes de camp. La primera campanya correspon a la pre voladura. La van realitzar els membres del grup RISKNAT el dia 11 de juny del 2013, van fer 3 escàners des de dos punts diferents. La segona campanya entra en el marc d'aquest treball, correspon a la post voladura. Es va realitzar el dia 7 de maig de 2014 i es van obtenir 5 escàners des de 4 punts.

Per començar l'escaneig l'usuari ha de determinar a través de la PDA l'àrea que es vol mesurar i la densitat de punts que es vol obtenir a través del paràmetre Pas. El paràmetre Pas va en funció de la distància amb l'aflorament, i la distància que es vol obtenir entre els punts. El Pas utilitzat és de 8 en l'escàner 1 de la pre i post voladura, de 14 en l'escàner 2 i 3 de la pre i post voladura, i de 18 en l'escàner 4 i 5 de la post voladura; a una distància d'aproximadament 100 metres entre el TLS i l'aflorament. Una vegada introduïts tots els paràmetres només cal esperar que es realitzi l'escaneig. El temps de durada de l'escàner varia en funció dels paràmetre Pas i de l'àrea escanejada, els que tenien un valor de 8 van trigar aproximadament 90 minuts, en canvi els de 18 uns 30 minuts. El TLS té una pantalla que permet veure en quin punt es troba el procés d'escanament.

Finalment s'obté un arxiu en format *TXT amb les coordenades x, y, z i la intensitat de cada punt que s'ha obtingut amb l'escaneig, considerant com a punt de partida el capçal de l'instrument.

2.1.1 Models mitjançant dades LiDAR

Una vegada obtingudes les dades LiDAR cal fer un processat per tal d'alinejar i georeferenciar els núvols de punts per obtenir finalment el model LiDAR pre i el model LiDAR post.

El software que s'utilitza és el *PolyWorks* (InnovMetric – www.inovmetric.com). Aquest software s'estructura en diferents aplicacions, en aquest estudi s'han utilitzat les aplicacions *IMAlign* i *IMInspect*. El *IMAlign* permet alinear i comparar els núvols de punts, i el *IMInspect* permet alinear, comparar i georeferenciar núvols de punts i crear malles poligonals (*PolyWorks V10 Beginner's Guide*, 2007).

Abans de començar a treballar amb *PolyWorks* cal transformar els núvols de punts obtinguts amb el TLS en un format compatible. S'utilitza el software *Parser* que transforma les dades de format *.TXT a *.PIF.

Una vegada transformades totes les dades en un format compatible es comença el procés d'alineació i georeferenciació dels escàners.

Com a referència s'agafen els escàners posteriors a la voladura, ja que s'han realitzat des de 4 punts diferents, en canvi els previs a la voladura només s'han realitzat des de dos punts diferents i no són suficients per a la georeferenciació.

Primerament s'alineen els escàners posteriors a la voladura agafant com a referència l'escàner 1. El procés d'alineació consta de dues etapes: en la primera s'identifiquen punts homòlegs entre els núvols de punts, i en la segona s'utilitza un algoritme que minimitza la distància entre punts. El procés es realitza per cada escàner posterior a la voladura respecte l'escàner 1.

Una vegada alineats els escàners post voladura, s'exporten a l'aplicació *IMInspect*. Aquest permet crear els punts des d'on s'han realitzat els escàners. Una vegada creats aquests punts se'ls hi assigna les coordenades corresponents, mesurades amb el GPS.

Finalitzat aquest procés els escàners posteriors a la voladura ja estan alineats i georeferenciats.

A continuació cal alinear els escàners previs a la voladura respecte els posteriors, que ja es troben georeferenciats. L'alineació, com anteriorment, consta de dues etapes. Però com que els escàners per alinear presenten diferències (Figura 2.3), en el

procés de minimitzar la distància entre punts cal seleccionar aquelles zones que presenten diferències perquè s'ignorin en l'alineació. Una vegada alineats cada un dels escàners posteriors a la voladura ja estan tots georeferenciats.

A l'annex I s'ha fet una guia metodològica explicant pas per pas com es construeixen els models.

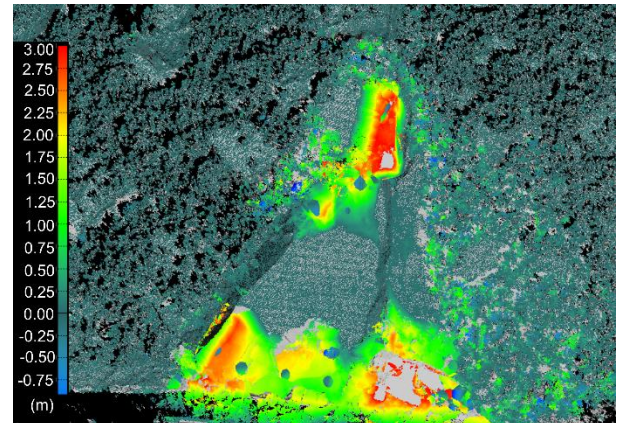


Figura 2.3: Diferències entre els escàners pre i post voladura segons una escala de colors.

Finalment s'exporta el núvol de punts de l'escàner 2 de la pre voladura com a "només punts" en format *.TXT, que anomenarem model LiDAR pre, i l'escàner 2 de la post voladura que anomenarem model LiDAR post.

S'utilitza l'escàner 2 ja que es veu l'aflorament sencer, sense buits d'informació i la densitat de punts és òptima per a l'objectiu d'aquest treball.

2.2 Fotogrametria

Per fer els models de fotogrametria s'utilitza el software *Agisoft Photoscan Professional* (www.agisoft.com), un programa informàtic que permet realitzar models 3D a partir de fotografies digitals (*Agisoft Photoscan User Manual*, 2012). L'objectiu és obtenir el model fotogràfic pre i el model fotogràfic post.

2.2.1 Fotografies digitals

Les fotografies digitals s'han realitzat amb una càmera del model CANON EOS 600 D, d'una resolució de 18 megapíxels, amb una distància focal de 55 mm. S'han realitzat fotografies amb superposició des de 5 punts diferents, on en cada un

es mesuraven les coordenades amb un GPS Diferencial del model GB-1000 de la marca TOPCON, amb una precisió de 25 cm.

Aquesta tasca l'han dut a terme els membres del grup RISKNAT. Les fotografies pre voladura es van realitzar el 22 de maig de 2013 i les post voladura el 15 de setembre de 2013.

En el cas d'aquest treball, on el model es realitza sobre un aflorament, les fotografies s'han de realitzar seguint les següent premisses (Figura 2.4):

- Conservar la distància entre càmera i aflorament.
- Mantenir una distància constant entre els diferents punts de captura.
- Conservar l'angle de captura en els diferents punts.

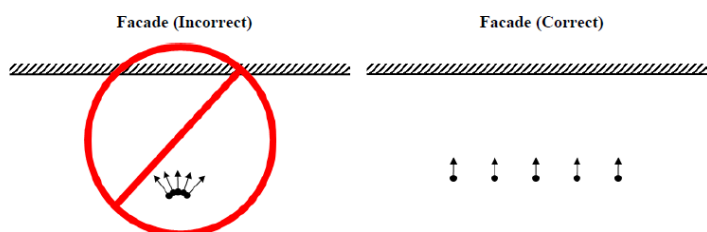


Figura 2.4: Metodologia correcta per realitzar les fotografies digitals per la construcció d'un model 3D amb Agisoft Photoscan (modificat de Agisoft Photoscan User Manual, 2012).

2.2.2 Models mitjançant fotogrametria

Mitjançant el software *Agisoft Photoscan Professional* es realitzen dos models 3D a partir de les fotografies digitals i les coordenades del GPS, el model pre voladura i el post voladura. El procediment de construcció és el següent:

Primerament es carreguen les fotografies escollides per a la realització del model, s'instaura el sistema de coordenades UTM ETRS89 fus 31N, i es calibra per tal de disminuir l'error. La calibració es realitza mitjançant el software *Agisoft Lens*, on es determina la distorsió de la càmera en funció de la distància focal.

