

Interpretazione geologica e geotecnica dei risultati del monitoraggio SAR (tecnica PS) in Oltrepo Pavese

Claudia Meisina¹, Francesco Zucca¹, Filippo Conconi¹, Federico Verri¹, Dario Fossati², Massimo Ceriani³, Jacopo Allievi⁴

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia, Via Ferrata n°1, 27100 Pavia, Tel 0382985831, Fax 0382/985890; e-mail: cmeisina@manhattan.unipv.it.

² Regione Lombardia, Struttura rischi idrogeologici, dario_fossati@regione.lombardia.it

³ Regione Lombardia, D.G. Polizia Locale, Prevenzione e Protezione Civile, massimo_ceriani@regione.lombardia.it

⁴ Tele-Rilevamento Europa, T.R.E. S.r.l., jacopo.allievi@treuropa.com

Geological and geotechnical interpretation of SAR monitoring (PS Technique) in Oltrepo Pavese

ABSTRACT: The aim of the study is to test the Permanent Scatterers Technique for detecting and monitoring ground displacement in the Oltrepo Pavese territory (Northern Italy, southern Lombardia). This area is of particular interest because the large number of geo-hazards and could be considered representative of the Italian Apennines. Landslides are the most serious geological hazard; clayey soils exhibiting volume changes, shrinkage on drying and swelling on wetting, result in severe damage to overlying structures, particularly to low-rise buildings, roads and buried lifelines; subsidence in the plain is associated to water pumping. Due to these hazards a large number of residential buildings (more than 1,200) have experienced damages. The PS technique, developed by Politecnico of Milano, allows to identify individual radar benchmarks (Permanent Scatterers) where very precise displacement measurements can be carried out. More than 95,000 PS have been identified in the Oltrepo pavese by processing SAR images acquired on both descending and ascending orbits by the ESA-ERS satellites from 1992 to 2001. The information coming from the interferometric analysis has been integrated within the landslide inventory map and the damaged building inventory map. Some test sites were selected. The PS analysis at a large scale (SPSA) detected ground deformations ranging from +5 to -16 mm/yr and allows to verify the existence of already-known unstable areas (buildings, landslides and shrinkage phenomena) and to identify unknown unstable area. The analysis is useful in the identification of priority areas, where local authorities may concentrate future detailed geological studies and risk mitigation actions. The PS analysis at detailed scale (APSA) allows to study the temporal evolution of phenomena also of non-linear type (e.g. swelling/shrinkage, water pumping). The advantages and constraints of the applicability of the PS technique in the Oltrepo Pavese are discussed in relation with the geological, geomorphological e geotechnical features of the area.

Key terms: Permanent Scatterers Technique, landslides, monitoring, Oltrepo Pavese

Termini chiave: tecnica dei diffusori permanenti, frane, monitoraggio, Oltrepo Pavese

Riassunto

Il lavoro presenta un'applicazione della Tecnica dei Permanent Scatterers nel territorio dell'Oltrepo Pavese situato nella Lombardia meridionale e rappresentativo dell'ambiente appenninico. L'obiettivo della ricerca è stato la verifica dell'applicazione della tecnica in questione nell'identificazione, comprensione e monitoraggio di diverse forme di dissesto (frane, ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi, subsidenza). I risultati dell'analisi PS sono stati confrontati, in ambiente GIS, con l'inventario dei fenomeni franosi e degli edifici lesionati.

L'analisi dei Permanent Scatterers sull'intera area ha permesso di verificare l'esistenza di aree instabili (edifici, frane, fenomeni di ritiro) e di identificare fenomeni di dissesto non ancora noti. In alcune aree campioni è stata

applicata un'analisi più dettagliata che ha permesso di studiare l'evoluzione temporale dei fenomeni anche di tipo non lineare (e.g. ritiro, estrazione di acqua dal sottosuolo).

