METODOLOGIA IPERSPETTRALE E LASER SCANNING APPLICATI ALL'INDIVIDUAZIONE E AL MONITORAGGIO DI FUORIUSCITE NATURALI DI CO_2

Michela VELLICO (*), Luke BATESON (**), Stanley BEAUBIEN (***), Paolo STERZAI (*), Carla PIETRAPERTOSA (****), Jonathan PEARCE (**), Aldo ANNUNZIATELLIS (***), Giancarlo CIOTOLI (***), Stuart MARSH (**), Franco COREN (*)

(*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico (TS), Italy, tel: +39 040 21401, fax: +39 040 327307, e-mail: mvellico@ogs.trieste.it
(**) British Geological Survey, Kingsley Dunham Centre, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, UK, tel: +44 (0)115 936 3100, fax: +44 (0)115 936 3200, e-mail: lbateson@bgs.ac.uk
(***) Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Scienze della Terra, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Italy, tel: +39 06 49914918, fax: +39 06 49914919, e-mail: stanley.beaubien@uniroma1.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

Riassunto

Il progetto "*Testing remote sensing monitoring technologies for potential CO2 leaks*", ha avuto lo scopo di testare la risposta delle metodologie di telerilevamento all'individuazione e al monitoraggio di fuoriuscite naturali di CO_2 dal sottosuolo (*gas vents*) nella caldera di Latera (VT). Si è operato in maniera indiretta, ovvero ricercando la presenza di CO_2 mediante la valutazione dello stress subito dalla vegetazione. Si è effettuata una interpretazione congiunta di una serie di *datasets* telerilevati acquisiti in due diversi periodi dell'anno 2005 (maggio e ottobre): dati *Lidar*, iperspettrali, ortofoto e dati rilevati con un sensore termico. I risultati dimostrano che con tutte le metodologie impiegate è possibile individuare molto chiaramente delle anomalie riconducibili alla presenza di *gas vents* emettenti prevalentemente CO_2 sul territorio; tale risultato viene confermato in buona percentuale anche da analisi sperimentali condotte a terra nel 2006.

Abstract

The aim of the project "Testing remote sensing monitoring technologies for potential CO2 leaks" was to test the response of some remote sensing techniques to the detection and monitoring of natural CO_2 gas vents in the Latera caldera. An indirect method was used: stress related to CO_2 was searched on vegetation. A joint interpretation of remote sensing datasets acquired in different periods of 2005 year (May and October) was done: Lidar data, hyperspectral, orthophotos and thermal data. The results show that CO_2 gas vents can clearly be detected by all the tested methodologies: this is confirmed also by a sampling field campaign conducted in Latera in 2006.

Il progetto

Il progetto "*Testing remote sensing monitoring technologies for potential CO2 leaks*" è nato nell'ambito del network europeo d'eccellenza CO2 GeoNet ed ha promosso la collaborazione tra diversi enti europei, quali l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), l'Università di Roma La Sapienza (URS) ed il British Geological Survey (BGS). Lo scopo di tale progetto è stato testare la risposta fornita delle metodologie di telerilevamento all'individuazione e al monitoraggio di fuoriuscite naturali di anidride carbonica dal sottosuolo, chiamate più comunemente *gas vents*. Come sito di indagine si è scelta la caldera di Latera, situata in provincia di Viterbo, già studiata in passato in quanto sede di estesi fenomeni vulcanici e di un importante campo geotermico, che originano diversi *gas vents* lungo tutto il territorio, gli effetti dei quali si ripercuotono sulla vegetazione circostante.

Metodologia e strumentazione

Si è proceduto operando in maniera indiretta, ovvero ricercando la presenza di CO_2 mediante la valutazione dello stress subito dalla vegetazione a causa della fuoriuscita di questo gas; tale esigenza è legata alle caratteristiche della strumentazione utilizzata, che non rileva nel campo dell'infrarosso.

