

Utilizzo dei sistemi di telerilevamento per il monitoraggio di fenomeni franosi: il progetto WISELAND

Michela Vellico (*), Paolo Sterzai (*), Carla Pietrapertosa (**), Alessandro Corsini (***), Francesco Ronchetti (***), Matteo Berti (****), Paolo Mora (****), Franco Coren (*)

(*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, B.go Grotta Gigante 42/C
34010 Sgonico (TS), tel: +39 04 021401, fax: +39 040 327307
e-mail: mvellico@ogs.trieste.it, psterzai@ogs.trieste.it, fcoren@ogs.trieste.it

(**) CNR-IMAA – Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, 85050 Tito Scalo, Potenza, Italy
tel: +39 0971 427111, fax: +39 0971 427271, e-mail: pietra@imaa.cnr.it

(***) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio Emilia, Largo S. Eufemia 19
41100 Modena, tel: +39 059 2055864, fax: +39 059 2055887, e-mail: alessandro.corsini@unimore.it,
francesco.ronchetti@unimore.it

(****) Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 6
40127 Bologna, tel: +39 051 2094541, fax: +39 051 2094522 7, e-mail: matteo-berti@unibo.it, paolo.mora@unibo.it

Riassunto

I fenomeni franosi sono ampiamente diffusi in tutto il territorio italiano e sono responsabili di ingenti perdite economiche, stimate nell'ordine dei 2 miliardi di euro l'anno negli ultimi 50 anni. Lo scopo del progetto WISELAND, afferente al Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN) 2007, finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MIUR), è la creazione di un sistema integrato ed innovativo di sensori *wireless* ed *airborne* per il monitoraggio e il controllo di fenomeni franosi a cinematica lenta. La sperimentazione di tale sistema è stata condotta su una frana per scorrimento-colata, tipica dell'Appennino: la frana di Valoria, in provincia di Modena. Nel corso del 2009 e 2010 sono stati condotti diversi rilievi aerotrasportati con sensoristica *Lidar* e iperspettrale. I primi hanno consentito di ricostruire accurati Modelli Digitali del Terreno (DTM), dalla cui analisi si è stati in grado di caratterizzare le componenti principali di una frana. Inoltre, tramite un'analisi differenziale e geomorfometrica dei DTM (relativi a rilievi effettuati in passato mediante la stessa metodologia), si sono individuati e monitorati gli spostamenti avvenuti in un certo arco temporale. I rilievi iperspettrali hanno contribuito anch'essi alla caratterizzazione dei fenomeni franosi; in particolare si è dimostrato che i risultati ottenuti dalla *Principal Component Analysis* (PCA) sono correlabili con la rugosità del terreno ed il dinamismo di frana e consentono di metterne chiaramente in risalto le zone di accumulo e deplezione. Oltre ai *datasets* telerilevati, si sono utilizzati dei dati provenienti da una rete sperimentale di sensori *wireless* (WSN) installata nell'ambito del progetto, che ha permesso di rilevare gli spostamenti differenziali della frana in modo efficace e poco costoso. L'utilizzo combinato della metodologia *Lidar*, iperspettrale e di reti a sensori *wireless* (WSN) si è dimostrata, pertanto, un valido strumento in grado di monitorare periodicamente un fenomeno franoso. La potenzialità dei risultati aumenta con l'interpretazione congiunta dei *datasets*. Il monitoraggio con queste metodologie può essere inoltre facilmente programmato sia temporalmente che spazialmente, e questo garantisce una specificità dell'informazione attualmente non garantita da altre metodologie operative.

Abstract

Landslides are a widespread phenomenon over the Italian territory and economical losses due to this hazard are impressive (an average of 2 billion of euros per year in the last 50 years). In the framework of the WISELAND research project (Integrated Airborne and Wireless Sensor Network systems for Landslide Monitoring) funded by the Italian Government, we are testing new