Introduzione

La Tecnica PS, brevettata dal Politecnico di Milano e perfezionata da Telerilevamento Europa (T.R.E.), è uno strumento per l'elaborazione dei dati acquisiti da sensori radar di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) montati a bordo di satelliti (Ferretti et al. 2001). I Permanent Scatterers (PS) costituiscono una sorta di rete geodetica naturale, consentono misure accurate di deformazioni superficiali e di conseguenza sono un valido strumento per l'identificazione ed il monitoraggio dei rischi geologici (Ferretti et al., 2000; Colesanti et al., 2003a, b; Canuti et al.,

2004; Ferretti et al., 2005). Il lavoro presenta un'applicazione di tale tecnica nel territorio dell'Oltrepo Pavese situato nella Lombardia meridionale e con un'estensione di circa 1.100 km². Le caratteristiche geologico-strutturali complesse rendono l'Oltrepo Pavese particolarmente predisposto a rischi geologici, tra cui il più importante è costituito dai fenomeni franosi (superficiali e profondi), come testimonia l'elevata estensione delle aree classificate a rischio idrogeologico molto elevato in accordo alla legge 267/98. Il fenomeno di ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi è inoltre causa di numerosi danni ad edifici ed infrastrutture (strade, lifelines). Tali caratteristiche rendono l'Oltrepo Pavese un'area test ideale, per la sua estensione e perché rappresentativo dell'ambiente appenninico, nella sperimentazione della tecnica interferometrica.

La ricerca, svoltasi nell'ambito di una convenzione stipulata tra la Regione Lombardia – Direzione Generale Territorio e Urbanistica – e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia, si colloca nell'ambito degli adempimenti previsti dalla L. 267/1998 e della L.183/89 che prevedono la perimetrazione del rischio idrogeologico nelle aree più critiche del territorio regionale, con possibili modifiche del Piano di Assetto Idrogeologico del Bacino del F. Po.

Gli obiettivi della ricerca sono stati i seguenti:

1. interpretazione dei risultati ottenuti dalla Interferometria Differenziale SAR con la tecnica dei PS nell'Oltrepo Pavese;
2. potenzialità e limiti dell'applicazioni della tecnica nella definizione di diverse forme di dissesto (frane, ritiro/rigonfiamento nella zona collinare; ritiro/rigonfiamento, subsidenza nella zona pedecollinare e di pianura);
3. messa a punto di metodologie di analisi dei dati.

In particolare nell'articolo verrà illustrata la sperimentazione dell'utilizzo della tecnica PS nell'individuazione di aree instabili per frane e nell'identificazione e monitoraggio di edifici lesionati.

Inquadramento geo-litologico dell'oltrepo pavese

L'area collinare dell'Oltrepo Pavese corrisponde al settore nord-occidentale dell'Appennino Settentrionale, costituito da successioni litostratigrafiche a dominante argillosa (Beatrizzotti et al., 1969; Braga et al., 1985). Le unità litologiche rappresentate in Figura 1 sono ricoperte da coltri eluvio-colluviali di spessore variabile e a componente prevalentemente argillosa. L'area di pianura risulta costituita da una successione di depositi alluvionali quaternari, originati dall'attività deposizionale dei torrenti appenninici e del fiume Po.

Le precipitazioni medie annue variano da 700 mm in pianura a 998 mm nella zona collinare. L'area di studio è stata inoltre caratterizzata nell'ultimo ventennio da alcuni periodi siccitosi, quali marzo 1989 - agosto 1993 e maggio

1998 – settembre 2000.

L'oltrepo Pavese è caratterizzato da un elevato numero di fenomeni franosi che coprono il 17% dell'area studiata (il 40 % nel settore orientale). Le tipologie più frequenti sono rappresentate da scivolamenti roto-traslazionali nella zona di testata che evolvono in colamenti (Cruden e Varnes, 1996); essi coinvolgono arenarie intercalazioni argillose, marne, marne calcaree e argille scagliose e marne calcaree con intercalazioni di argille. Limitati sono i crolli associati per lo più a rocce coerenti. E' stata anche ipotizzata la presenza di movimenti tipo lateral spread (Braga et al., 2003), in corrispondenza di placche arenacee sovrastanti terreni argillosi. Frane superficiali sono molto comuni nel Complesso Caotico e nelle Argille Varicolori; esse sono favorite da intense precipitazioni (come nel 1993, 1996, 2000) che seguono periodi siccitosi. Sono state mappate 3,707 frane, l'89 % di queste sono attive o quiescenti. La maggior parte delle frane attive corrisponde a frane superficiali, mentre le frane quiescenti o stabilizzate sono principalmente rappresentate da fenomeni complessi e profondi.