A continuació es construeix el model, aquest procés consta de 3 passos:

1. **Alineació de les fotografies digitals.** Aquest procés consisteix en la recerca de punts comuns en les diferents fotografies i la

determinació de la posició de cada càmera. Els paràmetres utilitzats són:

- a. **Precisió:** *Alta*, ja que ajuda a obtenir una posició de la càmera més precisa.
- b. **Re-processat:** *Genèric*, el mode de superposició de fotografies és segons la posició de la càmera que s'ha obtingut amb la precisió alta.

2. **Construcció de la geometria 3D.** El programa situa les posicions i orientacions de la càmera de cada fotografia i construeix una malla de polígons en 3D. Els paràmetres que s'han utilitzat són:

- a. **Tipus d'objecte:** *Arbitrari*, s'utilitza per a la modelització de qualsevol tipus d'objecte.
- b. **Tipus de geometria:** *Trets acusats*, dona resultats més precisos i no introdueix geometria extra.
- c. **Qualitat:** *Mitjana*, ja que s'obté una geometria amb precisió òptima en un temps de processat raonable.
- d. **Número de cares de la malla:** *50.000*, és adequat pel processat posterior.
- e. **Llindar de filtrat:** *0.1*, ja que no interessa eliminar les cares de la malla.
- f. **Llindar de detecció:** *0.1*, especifica la mida màxima de cobertura dels buits en la reconstrucció de la superfície.

3. **Construcció de la textura.** Aporta detalls de totes les fotografies que han construït el model. Els paràmetres utilitzats són:

- a. **Mode:** *Genèric*, el programa fa la textura el més uniforme possible.
- b. **Procedència de la textura:** *Totes les fotografies*.
- c. **Mode de barreja:** Utilitza el valor mitjà de tots els píxels de cada fotografia.
- d. **Amplada i alçada del mapa de textura:** *2048 píxels*.
- e. **Color de profunditat:** *Estàndard*, 24 bits.

Una vegada construïts els dos models (visualitzar en l'annex II en pdf 3D) cal georeferenciar-los. En el cas del model pre voladura es posen les coordenades de cada càmera segons les

coordenades GPS que es van mesurar al camp. En el cas del model post voladura, la captura de dades GPS va ser errònia i les dades no són vàlides. Per solucionar aquest problema s'ha projectat el model post respecte el pre utilitzant punts de control.

Finalment s'exporten els núvols de punts de cada un dels models. Per tal de disminuir la mida de l'arxiu i treballar amb les zones que interessin es retallen els models amb el software *PolyWorks IMInspect*, finalment s'obtenen el model fotogrametria pre i el model fotogrametria post. A l'annex I s'ha fet una guia metodològica explicant pas per pas com es construeixen els models.

2.3 Anàlisi de discontinuïtats

Una vegada obtinguts els núvols de punts a partir de la fotogrametria i les dades LiDAR es realitza un tractament amb un software propi desenvolupat per l'Institut de Recerca Geomodels. L'objectiu d'aquest anàlisi és identificar les diferents famílies i individualitzar els diferents conjunt de punts que formen una superfície. El processat de dades consta de diversos passos; la regressió planar, el filtrat, la classificació d'atributs i la creació de clústers, passos que s'han aplicat als 4 models (models LiDAR pre i post, i models fotogrametria pre i post) amb els mateixos paràmetres per tal d'apreciar les diferències entre els dos mètodes.

2.3.1 Regressió planar

Per un punt del núvol de punts es fa una cerca de punts definida per una esfera amb un radi mínim i màxim definits per l'usuari. Segons la disposició d'aquests es defineix un vector normal. Aquest procés es repeteix per tots els punts de l'arxiu.

Els paràmetres d'entrada (Taula 2-I) són el radi màxim i mínim i la col·linealitat i coplanaritat.

L'índex de coplanaritat defineix un conjunt de punts que es troben en un mateix pla, els valors alts de coplanaritat defineixen millor un pla que els valors baixos. L'índex de col·linealitat defineix un conjunt de punts que formen una línia, valors baixos de col·linealitat defineixen millor un pla que els valors alts (Fernández Bellon, 2004). En la regressió planar el paràmetre que influeix és el radi de cerca, ja que els índex de coplanaritat i col·linealitat es troben en el valor lliardar.

Regressió planar	
Radi màxim (m)	0,1
Radi mínim (m)	0,25
M mínima (col·linealitat)	0
K màxima (coplanaritat)	500

Taula 2-I: Paràmetres utilitzats per fer la regressió planar.

El document resultant té les següents característiques en codi ASCII:

- Coordenades (X, Y, Z).
- Components del vector normal calculat per la regressió planar (i, j, k).
- Índex de coplanaritat (M).
- Índex de col·linealitat (K).
- Nombre de punt utilitzats per a la regressió planar (n).

Per fer qualsevol processat amb el programa cal carregar la regressió planar i definir la mida de la malla. En aquest estudi s'aplica 0.25 m per cada cub, ja que per tal que el programa funcioni bé el nombre de cel·les de cada eix ha de ser inferior a 300.

2.3.2 Filtrat

A partir de la regressió planar es realitza el procés del filtrat (Figura 2.6 A). Aquesta eina permet eliminar els punts aïllats segons els paràmetres d'entrada configurats per l'usuari (Taula 2-II). Com que l'objectiu és identificar les diferents discontinuïtats i el processat és més ràpid com menor és el radi de cerca s'estableix que per cada punt, en 0,5 metres s'han d'identificar com a mínim 10 punts on el valor de la normal difereixi com a màxim 5°.

En el procés de filtrat es té en compte l'índex de coplanaritat on s'accepten valors superiors a 3,2, i l'índex de col·linealitat on s'accepten valors inferiors a 1,2.

Finalment s'obté un arxiu *TXT en codi ASCII i les mateixes característiques que la regressió planar, però s'han eliminat tots aquells punts que es consideren aïllats.

Filtrat	
Radi màxim (m)	0,5
Número mínim de punts	10
Tolerància dels vectors de la regressió planar (°)	5
Valor mínim i màxim de M	3,25 - 500
Valor mínim i màxim de K	0- 1,2

Taula 2-II: Paràmetres utilitzats en el filtrat.

2.3.3 Classificació d'atributs

L'objectiu és identificar els diferents grups de discontinuïtats. Quan es fa la regressió planar es crea un arxiu estadístic. Aquest s'introdueix a l'eina *stereoplot* i es mostra la projecció estereogràfica en pols segons l'azimut i el cabussament, representada per una escala de 10 colors segons la densitat del número de punts (Figura 2.5).

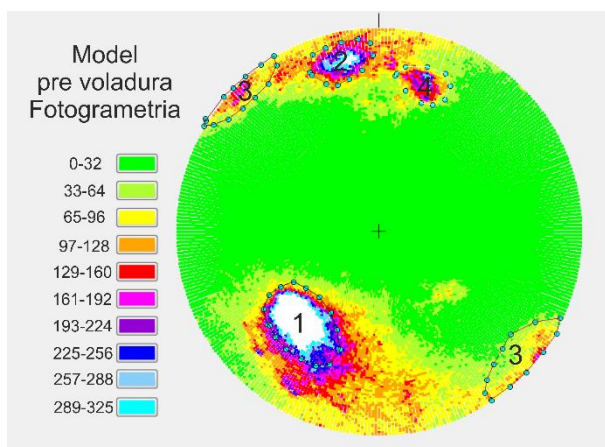


Figura 2.5: Projecció estereogràfica en pols del model fotogrametria pre on es representa en una escala de colors la densitat dels punts segons l'orientació. S'han dibuixat 4 polígons corresponents a diferents discontinuïtats.

En l'estereogràfica es dibuixen polígons en aquelles zones on el nombre de punts és considerable, cada un representa un grup de discontinuïtats (Figura 2.6 B).