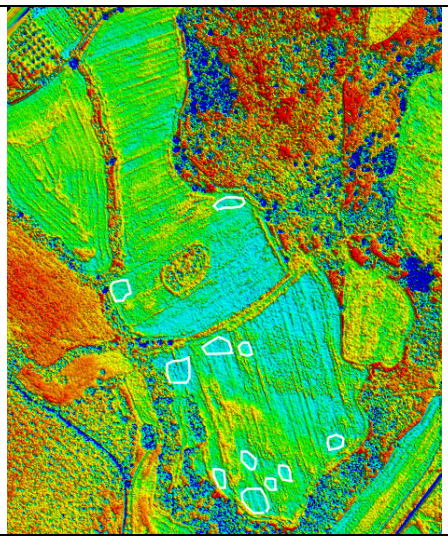
Il progetto ha previsto l'esecuzione di due voli sopra la caldera, effettuati in due periodi diversi dell'anno, allo scopo di acquisire *datasets* di dati telerilevati tra loro confrontabili; i voli sono stati eseguiti dal British Geological Survey (maggio 2005) e dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (ottobre 2005). Oltre a dati iperspettrali, si sono acquisiti anche dati *Lidar*, delle ortoimmagini e dati nel campo del termico. I due sensori iperspettrali utilizzati sono l'Aisa Eagle 1K, fabbricato dalla Specim, il cui spettro è compreso nel Visibile Vicino Infrarosso (dai 400 ai 970 nm), e il CASI2, fabbricato dalla Itres, avente un intervallo spettrale compreso tra i 405 e i 950 nm. Entrambi i *Lidar* sono di fabbricazione Optech (ALTM 3100 e ALTM 3033), mentre come sensore termico si è utilizzato l'ATM Daedalus. Per le ortofoto si è usata la fotocamera digitale Rollei 6008.

Interpretazione dei dati

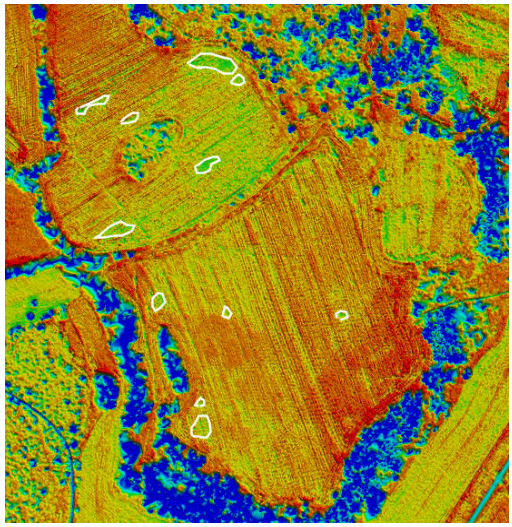
I diversi *datasets* sono stati interpretati inizialmente ad uno ad uno e relativamente ad un'area ristretta, posta in corrispondenza di un *gas vent* già noto, emettente prevalentemente CO_2; ciò per verificare quale sia la risposta fornita da ogni singola metodologia all'individuazione dello stress sulla vegetazione dovuto alla presenza di questo gas (Vellico, 2007). Tutte le diverse metodologie hanno evidenziato un'anomalia in corrispondenza di questo *gas vent*. Successivamente all'interno di ciascun *dataset*, ma in un'area più vasta, si sono ricercate per analogia altre anomalie legate alla presenza di vegetazione sofferente per la presenza di anidride carbonica, e quindi correlabili all'esistenza di un *gas vent*.

Un'informazione molto importante posseduta dai dati *Lidar* è l'intensità del segnale riflesso, contenuta in ciascuno degli echi registrati; essa caratterizza il bersaglio colpito al suolo. L'intensità dell'eco registrata dal sensore *Lidar* è influenzata prevalentemente da due fattori: la rugosità superficiale del terreno e la sua umidità. Più ondulata è la superficie, più il terreno riflette, quindi più elevata è l'intensità del segnale riflesso. Inoltre, maggiore è il contenuto d'acqua nel terreno, maggiore è l'assorbimento del segnale, quindi minore è l'intensità del segnale riflesso.