monitoring devices devoted to control large landslides at different degrees of activity. Integrated monitoring tools with a strong innovative character are being explored, in particular ground-based wireless sensor networks combined with airborne laser-scanning and hyperspectral surveys. This activity has been tested on a typical Apennine landslide, the landslide of Valoria, province of Modena. Lidar and hyperspectral datasets have been acquired in 2009 and 2010. Lidar data allowed to calculate a very accurate Digital Terrain Model (DTM) of the Valoria landslide, useful to identify its landslide framework. From the differentiation of the laser-scan data it was possible to identify the landslide displacement in between the Lidar acquisitions. The hyperspectral data allowed to characterize the landslide phenomenon, specially taking into account the Principal Component Analysis (PCA) that can be correlated with the landslide dynamic, allowing to identify the accumulation and depletion zones., An experimental wireless sensor network (WSN) has been installed in addition to remote sensing methodologies with the aim to identify the landslide differential displacements in an effective and inexpensive way. The combined use of Lidar, hyperspectral and wireless sensor network (WSN) methodology proves, therefore, a valuable tool to periodically monitor a landslide. A landslide monitoring can so be easily programmed, both temporally and spatially, as not yet allowed by other operating methodologies.

Metodologie di telerilevamento: *laser-scanning* e iperspettrale

Il *Lidar* o *laser-scanning* è una metodologia divenuta di ampio utilizzo nelle applicazioni topografiche che implicano un utilizzo di prodotti quali il modello digitale del terreno (DTM) e di superficie (DSM), dato che permette di acquisire direttamente nuvole di punti 3D con grande accuratezza (Wehr et al., 1999). La possibilità di valutare con ottima accuratezza anche il DTM in zone coperte da vegetazione ha permesso un larga diffusione del dato *laser-scan* anche nel nostro paese.

Un tipico sistema *Lidar* è composto da un laser montato su di una unità di scansione (composta da uno specchio oscillante o rotante) che ingloba un sistema POS (*Position and Orientation System*) composto da un sistema di posizionamento GPS differenziale (DGPS) e un sistema di navigazione inerziale (INS) costituito da tre accelerometri e tre giroscopi laser (Cramer, 1999). L'unità laser misura la distanza dal sensore alla superficie da mappare tramite l'intervallo temporale intercorso tra l'immissione dell'impulso e la registrazione dello stesso, mentre il sistema integrato GPS/INS registra il posizionamento, l'assetto e l'orientamento della piattaforma. Tramite algoritmi specifici di calcolo della traiettoria è possibile ottenere nuvole di punti a georeferenziazione diretta (Axelsson, P., 1999; Baltsavias E.P., 1999).

Nel presente lavoro si sono utilizzati dati *laser-scan* acquisiti con il sistema Optech ALTM3100, in grado di mantenere un'impronta a terra molto contenuta ed avente una frequenza operativa massima di 100 kHz. Nonostante consentano di ottenere nuvole di punti molto dense (maggiori di 10 punti/m²), i sistemi *Lidar*, essendo quasi monocromatici, restituiscono dati aventi informazioni spettrali molto contenute (Coren et al., 2006). Per ovviare a questo problema, si è deciso l'abbinamento sulle stesse zone di acquisizione di dati derivanti da una camera iperspettrale. Il sistema iperspettrale utilizzato è l'AISA Eagle 1K, fabbricato dalla Specim (Hyvärinen, 2003), che permette un'acquisizione massima di 255 bande nell'intervallo spettrale dal visibile all'infrarosso vicino. Il sistema di acquisizione lavora in modalità *pushbroom* ed è composto da una camera, un sistema proprio GPS/IMU, un'unità di acquisizione con *software* specifico e un PC come unità di controllo.

Acquisizione ed elaborazione di dati telerilevati

Per lo studio della frana di Valoria (provincia di Modena, Italia) è stato utilizzato il sistema ALTM 3100 (® Optech), con cui sono stati acquisiti dati *Lidar* nel 2006, 2007 e 2009. L'area di studio è stata sorvolata ad una quota media di 1500 metri dal suolo, acquisendo dati *Lidar* con densità media di 4 punti/m² ed una frequenza di scansione di 70 kHz. Tutte le acquisizioni sono state eseguite impostando questi stessi parametri. I *datasets* sono stati successivamente processati con il *software*