Finalment s'aplica cada un dels polígons al filtrat realitzat anteriorment i s'obté un arxiu en format *.TXT en codi ASCII i les mateixes característiques

per cada un dels grups de discontinuïtats (Figura 2.6 B).

2.3.4 Clústers

Aquesta eina permet individualitzar conjunts de punts que corresponen a una mateixa discontinuïtat.

S'importa l'arxiu de cada grup de discontinuïtats obtinguts amb la classificació d'atributs. Els paràmetres d'entrada es troben representats a la Taula 2-III.

Els paràmetres de graus de tolerància entre els vectors de la regressió planar, l'azimut i el cabussament no influeixen ja que ja han estat definits en la classificació d'atributs. El valor de la coplanaritat i col·linealitat tampoc, perquè ja ha estat definit en el filtrat. Per tant els paràmetres que influeixen són el radi de cerca màxim i els graus de tolerància entre la regressió planar i el vector director, és a dir, els graus de tolerància entre dos vectors normals que corresponen a diferents superfícies però tenen una orientació similar, els 0° defineixen punts que es troben en un mateix pla (García-Sellés *et al.*, 2011 i Santana *et al.*, 2012).

Clústers	
Distància màxima (m)	3
Tolerància dels vectors de la regressió planar (°)	10
Tolerància de la regressió planar i el vector director (°)	5
Azimut (°)	25
Cabussament (°)	30
Valor mínim i màxim de M	3.25 – 500
Valor mínim i màxim de K	0- 1.2

Taula 2-III: Paràmetres utilitzats pels clústers.

Després del processat s'obté un arxiu que es troba dividit en clústers mitjançant una franja de zeros. El software disposa d'una eina que permet individualitzar cada un dels clústers en un arxiu.

Finalment s'obté un arxiu en format *.TXT en codi ASCII i les mateixes característiques que els arxius anteriors per cada un dels clústers (Figura 2.6 C).

Per visualitzar els resultats obtinguts amb el software propi desenvolupat per l'Institut de Recerca Geomodels s'utilitza el software *Gocad* (Paradigm – www.pdgm.com).

Una vegada definides totes les discontinuïtats s'analitzen i es determina quines d'elles conformen famílies segons les dades obtingudes al camp i les obtingudes en l'anàlisi dels models LiDAR pre i post, i dels models fotogrametria pre i post.

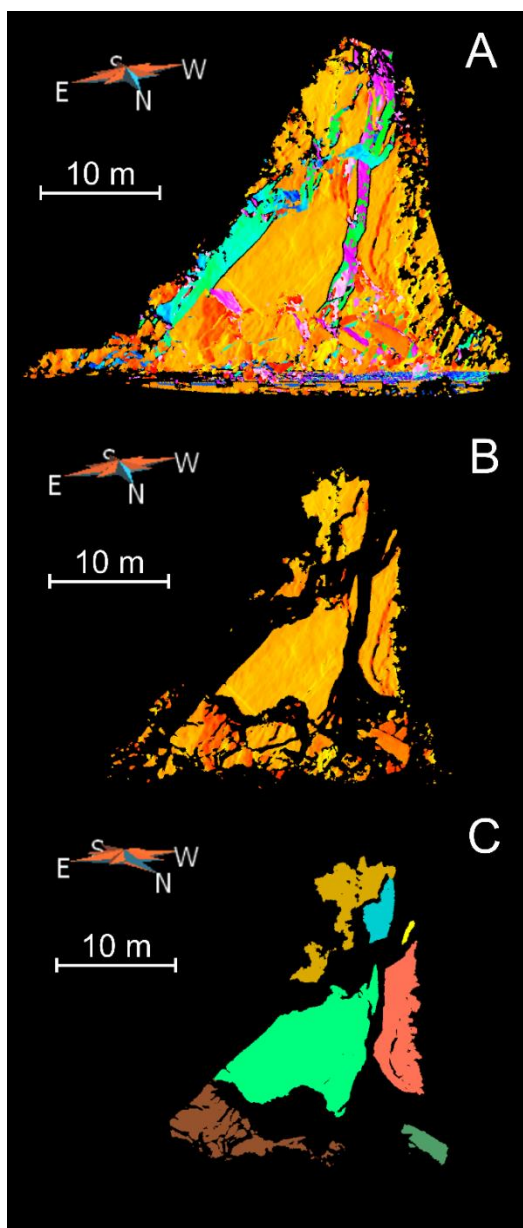


Figura 2.6: Resultats obtinguts amb l'anàlisi de discontinuïtats utilitzant el Projecte 120 en el model LiDAR pre. A, Filtrat. Amb totes les superfícies identificades. B, Família 1. C, Família 2, els colors indiquen diferents superfícies. L'escala és aproximada.

2.4 Càlcul de volums

Una vegada definides les diferents discontinuïtats que es troben en l'aflorament es realitza un càlcul de volums implicats en la voladura. S'aplica en els models LiDAR pre i post, i els models fotogrametria pre i post. En aquest treball es proposen dues metodologies pel càlcul de volums: la construcció de superfícies simplificades corresponents a les famílies amb el software *Gocad* i la comparativa de models amb els software *PolyWorks IMInspect*.

2.4.1 Volums a partir de superfícies (*Gocad*)

Per fer la construcció de superfícies s'utilitza el software *Gocad* (Paradigm – www.pdgm.com). Un programa de cartografia 3D que permet visualitzar núvols de punts i construir superfícies.

Amb l'anàlisi de les discontinuïtats realitzat anteriorment s'han identificat els clústers de les famílies de discontinuïtats que limiten la voladura. A partir de cada clúster es construeix una superfície adaptada al núvol de punts. Aquest procés consisteix en dibuixar un polígon que delimiti tots els punts que conformen el clúster amb un número de nodes similar al núvol de punts, de tal manera que el clúster i el polígon siguin aproximadament paral·lels. Després es crea una superfície amb el polígon i s'adapta al núvols de punts (Figura 2.7).

Posteriorment cal engrandir-les perquè creuin i limitin el volum desitjat. Degut a que les superfícies són molt irregulars, no es poden engrandir de manera automatitzada, per això cal crear superfícies simplificades. *Gocad* disposa d'una eina que permet veure l'histograma de l'azimut i el cabussament de les superfícies i d'aquesta manera es determina un valor mitjà. A partir d'aquest valor mig es crea un pla, que al llarg del treball anomenem superfície simplificada.

Una vegada creades totes les superfícies que delimiten el volum de material, es crea un model 3D que permet mesurar el volum que queda tancat amb les superfícies simplificades (Figura 2.8).

Finalment per comprovar que els volums són raonables es mesuren les distàncies dels plans que conformen el volum i es compara que en els models LiDAR i fotogrametria donin valors similars.

