

Stima dell'umidità del suolo da dati EO a supporto del monitoraggio del rischio da frana

G. Calamita⁵, R. Carlà², A. Iodice⁴, V. Lapenna⁵, A. Natale⁴, A. Mondini³, A. Perrone⁵, D. Riccio⁴,
L. Santurri², L. Candela¹, G. Ober⁶, F. Guzzetti³

1 Agenzia Spaziale Italiana, Centro di Geodesia Spaziale, Località Terlecchia, 75100 Matera (MT), Italy

2 CNR IFAC Via Madonna del Piano, 10 50019 Sesto Fiorentino (FI) Italy

3 CNR IRPI Via Madonna Alta 126 06128 Perugia (Italy)

4 Dipartimento di Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni Via Claudio, 21 80125 Napoli Italy

5 CNR IMAA C.da S. Loja , 85050 Tito Scalco (PZ) Italy

6 Carlo Gavazzi Space SpA, Via Gallarate, 150 20151 Milano, Italy tel. +39 02 380481, E-mail gober@cgspace.it

Riassunto

Le frane possono essere indotte da diversi eventi meteorologici e geofisici. Fra i primi vi sono le piogge intense o prolungate e il rapido scioglimento della neve. Fra i secondi vi sono i terremoti e le eruzioni vulcaniche. In ogni caso, le condizioni idrauliche dei versanti e il grado di saturazione del terreno sono importanti fattori per l'insorgere delle frane, e in particolare per quelle più superficiali. Benché non esista una relazione semplice (diretta) fra il contenuto d'acqua nello strato più superficiale del suolo e la condizione idraulica del pendio alle profondità alle quali si sviluppano le frane, anche superficiali – da alcune decine di centimetri a diverse decine di metri – la conoscenza delle condizioni d'umidità superficiale del terreno è di interesse per lo studio dei fenomeni franosi, e in particolare per la definizione della loro pericolosità. Nel contesto del progetto MORFEO, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), è in corso una sperimentazione e valutazione di tecniche innovative di stima dell'umidità del suolo basate sull'utilizzo di dati EO di diversa tipologia, in previsione del loro utilizzo a supporto del monitoraggio della pericolosità e del rischio da frana.

Abstract

Landslides can be triggered by different meteorological and geophysical events. Among meteorological events, there are strong rain precipitations and fast snow melting. As far as geophysical events are concerned, there are earthquakes and volcanic eruptions. In all cases, slope hydraulic conditions and level saturation are important elements in the landslides triggering, in particular for superficial landslides. Though an easy relationship between water content in the most superficial layer of the soil and the hydraulic condition of the slope doesn't exist, knowledge of the humidity conditions of the land surface are important in the landslide phenomena studies and in particular to their hazard. In the framework of MORFEO project, financed by the Italian Space Agency (ASI), it is underway an experimentation and an evaluation of new techniques of soil moisture retrieval based on EO data.

Introduzione

In Italia, le frane sono fenomeni comuni e diffusi. Un'indagine recente condotta dal Servizio Geologico Nazionale (Progetto IFFI) ha identificato e cartografato circa 5×10^5 frane. Indagini a carattere locale indicano come questa sia una sottostima del numero reale. Ogni anno i fenomeni di dissesto provocano danni diretti alla popolazione e danni economici e ambientali, anche molto gravi. E' quindi facile capire perché la determinazione e la mitigazione del rischio da frana rappresentino un obiettivo tecnico-scientifico di rilevanza sociale, in particolare per la difesa civile dalle frane, e per una corretta gestione e pianificazione ambientale e urbanistica del territorio.