PosPac (® Applanix), che ha permesso il calcolo della traiettoria, fondendo i dati provenienti dall'IMU (acquisiti con un campionamento a 200 Hz) con i dati GPS (campionato ad 1 Hz), mediante l'applicazione del filtro di Kalman. La nuvola di punti georeferenziata finale è stata ottenuta con il *software* DashMap (® Optech), mentre le classificazioni sono state eseguite utilizzando il *software* TerraScan (® Terrasolid). Con questa procedura (Axelsson, 1999) è stato possibile ottenere, per ogni acquisizione, un DTM di ottima qualità della frana di Valoria. Tipici errori commessi nella georeferenziazione della nuvola di punti sono di 0.10 m per la componente verticale, dell'ordine di 0.5 m in planimetria. I dati iperspettrali sono stati acquisiti il 26 giugno 2009 con il sistema AISA Eagle (® Specim). Il volo è stato eseguito ad un'altezza di 3000 m dal terreno, impostando il sistema per la registrazione di 255 bande ed una risoluzione al suolo del dato geocodificato di 2 m. Il *dataset* finale geocodificato è stato ottenuto con il *software* HSP, sviluppato all'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS. Sia i dati *laser-scan* che i dati iperspettrali sono stati geocodificati sull'ellissoide WGS84, secondo la proiezione UTM fuso 32 N.

Modello digitale del terreno differenziale derivato dalle acquisizioni Lidar

La frana di Valoria è una frana su ampia scala, con un *earthflow* attivo composto principalmente da strati argillosi di bassa elasticità (Manzi et al., 2004; Corsini et al., 2006; Corsini et al., 2007). Essa si è completamente riattivata nel 2001 con spostamenti intermittenti stagionali anche di centinaia di metri. L'evoluzione recente della frana ha causato un significativo cambiamento della morfologia del pendio con conseguente formazione di zone di accumulo e deplezione (Sassa et al., 2008; Fell et al., 2000).

Da immagini fotogrammetriche si sono calcolati e analizzati dei modelli digitali del terreno, da cui è stato possibile, differenziando le acquisizioni del 1973 e del 2003, ottenere un'identificazione chiara delle zone di deplezione e di accumulo dopo la riattivazione della frana del 2001 (Corsini, 2007). I dati Lidar acquisiti nel 2006, 2007 e 2009 hanno permesso una quantificazione più precisa delle zone di deplezione nella *source zones* a monte, nonché una valutazione dell'accumulo nella *toe zone* a valle. La frana ha avuto una significativa accelerazione nell'inverno 2008-2009; il relativo differenziale, ottenuto dai dati Lidar, è visibile in Figura 1. Più specificatamente si è stimata una deplezione di circa 460000 m³ nella *head zone* della frana.

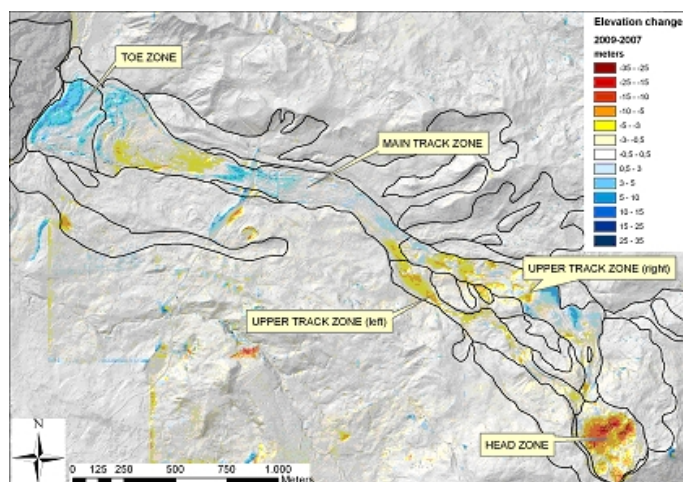


Figura 1. Mappa di deformazione ottenuta dalla sottrazione di due DTM Lidar, relativi alle acquisizioni del 2007 e del 2009. Le coordinate del punto estremo a NW sono: 44° 20' 09.37'', 10° 30' 57.19'', mentre quelle del punto estremo a SE sono: : 44° 18' 16.63'', 10° 34' 24.51''.