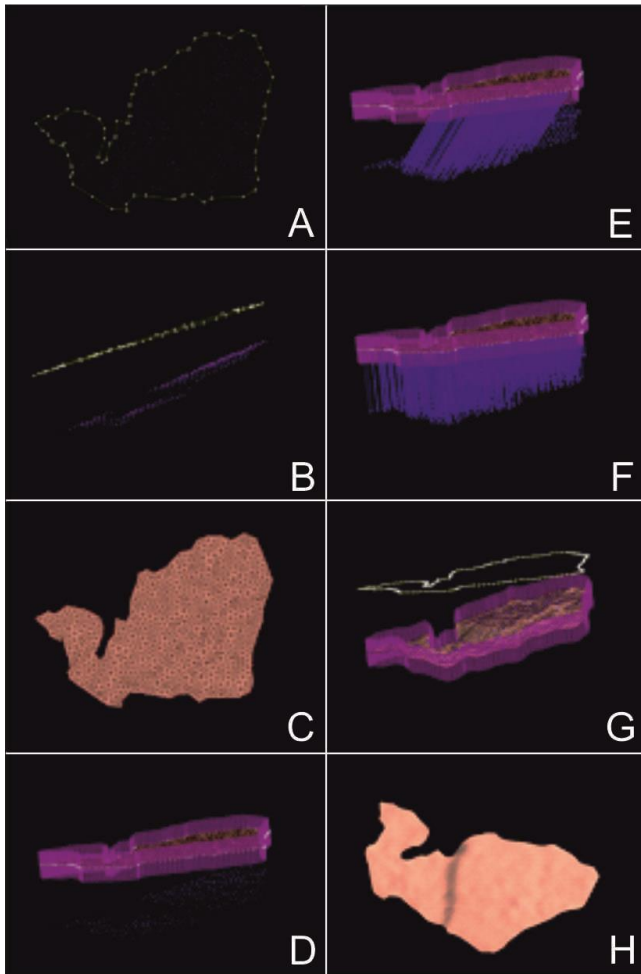


Figura 2.7: Procés de construcció d'una superfície: A) Dibuix d'un polígon que delimiti tots els punts que formen la superfície amb una densitat de nodes similar a la del núvol de punts. B) Núvol de punts i polígon aproximadament paral·lels. C) Es crea una superfície. D) Es construeix un envoltant. E) Projecció del núvol de punts sobre la superfície. F) Projecció del núvol de punts sobre la superfície en una única direcció i perpendicular. G) Adaptació de la superfície al núvol de punts. H) Superfície final.

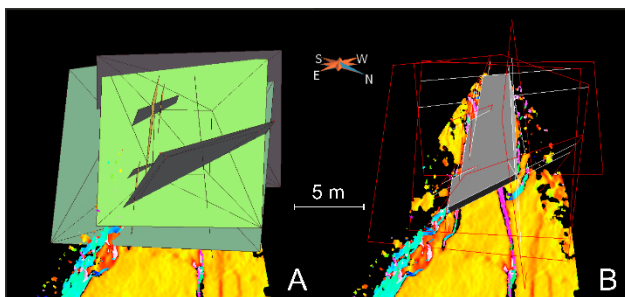


Figura 2.8: Càlcul de volum del model fotogrametria. A, Construcció de superfícies simplificades. B, Model obtingut amb les superfícies simplificades.

2.4.2 Volums per comparació de models (PolyWorks)

Una altra mètode per determinar el volum implicat en la voladura és la comparativa dels models. Per fer aquesta comparació s'utilitza el software *PolyWorks IMInspect*.

Les comparatives de models realitzades són les següents:

- Model LiDAR pre vs. model LiDAR post.
- Model fotogrametria pre vs. model fotogrametria post.
- Model fotogrametria pre alineat amb el LiDAR vs. model fotogrametria post alineat amb el LiDAR.

Per començar la comparativa de volums cal importar i alinear els models al programa *PolyWorks IMInspect*.

Els models LiDAR pre i post ja s'han alineat prèviament (apartat 2.1.1).

Els models fotogrametria pre i post s'han d'exportar des del software *Agisoft Photoscan* amb les normals (vector ortogonal de cada punt segons la distribució dels punts veïns). S'importen al *PolyWorks IMAlign*. Es fa l'alineació i s'exporta com un model poligonal (*.PLY). Finalment s'importen al *PolyWorks IMInspect* per realitzar la comparativa de volums.

Els models fotogrametria pre i post alineats amb el LiDAR s'obtenen realitzant l'alineació dels models fotogrametria pre i post importats com a model poligonal, respecte els models LiDAR.

Una vegada importats tots els models amb l'alineació corresponent es fa la comparació. La comparació consisteix en calcular la diferència de volums entre el model pre i post.

Per fer aquest procés primer cal eliminar les zones amb vegetació per tal de no sobrevalorar el volum. Aquest procés cal fer-lo amb precaució ja que hi ha zones que poden quedar sense informació i modificar considerablement el valor del volum. Després es construeix una superfície a la base i es realitza un model mitjançant la triangulació. Aleshores entre la superfície de la base i el model de triangulació queda un volum tancat. Es calcula el volum pre i el volum post per cada una de les

combinacions i la diferència entre aquests correspon al volum involucrat en la voladura.

Finalment per comprovar que els volums són raonables es mesuren les distàncies en punts homòlegs entre els diferents models per comprovar que donin valors similars.

Realitzar el càlcul de volum amb la comparativa de models combinant les dades LiDAR i els models fotogramètrics permet comparar els resultats i entendre les limitacions i avantatges de cada una de les tècniques.

3. Resultats

3.1 Núvols de punts obtinguts

En total s'han obtingut 4 núvols de punts.

El models LiDAR tenen precisió centimètrica, ja que són dades que s'obtenen directament d'una mesura. La distància entre els punts és d'aproximadament 5 centímetres, obtenint 435.000 punts en el model pre i 560.000 punts en el model post. La georeferenciació és bona ja que s'ha fet a partir de 4 punts en què el GPS Diferencial va estar mesurant entre 30 i 90 minuts segons l'estació. L'Alineació entre models és acurada ja que s'ha realitzat mitjançant l'ús de punts homòlegs i posteriorment per la minimització de la distància entre els punts. Els núvols de punts contenen la informació de les coordenades x, y, z en ETRS 89 zona 31 i la intensitat de cada punt. En el tractament de dades no s'ha utilitzat el paràmetre d'intensitat per minimitzar el temps de processat.

Els models obtinguts amb fotogrametria tenen una menor precisió, ja que s'obtenen de les fotografies digitals, és a dir, la informació és indirecte. La distància entre punts és d'aproximadament 3 centímetres, obtenint 1.530.000 punts en el model pre i 1.430.000 en el post. Cal considerar que gran part dels punts no aporta informació rellevant ja que per cada punt que conté informació el model en genera 10. La georeferenciació es va realitzar des de 5 punts, el GPS mesurava 30 minuts en cada un. L'alineació entre els models és menys acurada ja que s'ha realitzat únicament mitjançant l'ús de punts homòlegs. Els núvols de punts contenen la informació de les coordenades x, y, z en ETRS 89 zona 31 i el valor RGB de cada punt. En el

tractament de dades no s'ha utilitzat el paràmetre de RGB per minimitzar el temps de processat.

3.2 Anàlisi de discontinuïtats

En el filtrat s'han utilitzat els mateixos paràmetres i es poden veure diferències entre els models LiDAR i els models fotogrametria.

La vegetació s'elimina millor en el filtrat del model LiDAR que en el model fotogrametria (Figura 3.1). Cal considerar que la vegetació és problemàtica amb les dues tècniques ja que no permet veure les superfícies.

Un altre aspecte que es pot observar en el filtrat és que els resultats amb els models LiDAR són més nítids. Zones on dominen punts amb una mateixa orientació, en la fotogrametria s'aprecien més zones sense informació, sobretot en la família 1 representada en taronja a la Figura 3.1.

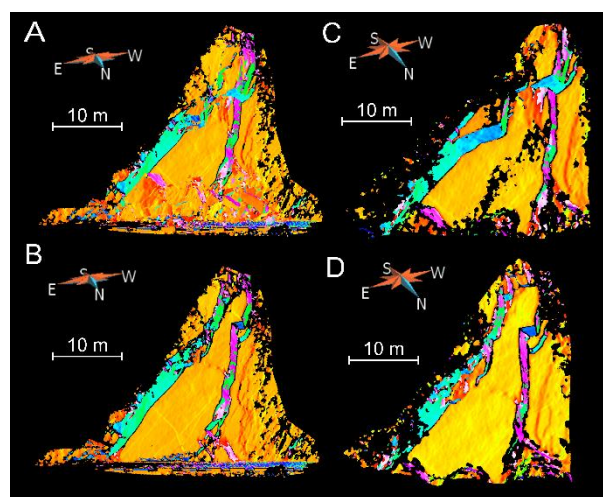


Figura 3.1: Filtrat obtingut a partir dels núvols de punts. L'escala de colors correspon al valor de cabussament. La F1 és taronja, la F2 blau cel, la F3 rosa i verd, la F4 blau clar i la F5 rosa pastel. A, Model LiDAR pre. B, Model LiDAR post. C, Model fotogrametria pre. D, Model fotogrametria post. L'escala és aproximada.