Dall'analisi dei *datasets Lidar,* il *gas vent* principale appare caratterizzato da un valore di intensità molto più basso rispetto al terreno circostante. Anche altre zone presentano un improvviso cambio del valore di intensità; queste zone sono state evidenziate con dei poligoni (vedi Figura 1).



BGS (NERC – ARSF) – LIDAR – INTENSITA'



OGS – LIDAR – INTENSITA'

Figura 1 – Datasets Lidar a confronto. Sono cerchiate le anomalie corrispondenti a vegetazione stressata per la probabile presenza di gas vents.

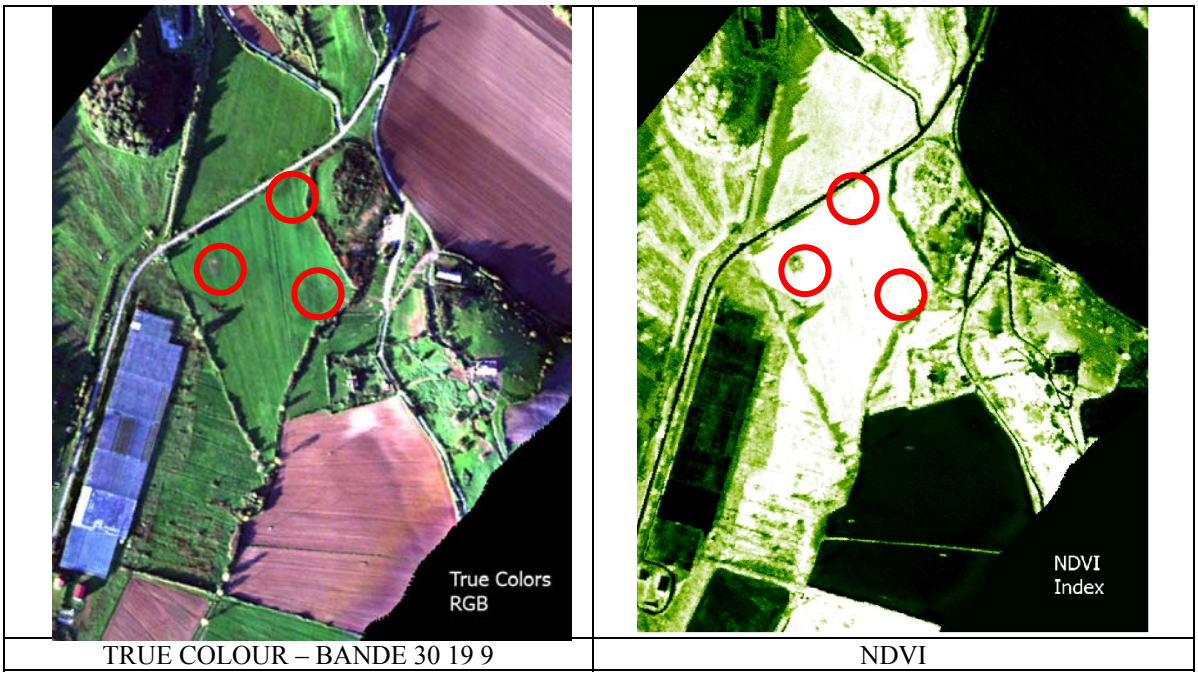
I dati iperspettrali sono stati analizzati accuratamente tramite un calcolo di diversi indici vegetazionali. L'indice che ha fornito maggiori informazioni è stato il Normalised Differential Vegetation Index (NDVI), che individua molto bene la biomassa verde fotosintetizzante; la vegetazione malata o senescente possiede un indice inferiore rispetto alla vegetazione sana, per cui questo indice si rivela di grande utilità nell'individuazione dello stress subito dalla vegetazione in presenza di CO_2 o in situazioni analoghe. L'NDVI viene calcolato dalla combinazione delle radianze (ρ) in un canale del rosso (RED) e nel vicino infrarosso (NIR), secondo la formula:

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$$

Questo indice assume valori compreso tra –1 e +1. Valori negativi indicano la presenza di acqua nel terreno; valori prossimi allo zero corrispondono a infrastrutture o edifici. Valori di poco superiori allo zero indicano suoli secchi, tra 0.4 e 0.7 rilevano la presenza di vegetazione; solo la vegetazione molto densa raggiunge valori di NDVI superiori a 0.7-0.8.