L'ampia diffusione di litotipi argillosi rende l'area particolarmente suscettibile a fenomeni di ritiro-rigonfiamento (Meisina, 2003). Sulla base della loro origine i terreni rigonfianti dell'Oltrepo Pavese possono essere suddivisi in tre tipologie: I. terreni eluvio-colluviali (alterazione di argille varicolori, complesso caotico, marne calcaree con intercalazioni argillose, marne, marne calcaree, e argille scagliose); II. terreni alluvionali; III. loess alterati e colluviati. Ad eccezione dei loess tali terreni presentano un potenziale di ritiro-rigonfiamento da alto a molto alto.

Metodologia

Per effettuare l'analisi interferometrica sono state acquisite 76 immagini SAR lungo orbita discendente e 26 immagini lungo orbita ascendente, provenienti dai satelliti ERS1/ERS2 nel periodo maggio 1992- novembre 2000/dicembre 2001. Le immagini sono state elaborate dalla T.R.E. mediante la tecnica dei diffusori permanenti. L'analisi ha portato all'identificazione di circa 95.500 PS discendenti e 3.800 PS ascendenti, che corrispondono generalmente a strutture antropiche. A causa della fitta copertura vegetale, del limitato numero di aree urbane e dell'elevata acclività dei versanti non sono stati identificati PS nella parte meridionale dell'area a Sud di Varzi I valori di velocità dei capisaldi permanenti sono stati calcolati rispetto ad un punto di riferimento localizzato nel paese di Casteggio. Gli spostamenti lungo LOS (Line of sight direction) variano da +5 a -16 mm/anno.

Due tipologie di analisi sono state effettuate: la Standard Permanent Scatterers Analysis e la Advanced Analysis. La prima analisi (SPSA) è stata utilizzata per lo studio del territorio a scala regionale, al fine di aggiornare lo stato di attività di aree in frana già precedentemente mappate, di individuare nuove aree instabili, e di verificare la relazione

tra PS e gli edifici lesionati. A tale scopo i risultati dell'analisi interferometrica sono stati integrati in ambiente GIS con il censimento delle frane e degli edifici lesionati. Il censimento delle frane è stato prodotto dall'analisi delle

foto aeree del 1994 (Volo Regione Lombardia) con controlli sul terreno effettuati nel 1999; le frane sono state suddivise in funzione della tipologia (Cruden e Varnes, 1996) e dello stato di attività.