Amb el mètode de fotogrametria i LiDAR es distingeixen les diferents famílies de discontinuïtats de l'aflorament. Les diferències entre les superfícies que es veuen en cada un són degudes a què l'aflorament varia per diversos esdeveniments que es produeixen, com la caiguda de blocs o les voladures controlades (apartat 1.3).

En total es poden diferenciar fins a 6 grups de discontinuïtats amb expressió en superfície (Figura 3.2)(veure imatges a l'Annex II).

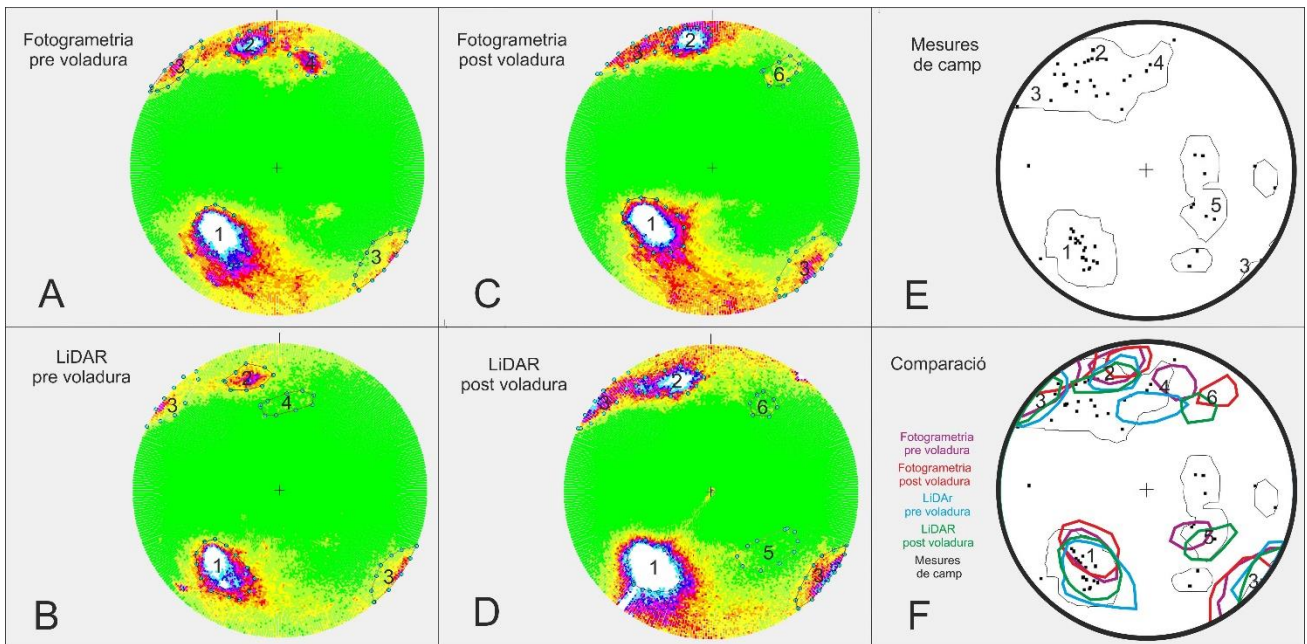


Figura 3.2: Projectió estereogràfica en pols on els polígons amb el número corresponent representen els grups de discontinuïtats que s'han identificat. A, Fotogrametria pre voladura. B, LiDAR pre voladura. C, Fotogrametria post voladura. D, LiDAR post voladura. E, Mesures de camp. F, Comparació de les darreres projeccions.

El grup de discontinuïtats 1 correspon a l'estratificació, es representa en color taronja a la Figura 3.1, i té una orientació de 040/55. És la família de discontinuïtats més representada en tots els models i en les mesures de camp.

El grup de discontinuïtats 2 és una família que es troba representada en els models en color blau cel (Figura 3.1), té una orientació de 165/70. Amb les mesures realitzades amb la brúixola es pot intuir, però amb una visió general del vessant s'aprecia fàcilment.

La discontinuïtat 3 està constituïda per dos polígons ja que és una família amb un cabussament molt vertical i presenta dues direccions complementàries, 130/85 i 306/85. A la Figura 3.1 es representa en color rosa i verd. Les mesures realitzades al camp no són massa representatives ja que només s'han realitzat 3 mesures corresponents a aquesta família, però es pot apreciar amb una visió general del vessant.

La discontinuïtat 4 es representa en color blau clar a la Figura 3.1. És una família amb una orientació de 180/52, i es pot intuir amb les mesures realitzades al camp.

La discontinuïtat 5 té poca expressió en superfície i gairebé no s'identifica en els models (Figura 3.1, color rosa pastel). Tot i això es troba força representada en les mesures de camp, correspon a

una família important si es fa una visió general del vessant, amb una orientació de 310/50.

La discontinuïtat 6 no correspon a cap família, es representa en blau fosc a la Figura 3.1 i té una orientació de 210/60.

Comparant els models LiDAR pre i fotogrametria pre (Figura 3.2 A i B) ambdues tècniques reconeixen les famílies 1, 2 i 3. La família 4 és difícil d'apreciar en el LiDAR ja que en la discontinuïtat on es representava millor va desaparèixer a causa de la caiguda d'un bloc, i és una família amb poca expressió en superfície.

Comparant els models LiDAR post i fotogrametria post (Figura 3.2 C i D) ambdues tècniques reconeixen les famílies 1, 2, 3 i la discontinuïtat 6. La família 5 només es reconeix al LiDAR ja que és una família amb poca expressió en superfície i la discontinuïtat en el model fotogrametria pre no s'aprecia a causa de l'acumulació de blocs caiguts.

Les mesures realitzades al camp (Figura 3.2 D) es poden identificar les famílies 1 i 5. Les famílies 2, 3 i 4 tenen mesures de camp que les representen però no es poden identificar com a 3 famílies diferents. Aquestes mesures són importants ja que aporten informació sobre aquelles discontinuïtats que no tenen expressió en superfície.

Segons l'azimut i el cabussament de les diferents discontinuïtats es pot apreciar una diferència entre els diferents models (Figura 3.2 F).

A la taula 3-I es mostra la diferència en graus amb les combinacions possibles.

Les diferències entre els models fotogrametria pre i post són d'un màxim de 3° en cabussament i de 7° d'azimut; en canvi els models LiDAR pre i post tenen una diferència de 1° de cabussament i de 4° d'azimut. Aquesta variació es relaciona amb el mètode d'alineació utilitzat (amb *Agisoft Photoscan* o amb *PolyWorks*).

Comparant els models LiDAR i fotogrametria pre, la diferència màxima és de 14° tant en l'azimut com en el cabussament; entre els models LiDAR i fotogrametria post la diferència màxima de cabussament és de 14° i 12° de l'azimut. La variació de valors es relaciona amb la desigualtat en el sistema de coordenades.

Segons aquests resultats la variabilitat és major en el cas del cabussament, ja que és de 14° respecte 90 que en l'azimut, que és de 14° respecte 360°.

M. fotog. pre vs. M. fotog. post			M. LiDAR pre vs. M. LiDAR post		
	Cab.	Az.		Cab.	Az.
Família 1	2	-7	Família 1	1	-2
Família 2	-3	-2	Família 2	0	4
Família 3	1	-6	Família 3	-1	1
M. LiDAR pre vs. M. fotog. pre			M. LiDAR post vs. M. fotog. post		
	Cab.	Az.		Cab.	Az.
Família 1	6	-5	Família 1	7	-9
Família 2	-5	-5	Família 2	-7	-11
Família 3	0	-6	Família 3	2	-12
Família 4	-14	-14	Disc.6	-14	-5

Taula 3-I: Diferències en ° entre la mitjana de cabussament i azimut per les diferents combinacions de models.