Analisi delle Componenti Principali (PCA) applicata al dato iperspettrale

Nella elaborazione di immagini iperspettrali spesso si ha a che fare con un grande numero di bande tra loro correlate. A volte è conveniente effettuare la cosiddetta Analisi delle Componenti Principali (PCA) (Jolliffe, 2002; Coren et al., 2005) al fine di ridurre la quantità di dati senza perdere il contenuto in informazioni spettrali, identificando i sottoinsiemi di bande spettrali che sono strettamente correlate tra di loro. Come principio generale, la PCA è un procedimento matematico, spesso applicato in geodesia, che trasforma una serie di variabili correlate in un numero limitato di variabili non correlate, chiamate "componenti principali". Questa operazione viene eseguita tramite una trasformazione lineare delle variabili, ottenendo un nuovo sistema di riferimento nel quale le nuove variabili vengono ordinate in ordine decrescente di varianza: infine si proiettano i dati solo sui piani coordinati che corrispondono a variabili con varianza maggiore, scegliendo un numero appropriato di variabili da trascurare. Così è possibile produrre delle immagini svincolate tra di loro dal punto di vista spettrale: ogni pixel contiene l'informazione di radianza derivante dalle immagini originali, permettendo una migliore discriminazione delle proprietà superficiali del terreno e rendendo possibile la rimozione delle bande rumorose.

Nel caso della frana di Valoria, come già accennato, si è deciso di fare un'acquisizione a 252 bande, con lo scopo di valutare le potenzialità della metodologia iperspettrale applicata alle frane. 44 bande sono state eliminate dal calcolo visto che risultavano particolarmente rumorose, specialmente nella zona spettrale del *Near Infrared*. Facendo il calcolo della PCA con il *software* ENVI è stato possibile identificare un sottoinsieme di variabili indipendenti: causa una forte correlazione tra le bande, solamente 10 immagini sono state identificate come accettabili dal punto di vista del rapporto segnale/rumore mentre tutte le altre presentavano un rumore di fondo molto pronunciato. Nella Figura 2 si riporta l'immagine PCA caratterizzata da varianza maggiore.

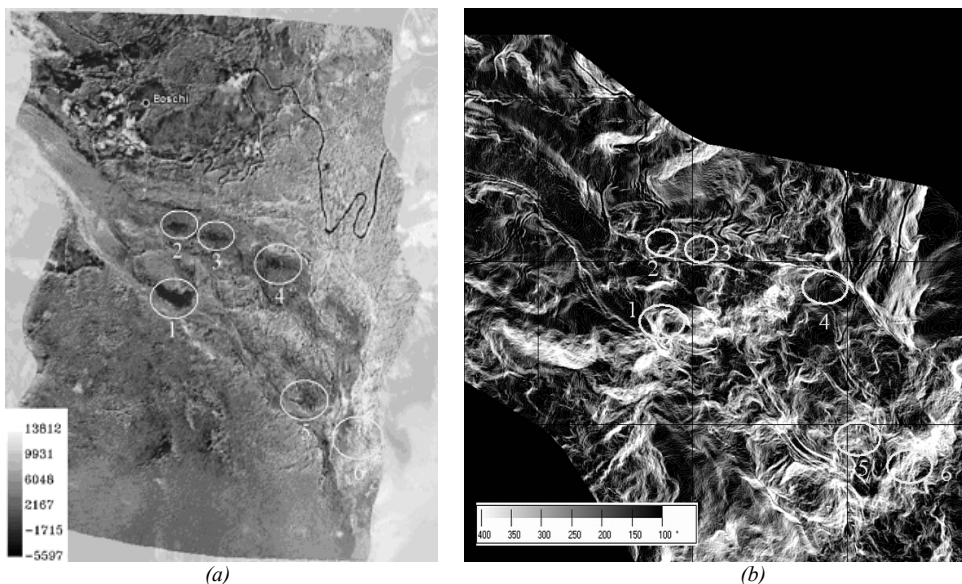


Figura 2. (a) Immagine a varianza maggiore, risultante dal calcolo della PCA dell'immagine iperspettrale della frana di Valoria, (b) immagine del gradiente del DTM calcolato nel 2006. Le coordinate del punto estremo a NW sono: $44^{\circ} 19' 30.10''$, $10^{\circ} 32' 39.03''$, mentre quelle del punto estremo a SE sono: $44^{\circ} 18' 31.29''$, $10^{\circ} 33' 35.19''$.