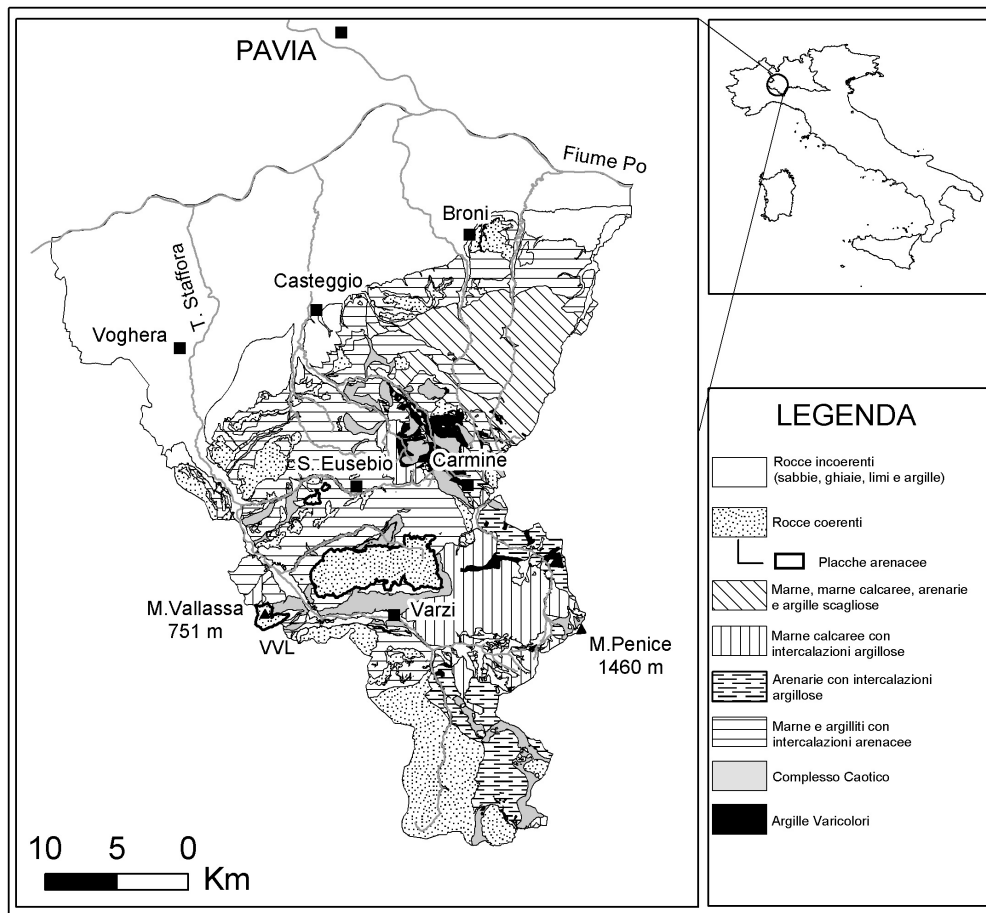


Fig.1. Carta di inquadramento litologico dell'Oltrepo Pavese.
Lithological map of Oltrepo Pavese

Il censimento degli edifici lesionati è avvenuto mediante la consultazione presso lo STER (Sede Territoriale di Pavia della Regione Lombardia) delle richieste di finanziamento nel periodo 1980-1999 per interventi di ripristino di fabbricati privati e pubblici lesionati (contributi in conto capitale regolati dalle leggi statali/regionali:L.R. n°59/1978, M.per coord. Prot. Civile n°942 – 31.03.1987, DGR n°23463 23.12.1996, DGR n°43777 18.06.1999). I dati raccolti sono stati successivamente verificati sul terreno, questo ha permesso anche di identificare ulteriori edifici che non risultavano nelle pratiche consultate.

Sulla base dei risultati dell'analisi standard sono stati selezionati 20 siti campioni in funzione della tipologia dei dissesti (subsidenza, ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi nella fascia pedecollinare e nella pianura alluvionale, frane e ritiro-rigonfiamento nella fascia collinare); del livello di conoscenza dei siti (esistenza di studi pregressi con indagini geognostiche e monitoraggio da

terra); appartenenza a siti perimetrati secondo la legge 267/1998; correlazioni (positive o negative) tra i PS ed i dissesti. Ogni sito è stato caratterizzato dal punto di visto litologico, geotecnico e geomorfologico. Nelle aree collinari l'analisi multitemporale delle foto aeree (Volo GAI 1954, Volo CMOP 1977, Volo Lombardia TEM 1980, Volo Regione Lombardia 1994, Volo Italia 2000) ha permesso di ricostruire l'evoluzione del dissesto tra il 1954 e il 2000, con particolare riferimento al periodo di monitoraggio satellitare 1992-2000. Sono state distinte aree con dissesto in espansione (accelerazione del processo di dissesto), in attenuazione (regressione del processo di dissesto), rimasto invariato (ha mantenuto nel tempo il medesimo stato di attività), rimasto attivo.

L'Advanced Analysis (APSA), più sofisticata, è stata applicata a scala di dettaglio su alcune aree campione.

Individuazione di aree instabili a scala regionale

L'analisi dei capisaldi permanenti ha evidenziato che un ridotto numero di PS ricade in aree in frana (7 %). In alcuni casi è stato possibile apprezzare spostamenti anche in aree in frana dove la fotointerpretazione e l'analisi di terreno non evidenziano particolari indicatori di movimento e che pertanto sono state considerate, in assenza di tale informazione, stabilizzate nella carta inventario.

In altri casi, sono stati identificati dei movimenti in aree considerate non in frana dagli inventari di dissesto esistenti (aree in lento movimento ma senza evidenze sul terreno di tali deformazioni). Non è tuttora accertato, ma non è escluso, che in alcuni casi tali movimenti possano essere interpretabili come precursori d'evento sul lungo termine. Alcuni di questi movimenti sono soprattutto evidenti all'esterno dei perimetri di frana (attiva, quiescente), si tratta in questo caso di fenomeni di deformazione lenta del pendio, alla sommità del versante e localmente in fondovalle, non rilevabili dal punto di vista geomorfologico ma segnalati anche dal dissesto di diversi fabbricati. Nelle zone di bordo delle placche arenacee i risultati del monitoraggio satellitare evidenziano importanti movimenti di abbassamento (~11 mm/anno) e sembrano confermare l'ipotesi dell'esistenza di movimenti di abbassamento dei blocchi, isolati da discontinuità tettoniche, ai quali sarebbero associati probabili fenomeni di espansione laterale (Meisina et al., 2005).