Una vegada definides les famílies es divideix cada una d'elles en clústers. Els paràmetres que s'han

utilitzat divideixen les famílies amb un número considerat de clústers. Per aquest motiu, s'eliminen aquells clústers de dimensions menors a 50kB (Taula 3-II). En general s'obtenen més clústers amb els models LiDAR que amb els de fotogrametria. Tot i que les discontinuïtats principals s'obtenen amb tots els models.

	M. LiDAR pre		M. Fotog. Pre	
	Totals	Utilitzats	Totals	Utilitzats
Família 1	198	7	89	8
Família 2	66	4	52	2
Família 3	61	10	120	4
Família 4	64	4	11	3
	M. LiDAR post		M. fotog. Post	
	Totals	Utilitzats	Totals	Utilitzats
Família 1	251	13	111	8
Família 2	53	6	42	1
Família 3	67	11	151	10
Família 5	23	5	-	-
Disc. 6	13	1	17	1

Taula 3-II: Número de clústers totals obtinguts en cada model i número de clústers que s'han utilitzat, eliminant aquells que es consideraven de dimensions petites.

3.3 Càlcul de volums

Un objectiu del treball és calcular el volum de material involucrat en les voladures. El càlcul s'ha realitzat utilitzant diferents tècniques: amb la construcció de superfícies i amb la comparació de models.

3.3.1 Volums a partir de superfícies (Gocad)

Per tal de calcular el volum, cal generar un model a partir de les superfícies simplificades.

Degut a que les discontinuïtats que conformen el volum involucrat en la voladura i el despreniment del bloc tenen una geometria complexa, s'ha simplificat dividint el model en 4 parts representats a la Figura 3.3. El volum 1, 2 i 3 constitueixen el bloc superior i el volum 4 correspon al bloc inferior.

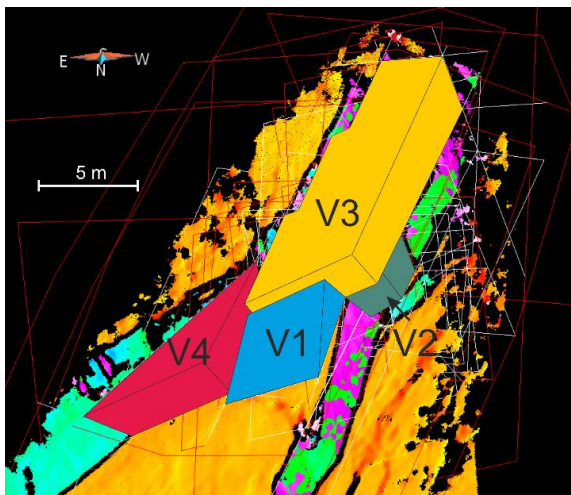


Figura 3.3: Geometria dels 4 volums calculats mitjançant les superfícies simplificades.

Els valors dels volums obtinguts es representen a la taula 3-III.

Per a la construcció de les superfícies simplificades s'ha buscat un punt entremig en el núvol de punts. Tot i això no s'ha seguit un criteri homogeni entre els models LiDAR pre i post i els models fotogrametria pre i post. De manera que els volums calculats presenten irregularitats (Figura 3.4). També cal considerar que alguns volums tenen una geometria complexa i les superfícies tenen una geometria molt simple (volum 3 de la Figura 3.3; E i F Figura 3.4). Aquest fet fa que el volum calculat sigui menor del real.

Volum GOCAD									
		Fotogrametria		LiDAR		Fotogrametria vs LiDAR		Diferència relativa	
Bloc superior	Vol. 1	22.92		19.62		-3.30		16.85%	
	Vol. 2	10.42	196.22	11.07	265.51	0.65	69.29	-5.89 %	-26.10%
	Vol. 3	162.88		185.85		22.96		-12.36 %	
Bloc inferior	Vol. 4	51.73		48.97		-2.76		5.64 %	
Volum total		247.96		216.53		-31.43		14.52%	

Taula 3-III: Volums en m³ mesurats amb la construcció de superfícies simplificades amb els models LiDAR pre i post i els models fotogrametria pre i post.

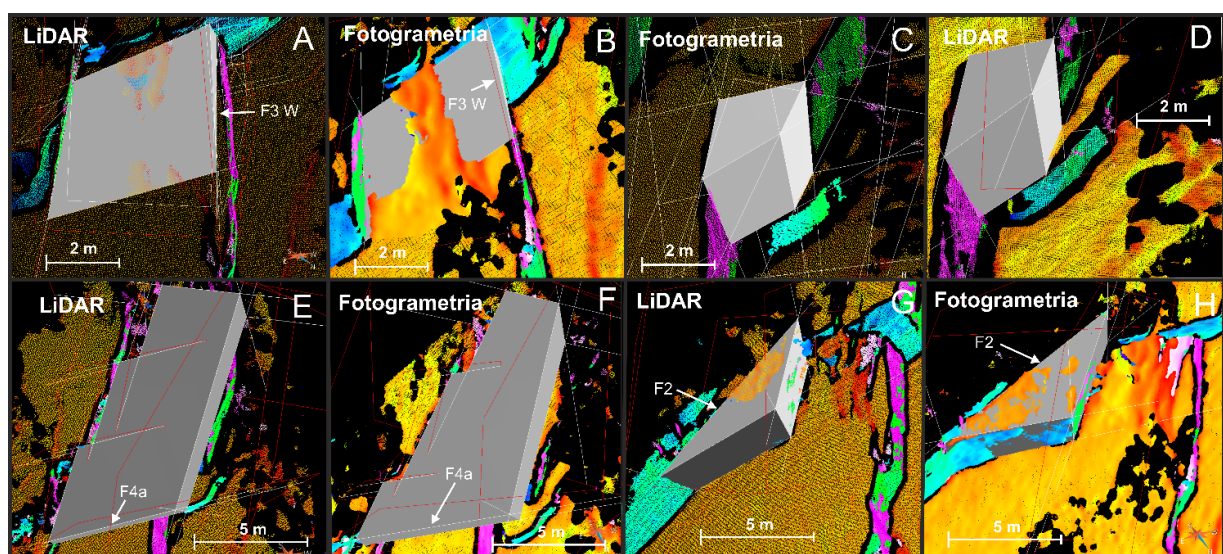


Figura 3.4: Geometries dels volums calculats de: A, Volum 1 LiDAR. B, Volum 1 fotogrametria. C, Volum 2 LiDAR. D, Volum 2 fotogrametria. E, Volum 3 LiDAR. F, Volum 3 fotogrametria. G, Volum 4 LiDAR. H, Volum 4 fotogrametria. Les fletxes indiquen superfícies simplificades que es troben en diferent posició entre els models LiDAR i els models fotogrametria. L'escala és aproximada.

3.3.2 Volums per comparació de models (PolyWorks)

Finalment s'han calculat els volums amb la comparació dels models fotogrametria pre i post, models LiDAR pre i post, i models fotogrametria alineada amb el LiDAR pre i post. En cada combinació s'han mesurat els volums del bloc superior, del bloc inferior, i el volum total. Els resultats obtinguts es mostren a la taula 3-IV.

Cal posar èmfasi al volum inferior ja que no és comparable el resultat entre la fotogrametria i el LiDAR ja que l'aflorament varia. Entre el model fotogrametria pre i el model LiDAR pre va caure un bloc que distorsiona el resultat. Per aquest motiu s'ha fet un nou càlcul, s'ha comparat el núvol de punts entre el model fotogrametria pre model LiDAR pre. D'aquesta manera s'ha obtingut el volum de material involucrat en la caiguda del bloc, amb un valor de 19,60 m³. Si se li suma el valor del bloc amb el del LiDAR dona 50,08 m³.

Els resultats entre fotogrametria i LiDAR varien en més poc més d'un 10%. Aquest fet es relaciona amb la resolució i precisió de cada model.

Els resultats entre fotogrametria i fotogrametria alineada són similars als anterior, ja que la fotogrametria alineada al LiDAR s'adapta.