Quanto dedotto dall'analisi dell'NDVI coincide con l'analisi delle immagini iperspettrali in *true colors* RGB; le anomalie vengono riscontrate esattamente nelle stesse posizioni (vedi Figura 2). L'assenza di vegetazione all'interno delle aree evidenziate appare, infatti, alquanto inconsueta se confrontata con l'uniformità della copertura erbosa presente nel resto del campo; si può presupporre che essa sia strettamente legata ad una cospicua fuoriuscita di CO_2 dal terreno.

Conferma viene anche dall'analisi delle ortofoto. Le anomalie si manifestano sottoforma di variazione sostanziale nel colore dell'immagine; i *gas vents* appaiono di colore marrone anziché verde, come la copertura erbosa circostante, ad indicare la presenza di terreno nudo. Tale situazione è legata alla fuoriuscita di gas dal sottosuolo, presumibilmente CO_2, che, ad elevate concentrazioni, risulta avere un effetto tossico sulla vegetazione.



TRUE COLOUR – BANDE 30 19 9	NDVI

Figura 2 – Immagini true color RGB e NDVI a confronto. Sono cerchiate le anomalie corrispondenti a vegetazione stressata per la probabile presenza di gas vents.

Sui dati iperspettrali si è condotta, inoltre, una classificazione spettrale secondo la tecnica del SAM (*Spectral Angle Mapper*). Essa appartiene alla categoria delle classificazioni *supervised* e si basa sull'analisi della firma spettrale; ogni oggetto è caratterizzato da una firma spettrale, quindi oggetti presentanti simili comportamenti possono essere attribuiti ad una stessa classe. La firma spettrale è funzione delle proprietà elettromagnetiche del terreno e della sua rugosità; la sua analisi è, quindi, di notevole aiuto nello studio dello stress subito dalla vegetazione in presenza di CO_2 (Brunn et al., 2003).
Le firme spettrali di due classi significative sono state poi messe a confronto: la prima ricavata dall'analisi di un pixel all'interno del *gas vent* noto, corrispondente a vegetazione fortemente stressata per la presenza di anidride carbonica, la seconda relativa ad un pixel posto all'esterno di esso e quindi corrispondente a vegetazione sana (vedi Figura. 3). Si nota che la firma spettrale della vegetazione stressata è caratterizzata da valori di riflettanza notevolmente più bassi, indice della sofferenza che affligge la vegetazione.

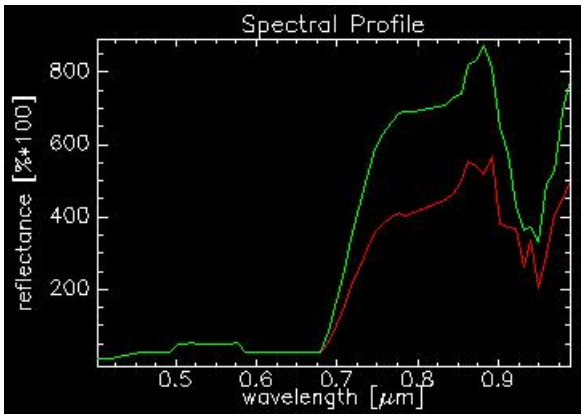


Figura 3 - Firme spettrali a confronto: in verde quella relativa alla vegetazione sana, in rosso quella corrispondente alla vegetazione stressata dalla presenza di CO_2.

Si sottolinea che questa analisi si è resa possibile solo grazie all'elevata precisione geografica dei dati iperspettrali, che sono stati georiferiti utilizzando il *DEM* ottenuto dai dati *Lidar*, e quindi possiedono una risoluzione di geocodifica a terra di 2 m (Schläpfer et al., 1999).