Le tecniche interferometriche da satellite offrono anche la possibilità di misurare il campo di deformazione superficiale di singoli siti in frana, analizzando le serie temporali di movimento a partire dal 1992. Occorre sottolineare che tale metodologia di monitoraggio riesce ad osservare movimenti prevalentemente verticali e che al contrario i fenomeni franosi sono caratterizzati da movimenti sia verticali che orizzontali. I PS dotati di serie storica, localizzati alla sommità del versante e al piede, indicano talora situazioni così differenziate:

- nella zona di accumulo: progressivo sollevamento (15-30 mm nell'intero periodo di controllo);
- nella parte medio-superiore del corpo di frana: abbassamenti o condizioni di relativa stabilità.

L'interpretazione delle serie storiche ubicate in aree in frana è risultata difficile a causa dell'influenza di diverse componenti del movimento non sempre chiaramente distinguibili: richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi, fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa, fattori geotecnici e topografici; condizioni di fondazione e caratteristiche strutturali dei fabbricati.

Vengono di seguito presentati i risultati dell'analisi interferometrica applicata a due aree campione rappresentative di contesti geomorfologici differenti. La prima area campione (S. Eusebio) è situata nella parte mediana della Valle Ardivestra, principale affluente di

destra del T. Staffora, ed interessa il versante destro modellato nelle argille varicolori (Marne di M. Piano) e nelle marne appartenenti alle Arenarie di Ranzano (Fig.2). L'area risulta soggetta ad intensi fenomeni di dissesto, che hanno anche parzialmente deviato il corso del T. Ardivestra. Le frane sono classificabili come movimenti complessi caratterizzati da scivolamenti roto-traslazionali nel settore superiore da cui proviene il materiale che evolvono verso valle in colate di terra. Fenomeni di riattivazione estesa si sono verificati nell'autunno del 1977 a seguito di intense precipitazioni; essi hanno provocato danni agli edifici e l'interruzione della strada comunale. L'analisi multitemporale delle foto aeree ha rilevato una progressiva mitigazione del dissesto, attribuibile anche ai numerosi e diffusi interventi di drenaggio (trincee) eseguiti nel 1986. Nel periodo di monitoraggio satellitare (1994-2000) si è osservato un sostanziale mantenimento delle condizioni di stabilità con locali fenomeni di riattivazione superficiale in corrispondenza di intense precipitazioni (Fig.3). I movimenti di maggiori dimensioni (frana di F.sso della Roncara e di Rio di Ponticelli) interessano le coltri di copertura delle Marne di Monte Piano suddivisibili in due orizzonti: il primo, localmente coinvolto dai movimenti più superficiali, è costituito da argille molto plastiche ($IP > 75$) e poco consolidate, localmente inglobanti ciottoli (spessore da 3 a 6 m e $V_p < 800$ m/s); il secondo, coinvolto da movimenti più profondi e antichi, è composto da argille e argilliti varicolori, inglobanti brandelli di substrato di natura marnosa e/o arenacea, (spessore variabile da 5 m a 10 m al piede del versante e V_p tra 1000 e 1780 m/s). Il substrato è costituito da marne e argille marnose grigie, asciutte e compatte, con locali livelli arenacei e calcarei ($V_p = 2000$ m/s) e presenta una giacitura a franapoggio.

L'analisi interferometrica ha individuato 17 PS in area in frana (36% dell'intera area), generalmente ubicati nella zona di accumulo su cui sorgono i principali nuclei urbani e la S.P. n°184, e conferma lo stato di quiescenza dei fenomeni sopra descritti (velocità comprese tra +1 e -1 mm/anno). La concentrazione di PS con velocità < -5 mm/anno presente nell'abitato di Colombara al piede del versante appare attribuibile a fenomeni di subsidenza connessa al ritiro del terreno, come confermato dall'elevato potenziale di ritiro e rigonfiamento delle argille dello strato più superficiale. La presenza di questo fenomeno è ulteriormente documentata dalla tipologia delle lesioni degli edifici che sono comparse generalmente nei mesi estivi, caratterizzati da un elevato deficit idrico. La seconda area campione (Carmine) si colloca nel settore orientale dell'Oltrepo Pavese (bacino del T. Ghiaia di Montalto). L'area è impostata in rocce caotiche (argille e argilliti scagliose con inclusi blocchi marnosi e arenacei) (Panini et alii, 2002). I dissesti sono rappresentati da colamenti e scivolamenti rotazionali e/o traslazionali, che evolvono anch'essi in colamenti, con superficie di scivolamento generalmente a contatto del substrato.