Nel caso dello studio delle condizioni di stabilità di numerosi versanti, in aree vaste (da diverse decine ad alcune migliaia di chilometri quadrati) e per le quali non è praticabile applicare modelli (deterministici, fisicamente o pseudo-fisicamente basati) per il calcolo delle condizioni di stabilità (o instabilità) locali, la soluzione più comunemente adottata consiste nella valutazione delle condizioni di suscettibilità o di pericolosità attraverso l'applicazione di modelli statistici. Più in particolare, la valutazione delle condizioni di suscettibilità da frana, intesa come probabilità areale che un territorio possa dare origine a frane sulle basi delle caratteristiche fisiografiche (morfologiche, geologiche, di uso e copertura del suolo, meteorologiche, climatiche, ecc.), avviene utilizzando metodi di classificazione multi-variata che stabiliscono correlazioni statistiche tra un set di parametri tematici geo-ambientali e la presenza (o assenza) (Guzzetti et al., 1999, 2005a, 2006). La previsione delle condizioni di pericolosità da frana richiede anche informazioni sulla frequenza temporale e sulla distruttività degli eventi di frana attesi (Guzzetti et al., 2005a, 2006). Per la stima del rischio da frana sono infine necessarie informazioni sulla vulnerabilità degli elementi a rischio, inclusa la popolazione (Guzzetti et al., 2005b; Galli e Guzzetti, 2007).

Il primo anello di una catena modellistica che porta alla definizione del rischio da frana è rappresentato dalla valutazione della suscettibilità da frana, ossia della propensione del territorio a franare. I fattori naturali e antropici che controllano la propensione di un territorio a franare sono molteplici, e le loro interazioni sono complesse. In genere, per il calcolo della suscettibilità, sono valutate le correlazioni (o la mancanza di correlazioni) fra alcune variabili territoriali selezionate a priori, e la presenza (o assenza) di frane note. Le variabili territoriali sono scelte sulla base di conoscenze pregresse (geologiche, geomorfologiche, geotecniche, idrologiche, pedologiche, ecc.) sui fattori e le condizioni che controllano o condizionano i fenomeni di instabilità, e delle informazioni tematiche e ambientali realmente disponibili, a scale e con livelli di accuratezza adeguati per l'area oggetto di studio.

Fra le variabili tematiche, quelle che descrivono le condizioni geo-idrologiche locali, e le loro variazioni spaziali e nel tempo, sono particolarmente importanti, anche se spesso poco utilizzate nella modellistica statistica della suscettibilità da frana (Carrara et al., 1999). Benché non esista una relazione semplice fra il contenuto d'acqua nello strato più superficiale del suolo (da 1 a 20 cm) e le condizioni idrauliche dei pendii alle profondità alle quali si sviluppano le frane (da diverse decine di centimetri ad alcune decine di metri), la conoscenza delle condizioni di umidità superficiale del terreno è di notevole interesse per lo studio dei fenomeni franosi (Iverson, 2000; Crosta e Frattini, 2003). Attualmente, le cartografie dell'umidità del suolo, a scale e con risoluzioni spaziali e tematiche adeguate alla valutazione della suscettibilità da frana, sono prodotte solo per aree di estensione limitata e utilizzano metodi e strumenti per la spazializzazione dei risultati di costose campagne di misura al suolo. Le campagne di misura sono effettuate prevalentemente con sistemi TDR portatili, in aree vaste da alcune decine a diverse migliaia di metri quadrati, ripetute nel tempo. Le sonde TDR sono in grado di eseguire misure accurate e a profondità variabili. Le misure sono tuttavia puntuali (riferite ad un volume di suolo di alcune decine di centimetri cubi), e raramente sono ripetute con la frequenza temporale necessaria ad una adeguata caratterizzazione delle variazioni delle condizioni di umidità del suolo. Per la produzione di mappe dell'umidità superficiale del suolo fino a circa 5 cm, una alternativa è rappresentata dall'elaborazione di immagini remote, ottiche o SAR riprese da aereo o da satellite. Per quanto riguarda i dati ottici, l'attività consiste nella calibrazione di modelli di inversione che utilizzano l'informazione elettromagnetica raccolta nelle bande termiche e di riflettanza. I limiti delle due metodologie sono noti ed essenzialmente tecnologici. Nel caso delle misure al suolo, le tecniche di spazializzazione non sono sempre in grado di rappresentare in modo corretto o adeguato l'andamento (spaziale e temporale) dell'umidità superficiale. Dal canto loro, le misure telerilevate soffrono di mancanza di accuratezza e della necessaria risoluzione spaziale e temporale.