Interpretazione congiunta dei dati

Per rafforzare l'interpretazione derivante dall'analisi dei singoli *datasets*, si è proceduto ad una comparazione incrociata degli stessi (Bateson et al., 2006). Le anomalie riscontrate sono state evidenziate mediante poligoni, che sono stai poi tra loro sovrapposti. Molti poligoni si intersecano tra loro e sono stati quindi raggruppati secondo aree di interesse; a ciascuna area è stato assegnato un valore pari al numero di poligoni, corrispondenti ciascuno ad un diverso *dataset*, contenuti al suo interno. I valori rilevati vanno da un minimo di 1 ad un massimo di 6; questo numero può essere considerato una sorta di "peso", ovvero, un valore elevato indica che la probabilità di individuare una fuoriuscita di CO_2 è elevata, un valore pari ad 1 indica che la probabilità che l'anomalia riscontrata corrisponda ad un *gas vent* è bassa (vedi Figura 4).

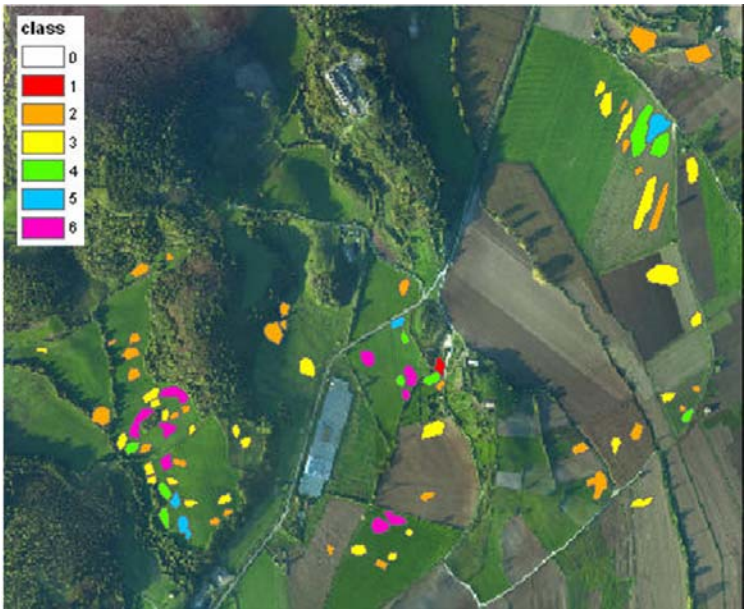


Figura 4 – Analisi estesa. Numero di datasets e differenti tecniche di telerilevamento che rilevano un'anomalia all'interno delle aree evidenziate.

Il pregio di questa metodica consiste nel poter disporre di un gran quantitativo di dati, tra loro compatibili e complementari; l'analisi dei dati è rapida, specialmente se confrontata con la tempistica richiesta da un prelievo sul campo, per cui può essere utilizzata agevolmente per decretare le aree di maggior interesse per l'utente.

Validazione sperimentale dei dati

Le interpretazioni fornite dalle tecniche di *remote sensing* sono state verificate mediante una prospezione dei gas del suolo condotta dall'Università La Sapienza di Roma (URS) nel mese di luglio 2006. Durante la prospezione sono stati analizzati in situ campioni di gas del suolo prelevati ad una profondità di circa 80cm, e sono state effettuate misure del flusso di anidride carbonica mediante la tecnica della camera di accumulo. L'analisi statistica dei dati ha permesso di individuare: una popolazione di valori anomali di concentrazione di anidride carbonica (ascrivibili ad un'origine endogena) superiori a 16%, v/v , una popolazione intermedia compresa tra 4%-16% e una popolazione di background per concentrazioni inferiori al 4% (Annunziatellis et al., 2007). Allo stesso modo sono stati considerati come anomali i valori di flusso di CO_2 superiori a 60 g/m2/day.

In generale, è stata riscontrata una buona corrispondenza tra le zone di anomalia messe in evidenza dalla prospezione del gas ed i dati telerilevati, pari al 39% (vedi Figura 5); il risultato può ritenersi soddisfacente, tuttavia la percentuale sale se si distinguono i risultati per singola metodologia: iperspettrale e ortofoto sfiorano, infatti, il 47%.