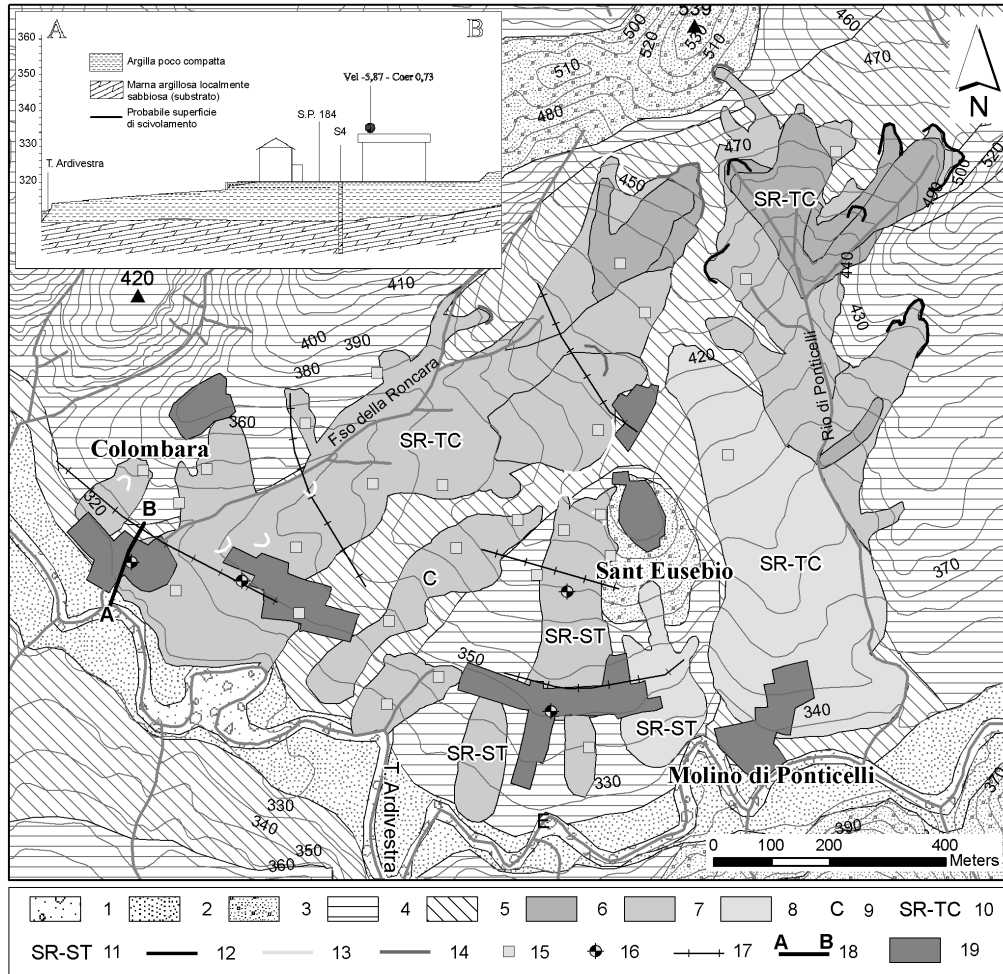


Fig.2. Carta dello stato del dissesto (zona di S.Eusebio). 1: Alluvioni Attuali; 2: Alluvioni Recenti; 3: Arenarie di Ranzano (facies arenacea) (Oligoc. sup.-Eoc. sup.); 4: Arenarie di Ranzano (facies marnosa) (Oligoc. sup.-Eoc. sup.); 5: Marne di Monte Piano (Eoc. sup.-Eoc. inf.); 6: frana attiva; 7: frana quiescente; 8: frana inattiva; 9: colamento; 10: scivolamento roto-traslazionale evoluto in colamento; 11: scivolamento roto-traslazionale; 12: nicchia attiva; 13: nicchia inattiva; 14: nicchia quiescente; 15: trincea esplorativa; 16: sondaggio; 17: stendimento sismico a rifrazione; 18: area urbana.