I prodotti relativi all'umidità del suolo così ottenuti sono largamente sperimentali e necessitano di una validazione scientifica e di una valutazione operativa. A tale scopo, i prodotti EO ottenuti sono confrontati con dati di umidità del suolo ottenuti attraverso campagne di rilevamento al suolo. Le

campagne di misura sono effettuate con classici TDR portatili, in aree da alcune a diverse centinaia di metri quadrati e ripetute nel tempo. Tra le stime areali fornite dai sensori satellitari e le misure puntuali ottenute dai sistemi TDR si collocano le informazioni ottenute dall'applicazione dei metodi geofisici attivi in situ (metodo della resistività elettrica, GPR), che operano su di un volume di suolo maggiore rispetto a quello investigato dalle sonde TDR.

Uno degli obiettivi del Progetto MORFEO – MONitoraggio del Rischio da Frana con tecnologie EO, dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), è quello di sperimentare l'utilizzo dei sensori satellitari ottici (nel medio e nel lontano infrarosso) e alle microonde di ultima generazione (COSMO-Sky-Med), per l'implementazione di algoritmi robusti in grado di produrre mappe di umidità del suolo sufficientemente accurate perché possano essere inserite nella modellistica della suscettibilità da frana. I risultati ottenuti dall'elaborazione di immagini satellitari sono confrontati con specifiche campagne di misura a terra dell'umidità del suolo, effettuate con sonde TDR e con nuove metodologie geoelettriche (Sharma, 1997).

Stima dello stato di umidità superficiale mediante dati EO ottico ed infrarosso termico

Le tecniche di stima dell'umidità superficiale con dati acquisiti nella banda del visibile e nelle bande NIR, SWIR e TIR sono basate su misure di riflettanza e emittanza (Sadeghi et al., 1984), e si sono rivelate parzialmente efficaci (Sommer et al., 1998; Leone and Sommer, 2000). Molti approcci empirici sia lineari che non-lineari sono stati proposti per descrivere la relazione tra radianza superficiale del suolo e contenuto di umidità.

I metodi per la stima dello stato di umidità o contenuto di acqua del suolo basati su dati EO nelle bande VIS, VNIR, SWIR e termico (TIR) possono essere distinti in più classi: indici multispettrali di umidità/siccità basati sulle bande di riflettanza, Bilancio Energetico Superficiale, Inerzia Termica e Inerzia Termica Apparente, e Modello comportamento radiativo suolo-vegetazione (metodo del triangolo Ts/Fr). I metodi elencati, eccetto l'ultimo, richiedono una calibrazione precisa della temperatura superficiale Ts ed una inizializzazione o taratura del modello della superficie con misure atmosferiche e/o al suolo, in quanto piccoli errori nella temperatura misurata possono generare errori consistenti nella stima dei flussi energetici; al contrario, il "Metodo del Triangolo" consente di mappare sia lo stato di umidità superficiale che i flussi energetici, senza la necessità di dati ancillari atmosferici e di superficie, ed è quindi autoconsistente; pertanto al momento è in fase di studio una sua possibile applicazione nel contesto del progetto MORFEO.

I valori di T ed NDVI vengono poi opportunamente scalati, in modo che il valore delle variabili scalate T^* e $NDVI^*$ vari nell'intervallo 0,1. E' stato dimostrato che esiste una relazione fra umidità del suolo W_s , il valore di NDVI normalizzato ($NDVI^*$) ed il valore normalizzato della temperatura della superficie terrestre Ts, che può essere espressa tramite una formula di regressione. E' quindi possibile ricavare una stima del valore dell'umidità di un punto quando si conosce la sua temperatura e il valore dell'NDVI nel punto medesimo; anche in mancanza di una precisa calibrazione che permetta di ricavare il valore assoluto è possibile avere una valutazione delle differenze di umidità fra pixel diversi, e studiando il movimento del punto relativo ad un pixel al variare del tempo, è possibile avere una valutazione delle variazioni temporali di umidità in un punto. Nel contesto del progetto MORFEO, viene studiata una possibile implementazione del metodo del triangolo per realizzare una procedura operativa in grado di fornire valutazioni sullo stato di umidità superficiale con risoluzione spaziale dell'ordine di 100 m e periodicità dell'ordine di 3 giorni.