Si nota che nelle sei zone in esame i valori derivanti dalla PCA sono estremamente bassi, il che indica un decorrelazione molto pronunciata delle bande. Dal punto di vista fisico si potrebbe pensare che le zone corrispondano ad un terreno la cui elevata rugosità si riflette nella spiccata

decorrelazione della bande iperspettrali. Interessante risulta l'interpretazione delle stesse zone nell'immagine dei gradienti del DTM: le zone 1, 5 e 6 presentano anche uno *slope* elevato, che concorda anche con gli spostamenti derivanti dal differenziale *Lidar*. Interessante è inoltre notare che tali zone si possono identificare come zone di ablazione. Le zone 2, 3 e 4 invece presentano valori bassi della PCA e dello *slope* e corrispondono a zone di accumulo della frana. Questo risultato risulta interessante e apre possibilità di approfondimento sull'uso dell'iperspettrale nello studio di frane.

Reti a sensori *wireless*

La metodologia di monitoraggio di reti a sensori *wireless* (WSN) offre vantaggi notevoli nel monitoraggio di fenomeni naturali come le frane (Werner-Allen et al., 2006). I vantaggi comprendono la connettività a qualsiasi tipo di sensore, il costo contenuto dei componenti, la semplicità nell'installazione e la possibilità di una integrazione immediata via web. Il progetto di ricerca WISELAND mira a sviluppare e implementare un prototipo di sistema WSN per acquisizioni di serie temporali distribuite spazialmente e rilevanti al fine del monitoraggio di frane (pressione interstiziale nel corpo di frana, spostamenti di superficie, umidità del terreno ecc.).

Nel luglio 2009 un prototipo di WSN è stato installato nelle zone 1, 2 e 4 della frana di Valoria (vedi Figura 2). Le zone sono state scelte da un'analisi sia del dato *Lidar* differenziale e iperspettrale (vedi Figura 1), sia delle misurazioni GPS effettuate nell'ambito del progetto PRIN07 - *Multi-temporal Surveying and analysis in the Framework of a Geo-Spatial Information System for monitoring the movement and deformation of areas subjected to Environmental Risk*.

La rete è costituita da quattro nodi (Crossbow Micaz, gestiti con il *software* TinyOS) che seguendo un determinato *routing* statico inviano pacchetti di dati (uno ogni 15 minuti) a un nodo principale connesso a un computer portatile. Lo sforzo principale nell'ambito del progetto WISELAND (inizio 2007), però, è stato dedicato a migliorare le prestazioni dell'*hardware*. In particolare, i nuovi algoritmi di compressione dei dati sono stati sviluppati al fine di ridurre il consumo di energia e migliorare la trasmissione dei dati. Tuttavia, nonostante il corretto funzionamento della rete WSN, non sono stati ancora risolti i problemi legati alla distanza massima tra i nodi (meno di 50 m) e alla durata della batteria (nell'ordine di due mesi). Si è sviluppata una nuova piattaforma hardware dei nodi allo scopo di migliorare il sistema. Sei dei nodi disponibili sono stati configurati come nodi dedicati all'acquisizione dati, mentre altri tre sono considerati come "ponti". Il compito principale dei nodi è il rilevamento delle vibrazioni (tramite un accelerometro biassiale) originate dalla frana attiva. Le vibrazioni vengono inviate al ponte di nodi, e questi trasferiscono i pacchetti di dati ad un computer portatile. Accelerometri posti nella zona attiva della frana campionano valori di accelerazione a 10 Hz. I ponti sono posti a una distanza media di 30 m, dando alla rete circa 90 m di estensione totale. Ogni ponte ha il compito di raccogliere i pacchetti provenienti dagli accelerometri associati e di inoltrare i pacchetti provenienti da ponti più periferici. Vicino alla stazione di base, e fuori della zona di frana attiva, si sono installati altri tre sensori per misurare la pressione atmosferica, umidità, temperatura e accelerazione. Quest'ultima ha l'obiettivo di fornire un riferimento esterno neutrale di accelerometri nelle zone attive. Il nuovo sistema è in fase di test e sarà pronto e installato in campo a fine 2010.