Landslide inventory map (S. Eusebio area). 1: Actual Alluvium; 2: Recent Alluvium; 3: Ranzano Sandstones (arenaceous facies) (Oligoc. sup.-Eoc. sup.); 4: Ranzano Sandstones (marly facies) (Oligoc. sup.-Eoc. sup.); 5: Monte Piano Marls (Eoc. sup.-Eoc. inf.); 6: active landslide; 7: dormant landslide; 8: inactive landslide; 9: earth-flow; 10: roto-traslational slide evolving into flow; 11: roto-traslational slide; 12: active scarp; 13: inactive scarp; 14: dormant scarp; 15: trench pit; 16: borehole; 17: seismic refraction profile; 18: urban area.

Si tratta di fenomeni che interessano la coltre superficiale (2-3 m) e che hanno una notevole estensione. Uno di questi, sul versante sottostante gli abitati di Cà del Zerbo e Carmine, è costituito da una vasta frana complessa caratterizzata da diverse nicchie di distacco, alcune ancora attive, le quali confluiscono a creare un unico fronte di accumulo che ha in parte deviato il corso del T.Ghiaia di Montalto, con uno sviluppo longitudinale di 1900 m circa ed una superficie totale pari a 0,7 km² (Fig.4). L'area coinvolta è interessata da numerosi ristagni d'acqua, dossi, contropendenze e zone con evidenti fenomeni di mobilitazione della coltre superficiale. L'analisi multitemporale delle foto aeree ha evidenziato il perdurare di condizioni di attività dei fenomeni franosi (Fig.5A) anche

nelle aree dove sono stati eseguiti interventi di drenaggio nel 1994 (Carmine, Bivio Carmine e Montelungo). Le aree urbane sono localizzate in corrispondenza dei crinali e sono caratterizzate da un'elevata concentrazione di edifici lesionati. I PS ricadono in corrispondenza delle zone di testata di frana. La concentrazione di PS in abbassamento (velocità compresa tra -1 e -5 mm/anno) rappresentata nelle frazioni di Montelungo, Bivio Carmine e Lagagnolo, testimonia l'esistenza di fenomeni di cedimento del terreno in buon accordo con il grave quadro fessurativo degli edifici analizzati. L'andamento della serie storica 05RGH (Fig.5B) evidenzia un cedimento di circa 60 mm dal 1992 al 2000, decrescente a partire dal 1997.