Vista la bassa risoluzione che caratterizza in genere la banda TIR, e la contestuale necessità di stime dell'umidità superficiale con risoluzioni maggiori, è necessario integrare ed assimilare immagini EO multi-sensore e multi-satellite HR e MR nelle bande di temperatura e di riflettanza. E' in fase di valutazione una tecnica di fusione dati che permetta di aumentare la risoluzione della banda TIR sfruttando l'informazione presente nelle altre bande. In particolare, lo studio è volto ad ottenere per MODIS un dato TIR a 250m giornaliero attraverso la fusione della banda TIR a 1000m giornaliera

con la banda SWIR a 250 giornaliera. Per la validazione di questa procedura di fusione si ricorre al confronto con il dato ASTER quindicinale a 90 m, opportunamente degradato a 250m.

Stima dell'umidità del suolo da dati SAR

Il coefficiente di retrodiffusione di un terreno scarsamente vegetato è legato alla frequenza, all'angolo di incidenza, alla polarizzazione dell'onda incidente, alla rugosità del suolo ed alla sua costante dielettrica complessa. Quest'ultima dipende dalla composizione e dalla densità del suolo e, soprattutto, dal suo contenuto d'acqua. Pertanto è in teoria possibile stimare l'umidità del suolo utilizzando dati SAR. A questo scopo sono necessari modelli di diffusione elettromagnetica accurati, ma non molto complicati, in modo da consentire la loro inversione. Nell'ambito del progetto MORFEO, sono stati implementati, e saranno verificati per confronto con dati misurati in situ, i modelli empirici di Oh et al., 1992) e di Shi (Shi et al., 1997) ed è stato sviluppato un nuovo modello teorico, qui di seguito brevemente descritto.

Un punto di partenza per lo sviluppo di un nuovo modello teorico è il metodo delle piccole perturbazioni (SPM), che è semplice da invertire. Secondo tale modello, la dipendenza del segnale ricevuto dalla rugosità superficiale è cancellata nel cosiddetto "rapporto co-polarizzato" (ossia il rapporto tra le sezioni radar normalizzate in polarizzazione VV e HH), che quindi dipende solo dalla costante dielettrica (Franceschetti et al., 2000). Tuttavia, l'ambito di validità dell'SPM è limitato a superfici la cui rugosità è piccola rispetto alla lunghezza d'onda elettromagnetica. Inoltre, l'SPM non è in grado di modellare i fenomeni di cross-polarizzazione e de-polarizzazione solitamente osservati nei dati SAR reali. Per superare queste limitazioni, è stato recentemente introdotto il metodo "extended Bragg" o "X-Bragg" (Hajnsek et al., 2003). Questo metodo si basa su un modello a due scale: la superficie diffondente è modellata con faccette piane leggermente rugose, inclinate in maniera aleatoria. L'inclinazione aleatoria delle faccette provoca una variazione aleatoria dell'angolo di incidenza locale e una rotazione aleatoria del piano di incidenza locale intorno alla direzione di vista, che si traduce in una rotazione aleatoria della matrice di scattering della faccetta. In [4], la variazione aleatoria $\Delta\theta$ dell'angolo di incidenza viene ignorata e l'angolo di rotazione β del piano di incidenza è modellato euristicamente con una variabile aleatoria uniforme in un intervallo $(-\beta_1, \beta_1)$, dove β_1 è usato per caratterizzare la rugosità superficiale di grande scala. Nel nuovo modello da noi sviluppato, entrambe queste ipotesi semplificative vengono rimosse, e vengono ottenute distribuzioni di probabilità più realistiche per β e $\Delta\theta$ assumendo che la pendenza delle faccette (ossia la pendenza della rugosità di grande scala) sia una variabile aleatoria Gaussiana, in accordo con i modelli di rugosità superficiale sia classici che frattali (Franceschetti et al., 2000, Franceschetti et al., 1999). Infine, nello sviluppare il nuovo modello si dimostra che, usando l'X-Bragg e ipotizzando che il suolo sia scarsamente vegetato, la stessa informazione sulla superficie che può essere ottenuta utilizzando, l'entropia H e l'angolo di scattering α della matrice di coerenza polarimetrica, può essere ottenuta anche utilizzando semplicemente i rapporti co-polarizzato (HH/VV) e cross-polarizzato (HV/VV). In questo modo, si evita la necessità di effettuare una delicata calibrazione di fase tra i canali polarimetrici ed è possibile utilizzare anche dati di sensori SAR non completamente polarimetrici, come quelli della costellazione COSMO/SkyMed. Sono attualmente in corso campagne di misura e acquisizioni di dati COSMO/SkyMed e ALOS/PALSAR per la verifica del nuovo metodo sviluppato per confronto tra stime da dati SAR e misure in situ.