Conclusioni

Lo studio condotto ha dimostrato che tramite un'analisi multidisciplinare di dati telerilevati è stato possibile evidenziare le varie caratteristiche della frana in esame. In particolare si è fatto uso di vari *datasets laser-scanner* acquisiti in periodi diversi: si sono generati il DTM e la superficie di riferimento per ogni singola acquisizione, quindi si è calcolato il differenziale tra coppie di superfici, che ha messo in risalto le zone che si sono maggiormente mosse nell'intervallo di tempo considerato, evidenziando le zone di accumulo e di deplezione della frana. Si è tentato anche di identificare le zone a rischio smottamento, effettuando un'approfondita analisi dei DTM ed incrociando i dati iperspettrali con i dati *Lidar*. Si è dimostrato che l'analisi basata sulla PCA è una

metodologia interpretativa molto potente e utile nella stima delle caratteristiche superficiali di una frana, dato che permette una identificazione diretta del grado di rugosità del terreno. Molto promettente si è rivelato anche il sistema di reti a sensori *wireless* (WSN), dato che permette un monitoraggio delle dinamiche della frana veloce e poco costoso. L'approccio multidisciplinare condotto interpretando simultaneamente i risultati delle metodologie descritte si è dimostrato molto utile nello studio della frana proposta e pensiamo di approfondire ulteriormente la ricerca in tal senso in futuro.

Bibliografia

- Axelsson, P. (1999), "Processing of laser scanner data – algorithms and applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(1), pp. 138-147.
- Baltsavias E.P. (1999), "Airborne laser scanning: basic relations and formulas". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, pp. 199-214.
- Coren F., Visintini D., Prearo G., Sterzai P. (2005), "Integrating lidar intensity measures and hyperspectral data for extracting of cultural heritage". *Acts of Workshop Italy-Canada for 3D Digital Imaging and Modelling: applications of heritage, industry, medicine and land*.
- Corsini, A., Borgatti, L., Caputo, G., De Simone, N., Sartini, G. and Truffelli, G. (2006), "Investigation and monitoring in support of the structural mitigation of large slow moving landslides: an example from Ca' Lita (Northern Apennines, Reggio Emilia, Italy)". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, pp. 55–61, <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/55/2006/>
- Corsini, A., Borgatti, L., Coren, F., and Vellico, M. (2007), "Use of multitemporal airborne LiDAR surveys to analyse post-failure behaviour of earthslides". *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33(2), pp. 116–120.
- Cramer M., Haala N. (1999), "Direct exterior orientation of airborne sensors. An accuracy investigation of an integrated GPS/inertial system". *Proceedings of ISPRS Workshop Comm. III/1*, Portland, Maine, USA.
- Fell, R., Hungr, O., Leroueil, S., Riemer, W. (2000), "Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil. Keynote lecture-". *GeoEng2000*, 1, pp. 21-120
- Hyvärinen T., Okkonen J., Koskela M., Herrala E., Dall'Ava A. (2003), "AISA airborne hyperspectral sensors". *Proceedings of Airborne Remote Sensing for Geophysical and Environmental Applications*, Rome, 14-16th April 2003.
- Jolliffe I.T. (2002), *Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics*, 2nd ed., Springer, NY, XXIX, 487 p. 28 illus. ISBN 978-0-387-95442-4
- Manzi, V., Leuratti, E., Lucente, C. C., Medda, E., Guerra, M., Corsini, A. (2004), "Historical and recent hydrogeological instability in the Monte Modino area: Valoria, Tolara and Lezza Nuova landslide reactivations (Dolo – Dragone valleys, Modena Apennines, Italy)". *GeoActa*, 3, pp. 1–13.
- Sassa, S., Canuti, P. (2008), *Landslides - Disaster Risk Reduction*, First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides, Tokyo, Springer, 649 pp.
- Wehr, A. and Lohr, U. (1999), "Airborne laser scanning - an introduction and Overview". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), pp. 68-82.
- Werner-Allen, G., Marcillo, O., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J. (2006), "Deploying a wireless sensor network on an active volcano". *Sensor-Network Applications, IEEE*, March-April 2006, pp. 18-25.