Els valors de volum entre fotogrametria i fotogrametria alineada són força similars, i divergeixen poc més del 2%. Aquest fet és raonable ja que els models estan alineats i s'ha adaptat el model de triangulació de la fotogrametria al LiDAR.

3.3.3 Comparació entre els dos mètodes utilitzats

Els resultat de la comparació de càlcul de volums entre la construcció de superfícies simplificades (Gocad) i la comparació de models (PolyWorks) es mostra a la Taula 3-V.

Els resultats obtinguts en els models de fotogrametria difereixen menys d'un 5%. En canvi els models de LiDAR aproximadament un 10%. Segons aquests resultats si es treballa amb els models fotogramètrics les dues tècniques donen volums similars. En canvi quan es treballa amb models LiDAR els volums varien força més segons com es realitza el càlcul de volum.

GOCAD vs. PolyWorks				
	Fotogrametria		LiDAR	
Vol. Inferior	-1.11	-2.21%	4.76	10.14%
Vol. Superior	9.86	4.77%	13.11	7.16%
Vol. Total	8.32	3.23%	4.90	2.01%

Taula 3-V: Diferència en m³ i percentatge entre els volums obtinguts amb Gocad i amb PolyWorks.

Volum calculat PolyWorks				Diferència de volum PolyWorks					
	Fotog.	LiDAR	Fotog. alineat amb LiDAR	Fotog. vs. LiDAR		Fotog. vs. Fotog. alineat amb LiDAR		Fotog. alineat amb LiDAR vs-LiDAR	
Volum inferior	46.97	30.48 (*+ 19.60)= 50.08	48.85	3.11	-6.21%	1.88	-3.85%	-1.23	-2.46%
Volum superior	183.11	206.67	204.55	23.56	-11.40%	21.44	- 10.48%	-2.12	-1.02%
Volum total	243.06	257.19	260.01	14.13	-5.49%	16.94	-6.52%	2.82	1.09%

Taula 3-IV: Volum calculat en m³ amb els models fotogrametria pre i post, models LiDAR pre i post, models fotogrametria alineada pre i post. Diferència de volums en m³ i en percentatge. * El valor s'ha obtingut amb els models fotogrametria pre i LiDAR Pre.

4. Discussió

Els models LiDAR i fotogrametria presenten diferències de precisió i de densitat de punts. La diferència en la precisió ve donada pel tipus de dades utilitzat. Els models LiDAR tenen una precisió superior als models fotogrametria per la procedència de les dades, s'obtenen a partir de mesures directes. En canvi els models fotogrametria s'obtenen a través de les fotografies digitals, aplicant un seguit d'algoritmes.

La distància entre punts en els models LiDAR és de 5 cm i en els models de fotogrametria és de 3 cm. Per tant, els models fotogrametria tenen una densitat major, però molts punts no contenen informació, ja que s'extreu un núvol de punts a través d'un model de triangulació no adequat a la resolució de les dades. Aquest fet fa que el processat en els models fotogrametria sigui més lent, sense aportar informació afegida. Per solucionar aquest problema caldria filtrar els models fotogrametria per aconseguir una densitat de punts adequada, o caldria ajustar els paràmetres utilitzats en la generació dels models amb *Agisoft Photoscan* per tal d'ajustar la densitat del núvol de punts a la resolució del model.

Els models presenten diferències en la georeferenciació, però aquest fet no està relacionat amb el mètode emprès (LiDAR o fotogrametria) sinó en el temps utilitzat en prendre les mesures amb el GPS, com més temps de mesura major precisió. Un altre aspecte relacionat amb la georeferenciació és el mètode d'alineació utilitzat. En el cas de l'alineació a través de punts homòlegs i l'ús de l'algoritme que minimitza distàncies (*PolyWorks*) s'obtenen més bons resultats que utilitzant únicament els punts homòlegs (*Agisoft Photoscan*).

El procés de filtrat generat amb el software Geomodels permet eliminar millor la vegetació en les dades LiDAR comparat amb els de fotogrametria. Això es deu a l'alta densitat de punts. Com el filtrat consisteix en eliminar els punts segons unes condicions determinades per l'usuari (un número de punts concret, en una distància i amb un grau de tolerància determinat) i en la fotogrametria hi ha una densitat de punts major,

conjunts de punts que es consideren aïllats en el LiDAR no ho són en la fotogrametria.

La vegetació és una limitació destacable en ambdues tècniques, ja que aquesta distorsiona el model de triangulació.

La major precisió dels models LiDAR permeten fer un filtrat més nítid, en canvi en els models fotogrametria el conjunt de punts corresponent a una discontinuïtat, presenta zones sense informació.

En total s'han identificat 5 famílies de discontinuïtats mitjançant els models LiDAR, models fotogrametria i les observacions realitzades al camp. Cal destacar la importància del treball de camp ja que les tècniques de fotogrametria i dades LiDAR només detecten aquelles superfícies amb expressió en superfície, és a dir que afloren. Es poden detectar discontinuïtats que no corresponen a cap família (discontinuïtat 6), o no detectar famílies destacables. En aquest estudi la família 5 és important, i només es detecta en el model LiDAR post, però en les observacions de camp s'ha pogut determinar la seva rellevància. Per tant, sempre cal complementar els models amb les observacions realitzades al camp.

L'orientació de les famílies varia segons els models, amb un error major en el cas del cabussament comparat amb l'azimut (Taula 3-I). Aquest fet es relaciona amb la georeferenciació dels models.

Les diferències entre els models fotogrametria pre i post són d'un màxim de 3° en cabussament i de 7° d'azimut; en canvi els models LiDAR pre i post tenen una diferència de 1° de cabussament i de 4° d'azimut. Aquesta variació es relaciona amb el mètode d'alineació utilitzat, en el cas de l'aplicació de *PolyWorks* hi ha un error de poc més del 1%, i en el de *Agisoft Photoscan* de poc més del 3%. Per tant les diferències segons el tipus d'alineació són poc marcades.

En els models LiDAR i fotogrametria pre la diferència màxima és de 14° tant en l'azimut com en el cabussament; entre els models LiDAR i fotogrametria post la diferència màxima de cabussament és de 14° ,i 12° de l'azimut. Segons aquests resultats, l'error màxim és d'un 15% en el cabussament. Aquest es relaciona amb la diferència

de precisió de les coordenades obtingudes amb el GPS entre els models LiDAR i fotogrametria.

Els paràmetres d'entrada per a l'agrupació de clústers aplicats en aquest treball no són els adequats, ja que s'obtenen un número excessiu de clústers. Es creen molts arxius que corresponen a una regió d'una discontinuïtat. Tot i això, si s'eliminen els arxius de dimensions menors a 50 kB, i posteriorment es fa una tria segons si corresponen a una superfície independent o no, s'obtenen els clústers que tenen representació en superfície. En general s'obtenen més clústers amb els models LiDAR que amb els de fotogrametria. Tot i que els grups de les discontinuïtats principals s'obtenen amb tots els models.

Les mesures obtingudes al camp per si soles no són representatives ja que només es poden identificar les famílies 1 i 5. Hi ha mesures realitzades de les altres famílies, però no són suficients com per identificar-les. Aquest fet es justifica per les limitacions en les condicions d'accés a l'aflorament. Tot i això, les observacions al camp són molt importants per complementar les dades que no es poden observar en els models, com ara la identificació de discontinuïtats que no tenen expressió en superfície.

Les diferències de volum entre superfícies simplificades són degut a problemes en la ubicació dels plans que limiten el volum, per no establir uns criteris homogenis a l'hora de construir les superfícies en els models LiDAR i en els models fotogrametria. La diferència entre els models és de fins a un 17% (Taula 3-III). També és important destacar que dividir el volum per fer geometries més simples aporta un error major.

Per millorar aquest procés seria adequat establir un criteri per la construcció de superfícies i fer el model com a un únic volum sense dividir-lo en diferents geometries. Una altra millora seria adaptar al model les superfícies simplificades per tal d'obtenir volums més pròxims a la realitat.