Il ruolo dei metodi della resistività elettrica nello studio dell'umidità del suolo

Le tecniche di prospezione geofisica vengono affiancate alle tradizionali tecniche utilizzate per lo studio delle proprietà fisiche del suolo. Il principio base dell'approccio geofisico è quello di acquisire i parametri di interesse in modo non distruttivo sul mezzo oggetto di studio (Samouëlian et al. 2005). Infatti, tra i vantaggi che contribuiscono alla crescente applicazione di queste tecniche come strumento diagnostico nello studio dei problemi ambientali, i più citati sono la non invasività,

la rapida acquisizione dei dati in campo e i costi relativamente contenuti (Bavusi et al. 2006, Perrone et al. 2004).

Tra i metodi geofisici, quelli geoelettrici sembrano essere tra i più promettenti nelle applicazioni riguardanti lo studio delle caratteristiche dei suoli, grazie alla forte correlazione esistente tra i materiali presenti in natura e le loro proprietà elettriche (Samouëlian et al. 2005). Un ruolo importante è ricoperto dal metodo della resistività elettrica, classificato come metodo geoelettrico attivo, basato sulla misura della resistività elettrica mediante l'introduzione nel terreno di una corrente elettrica generata artificialmente (Sharma, 1997). Le misure di resistività sono effettuate sulla superficie del terreno attraverso un generatore di corrente, un multimetro, dei cavi elettrici e quattro elettrodi: due "elettrodi di corrente" sono utilizzati per iniettare la corrente nel suolo, mentre altri due "elettrodi di potenziale" sono utilizzati per la misurazione della differenza di potenziale (d.d.p.) generata. I valori di resistività misurati sono determinati attraverso il rapporto tra la d.d.p. registrata e l'intensità di corrente immessa nel terreno, corretti attraverso un appropriato coefficiente geometrico funzione della disposizione relativa degli elettrodi. La resistività elettrica di un terreno può essere influenzata da diversi fattori tra cui i principali sono la porosità, il contenuto di acqua e la sua salinità, la temperatura, e la presenza di minerali argillosi.

Il modo in cui le particelle solide sono organizzate nello spazio determina la porosità di un suolo; se i pori contengano in diversa misura (grado di saturazione) aria o soluzioni acquose a diversa salinità, questo contribuisce a far variare i valori di resistività misurati. Infatti, considerato che la conduzione di corrente nel suolo e nelle rocce è prevalentemente di natura elettrolitica, maggiore è la porosità di una roccia e il contenuto di soluzione elettrolitica in essa presente, minore saranno i valori di resistività misurati. Lo stesso dicasi per la presenza di minerali argillosi che facilitano lo scambio ionico e di valori di temperatura elevati che esercitando una riconosciuta influenza sulla mobilità degli elettroliti in soluzione, provocano una variazione nei valori di resistività (o conducibilità) elettrica. Se ne conclude che la resistività elettrica può essere considerato come un indice proxy per lo studio della variabilità spaziale e temporale di differenti proprietà fisiche del suolo (porosità, salinità, ecc.) ed in particolare del contenuto di acqua (Samouëlian et al., 2005).