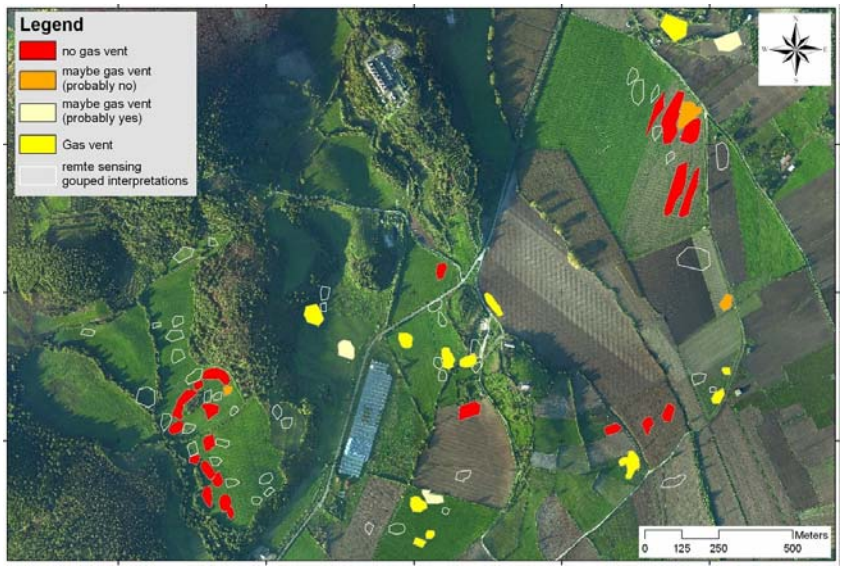


Figura 5 – Corrispondenza tra dati telerilevati e sperimentali.

Conclusioni

Emerge dall'interpretazione dei dati telerilevati acquisiti a Latera che con tutte le metodologie impiegate è possibile individuare molto chiaramente delle anomalie riconducibili alla presenza di *gas vents* emettenti prevalentemente CO_2 sul territorio; tale risultato viene confermato in buona percentuale anche dalle analisi sperimentali condotte a terra.
La procedura di analisi incrociata è innovativa ed apre la strada ad un successivo estensivo impiego di metodologie integrate di telerilevamento per analisi di tipo ambientale, atte a rilevare la sofferenza della vegetazione causata dalla presenza di anidride carbonica.
Gli sviluppi futuri di un tale studio si dirigono inoltre verso il potenziamento della strumentazione da utilizzarsi; l'impiego di un sensore iperspettrale in grado di lavorare nello spettro dell'infrarosso consentirebbe di rilevare in modalità diretta la presenza non solo di anidride carbonica, ma anche di altri gas, cosa molto utile in applicazioni ambientali di questo genere.

Bibliografia

Vellico M., (2007), *Metodologia iperspettrale e laser-scanning per l'individuazione di fuoriuscite naturali di CO_2: la caldera di Latera.,* tesi di Dottorato in Geofisica Applicata e Idraulica, XIX ciclo, Trieste.
Annunziatellis A., Bateson L.,Vellico M., Beaubien S., Ciotoli G., Coren F., Lombardi S., Marsh S., Pearce J.M., (2007), "Testing and verification of remote sensing techniques on a naturally-leaking CO_2 reservoir (Latera, Italy); implications for monitoring of CO_2 geological storage sites", *EGU,* Vienna.
Bateson L., Vellico M., Beaubien S., Annunziatellis A., Ciotoli G., (2006), *Testing remote sensing monitoring technologies for potential CO_2 leaks*, editor J.M. Pearce, British Geological Survey Rep.
Brunn A., Busch W., Dittmann C., Fischer C., Vosen P., (2003), "Monitoring Mining Induced Plant Alteration and Change Detection in a German Coal Mining Area using Airborne Hyperspectral Imagery", *Proceedings of Spectral Remote Sensing of Vegetation*.
Schläpfer D., Schaepman M.E., Itten K.I., (1998), "GCP-Calibrated Auxiliary Data", *Imaging Spectrometry IV*, San Diego, SPIE 3438: 334-344.