Els resultats entre els models fotogrametria i LiDAR varien poc més d'un 10%. Aquest fet es relaciona amb la resolució i precisió de cada model.

Els resultats entre fotogrametria i fotogrametria alineada són similars als anteriors. I els valors de volum entre LiDAR i fotogrametria alineada divergeixen poc més del 2%. Aquest fet és raonable ja que amb l'alineació els models fotogrametria s'han adaptat a la triangulació dels models LiDAR.

Les diferències entre els volums dels models fotogrametria i LiDAR es poden determinar per:

- La triangulació s'ajusta més al LiDAR ja que les dades són més precises.
- L'eliminació de vegetació modifica el model i es dona una interpolació de la triangulació allunyant-se del valor de volum real.
- El volum seleccionat no és exactament el mateix entre els models pre i post, i es comptabilitza volum que no està implicat.

Els resultats obtinguts amb *Gocad* i *PolyWorks* en els models de fotogrametria difereixen menys d'un 5%. Per tant, s'obtenen resultats força similars. Cal tenir en compte les limitacions que presenta cada un dels mètodes. En el cas del *Gocad* són superfícies simplificades i en el del *PolyWorks* la triangulació s'adapta a un model en què molts punts contenen informació que no és real i s'adapta a la vegetació.

Els models LiDAR presenten diferències màximes de poc més del 10%. Encara que les diferències són poc significatives és més acurat treballar amb *PolyWorks*. Tot i que cal tenir en compte la limitació de la vegetació.

5. Conclusions

Per aplicar les tècniques de dades LiDAR i fotogrametria calen principalment dues condicions:

- Les discontinuïtats han de tenir expressió en superfície, és a dir, han d'aflorar.
- La vegetació ha de ser escassa.

Segons els resultats obtinguts en el treball es pot concloure:

- El cost per l'obtenció dels models fotogrametria és més econòmic que l'obtenció de dades LiDAR.
- L'Obtenció de dades al camp és més lent amb el LiDAR que amb la fotogrametria.

Però cal considerar que s'han de prendre les mesures del GPS, i que els resultats de les orientacions de les discontinuïtats difereixen segons el temps de mesura emprat. Si es volen obtenir bons resultats cal prendre mesura durant una hora o més en cada punt que es realitza una fotografia o escaneig. Aquest fet fa que el temps en el camp sigui similar amb les dues tècniques.

- El processat per a l'obtenció del núvol de punts és més curt amb les dades LiDAR que amb la fotogrametria. En les dades LiDAR només cal georeferenciar i alinear. En canvi en la fotogrametria cal construir els dos models mitjançant les fotografies, georeferenciar amb les dades del GPS i finalment alinear.
- Hi ha diferències en el temps de processat i en els resultats obtinguts per la densitat de punts segons els models. Els models LiDAR tenen menor densitat de punts, això fa que el processat sigui més ràpid comparat amb els models fotogrametria, que tenen major densitat de punts i molts d'aquests no aporten informació afegida. Els resultats obtinguts també difereixen ja que s'han aplicat els mateixos paràmetres en tots els models, i alguns processats van condicionats pel nombre de punts segons un radi concret, és a dir, varien segons la densitat de punts. Per aquest motiu els resultats en el filtrat i en els clústers difereixen amb les dues tècniques. Per tal d'evitar aquests problemes s'hauria de realitzar un filtrat quan s'obté el núvol de punts de fotogrametria per disminuir els punts que no contenen informació i aconseguir la resolució corresponent. O bé realitzar els models amb uns paràmetres diferents als utilitzats en aquest treball, que permetin ajustar més la densitat respecte la precisió del model.
- Per identificar i caracteritzar l'orientació de les discontinuïtats s'obtenen bons resultats amb els models LiDAR i els fotogrametria.
- Segons els resultats obtinguts en els càlculs de volums el procés més acurat per l'obtenció de volum és el tractament dels models LiDAR amb la comparació de models (*PolyWorks*). Si els resultats accepten una variació del 5%, es pot aplicar

el model LiDAR i el model fotogrametria al càlcul de volum mitjançant superfícies simplificades. Si els resultats accepten una variació de poc més del 10% els models fotogrametria són aptes pel càlcul de volums mitjançant la comparació de models.

Les dades LiDAR i la fotogrametria són molt bones eines per a la caracterització d'una esllavissada ja que permeten concretar les diferents famílies de discontinuïtats i determinar les orientacions amb resultats molt bons. També es poden determinar volums aplicant les tècniques de construcció de superfícies simples o comparant models de la mateixa zona en diferents estadis de temps amb resultats força òptims. Els resultats de volum no difereixen més del 10%, per tant, segons l'estudi que es vulgui realitzar amb els models fotogrametria es poden obtenir bons resultats a un preu més econòmic.

Un aspecte a destacar és que són tècniques que permeten analitzar zones que són inaccessibles, o simplement reduir el nivell d'exposició en l'estudi de zones inestables.

6. Agraïments

Aquestes línies són un petit reconeixement a aquelles persones que m'han ajudat a tirar endavant el meu projecte.

Primer agrair el suport a la meva tutora, Marta Guinau, per tots els coneixements que m'ha transmès, pel temps que m'ha dedicat i per oferir-me l'opció d'un treball que m'ha omplert molt. Al Manu Royán, per la seva paciència en ensenyar-me com utilitzar el PolyWorks i a David García per ensenyar-me com funciona el LiDAR.

Agrair, també, el suport dels meus pares Ramon i Eva, que m'han acompanyat a la zona d'estudi i que m'han donat el seu suport i ànims per tirar-lo endavant. Al meu germà Adrià, per ajudar-me en tot el que he necessitat. Als amics/gues que m'han donat suport al llarg de la realització del treball i finalment als companys del Màster, per els moments d'estrès i de desconnexió que hem compartit tots junts en aquesta fase final.

7. Referències

Articles

- Fernández, O. (2005): Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. *Journal of Structural Geology* 27, 855–858 pp.
- Garcia-Sellés, D., Arbués, P., Falivene, O., Gratacos, O., Tavanil, S., i Muñoz, J.A. (2011): Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. *Computers & Geosciences* 37, 1584–1594 pp.
- Jaboyedoff, M.; Oppikofer, T.; Abellán, A.; Derron, M.H.; Loye, A.; Metzger, R. i Pedrazzini, A. (2010): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61:1, 5-28pp.
- Lato, M.J. i Vöge, M. (2012): Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar an photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 54, 150-158 pp.
- Sturzenegger, M. i Stead, D. (2009)*1: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 267-287 pp.
- Sturzenegger, M. i Stead, D. (2009)*2: Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rocks cuts. *Engineering Geology*, 106, 163-182 pp.

Llibres

- Heritage, G.L. i Large, A.R.G. (2009): Laser Scanning for the Environmental Sciences. *John Wiley & Sons*, 288 pp.

Manuals

- Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.0 (2012). *Agisoft LLC*, 49 pp.
- PolyWorks V10 Beginner's Guide (2007): *InnovMetric Software Inc.*, 121 pp.

Pàgines web

- ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya). Mapa topogràfic a escala 1:50.000 [en línia]. *Generalitat de Catalunya* [Consultat l'abril de 2014]. URL: < <http://www.icc.cat/vissir3/> >
- Nació Digital: El desenrunament de la carretera de Vilaverd pot tardar dos mesos [en línia] [Consultat el juny de 2014]. URL: < <http://www.naciodigital.cat/delcamp/laconcadiari/noticia/80/carretera/tallada/vilaverd/despreniment/pedres/calçada> >

Treballs

- Fernández Bellon, O. (2004): Reconstruction of geological structures in 3D: An exemple from the Southern Pyrenees. Appendices. *Phd Thesis*, 3-8 pp.
- Sánchez Sobrino, J.A. (2007): Introducción a la fotogrametria. *Cátedra de Topografía. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid*, 45 pp.