Le difficoltà nell'ottenere in situ stime accurate del contenuto di acqua di un suolo è una questione annosa in idrologia. Le criticità non sono solo collegate alla sua determinazione alle diverse profondità lungo un dato profilo, ma riguardano anche le dinamiche temporali di questa grandezza che rendono difficile il raggiungimento di stime affidabili delle sue variazioni spaziali e temporali da pochi punti di misura. Conseguentemente, data la grande variabilità spaziale sia verticale che orizzontale esibita, l'utilizzo di sensori puntuali, oltre che alterare la naturale struttura del suolo, fornisce solo informazioni ristrette e spesso non rappresentative della reale distribuzione spaziale del contenuto di acqua in un suolo (Michot et al. 2003, Grayson and Western, 1998). Viceversa, le misure ottenute mediante l'applicazione di metodi geofisici di superficie permettono di ricavare informazioni indirette sul contenuto di acqua integrate su volumi di suolo relativamente più grandi rispetto alle sonde puntuali.

La realizzazione di mappe di resistività elettrica, mediante l'esecuzione di sondaggi elettrici verticali distribuiti su schemi di campionamento a griglia regolare e/o irregolare, funzione dei vincoli morfologici posti dalle diverse aree oggetto di studio, consente di definire una prima distinzione tra aree a maggior contenuto di acqua ed aree a minor contenuto. Inoltre, la possibilità di lavorare a diverse profondità di investigazione e di integrare la misura su un volume più grande, permette di estendere l'informazione ottenuta.

Riferimenti bibliografici

- Bavusi, M., Rizzo E., Lapenna V, 2006. "Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump", *Environmental Geology*, No 51, pp. 301-308.
- Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P. (1999) Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*, Vol. 20: 2-3, 117-135.

- Crosta G.B., Frattini P. (2003) Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3:1-2 81-93.
- Franceschetti, G., A.Iodice, M.Migliaccio, D.Riccio, (1999) Scattering from natural rough surfaces modelled by fractional Brownian motion two-dimensional processes. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.47, 1405-1415.
- Franceschetti, G., A.Iodice, S.Maddaluno, D.Riccio, (2000) A Fractal Based Theoretical Framework for the Retrieval of Surface Parameters from Electromagnetic Backscattering Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.38, 641-650.
- Galli M., Guzzetti F. (2007) Vulnerability to landslides in Umbria, central Italy. *Environmental Management*, Vol. 40, 649–664, doi: 10.1007/s00267-006-0325-4.
- Grayson, R.B., Western, A.W. (1998) Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. *Journal of Hydrology*, 207, 68-82.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, Vol. 31, 181-216.
- Guzzetti F., Galli M., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M. (2006) Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 6, 115-131.
- Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. (2005a) Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, Vol. 72: 272-299.
- Guzzetti F., Stark C.P., Salvati P. (2005b) Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environmental Management*, Vol. 36: 1, 15-36.
- Iverson R.M. (2000) Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36: 1897-1910.
- Leone A P, Sommer S (2000). Multivariate analysis of laboratory spectra for the assessment of soil development and soil degradation in the southern apennines. *Remote Sensing of Environment*, 72: 346–359.
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicollaud, B., King., D., Tabbagh, A. (2003) Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resource Research*, 39(5), 1138 .
- Oh, Y., K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, (1992) An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, 370–381.
- Perrone, A., Iannuzzi A., Lapenna V., Lorenzo P., Piscitelli S., Rizzo E., Sdao F., 2004. “High resolution electrical imaging of the Varco d’Izzo earthflow (southern Italy)”, *Journal of Applied Geophysics*, No 56, pp. 17-29.
- Sadeghi A M, Hancock G D, Waite W P, Scott H D, Rand J A (1984). Microwave measurements of moisture distributions in the upper soil profile. *Water Resour Res*, 20(7): 927–934.
- Samouëlian, A., Cousin I., Tabbagh A., Bruano A., Richard G., 2005. “Electrical resistivity survey in soil science: a review”, *Soil & Tillage Research*, No 83, pp. 173-193.
- Sharma, P. V., 1997. “Environmental and engineering geophysics”. Cambridge University Press.
- Shi, J., J.Wang, A. Y. Hsu, P. E. O’Neill, and E. Engman, (1997) Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 35, 1254–1266.
- Sommer S, Hill J, Me’gier J (1998). The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 67: 197–209