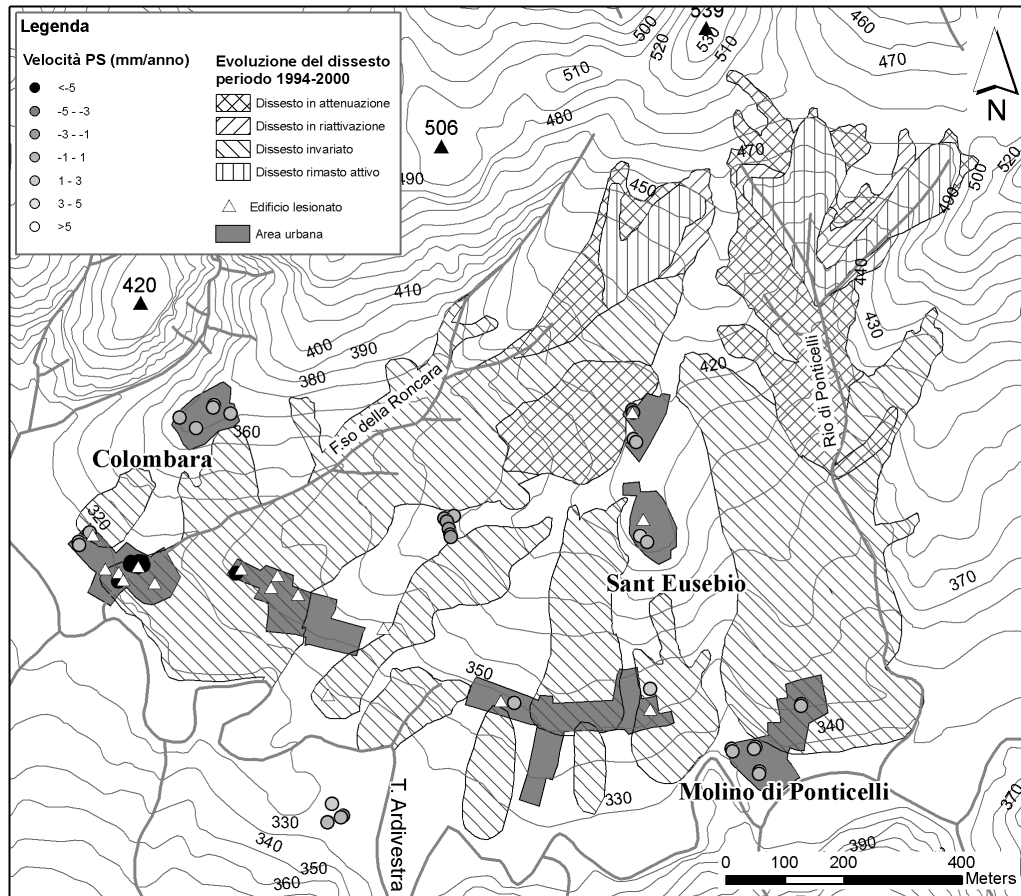


Fig.3. Evoluzione del dissesto nella zona di S.Eusebio (periodo 1994-2000) e distribuzione dei PS.
Landslide evolution (1994-2000) and PS distribution in S.Eusebio area.

Sovrapposto al trend generale di abbassamento si notano delle oscillazioni che appaiono in relazione all'alternarsi di eventi piovosi (sollevamenti) e di periodi di deficit idrico (abbassamenti) (Fig.5C). I movimenti registrati dalle serie storiche sono perciò imputabili a due componenti: una più evidente rappresentata dal richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi sottostanti, la seconda, è ascrivibile al fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa.

Edifici lesionati

Il censimento ha individuato circa 1200 edifici lesionati, di cui solo alcuni sono stati oggetto di monitoraggio geotecnico (1 %). La maggior parte degli edifici lesionati ricade all'interno delle unità litologiche costituite da marne, marne calcaree e argille scagliose (2,6 edifici/km²), alternanze irregolari a dominante marnoso-arenacea (2,3 edifici/km²) e sabbia, limo e argilla appartenenti a depositi alluvionali (1,7 edifici/km²). Sono costruzioni generalmente in muratura, prevalentemente ubicate a mezza costa o su terrazzo alluvionale, con fondazioni di tipo diretto continuo. Le lesioni sono attribuibili a più cause spesso concomitanti, tra cui spiccano i fenomeni franosi (edifici ubicati nella

zona di coronamento) ed il fenomeno di ritiro/rigonfiamento.

Il 33% degli edifici lesionati è interessato da PS. L'83 % dei PS che ricadono su edifici lesionati in pianura e il 63 % di quelli in collina risulta stabile (velocità compresa tra +1 e -1 mm/anno), una percentuale più ridotta è in abbassamento (7% - 18%) o in sollevamento (10 - 19%). Tale situazione è riferibile all'esecuzione di interventi di consolidamento eseguiti prima del periodo di monitoraggio o durante il medesimo.

Viene di seguito presentato il caso di un edificio lesionato ubicato in area di pianura su conoide alluvionale e in corrispondenza del quale è stata applicata un'analisi di tipo advanced (Fig.6A). L'edificio consiste in un condominio di tre piani fuori terra, più un seminterrato adibito a cantine e garages. L'edificio con telaio in cemento armato e murature di tamponamento, su fondazione diretta (profondità variabile da 1,50 a 2,50m), è stato costruito alla fine degli anni '70. I maggiori danni (rilevati nel 1994) interessano il settore SE dove sono stati osservate: screpolature sulle facciate, ubicate in corrispondenza degli spigoli delle aperture, con inclinazione di 45°, vistose lesioni inclinate di 45° in corrispondenza delle tramezze

interne (correlabili con quelle esterne) con prosecuzione trasversale nei solai di piano, lesioni subverticali e debolmente inclinate in corrispondenza delle finestrelle dello scantinato, infine fessure nei pavimenti del

seminterrato, causate dall'effetto di trascinamento per cedimento dei muri portanti. Nel blocco NO le lesioni hanno un andamento inverso rispetto al blocco SE, ed un'intensità inferiore.

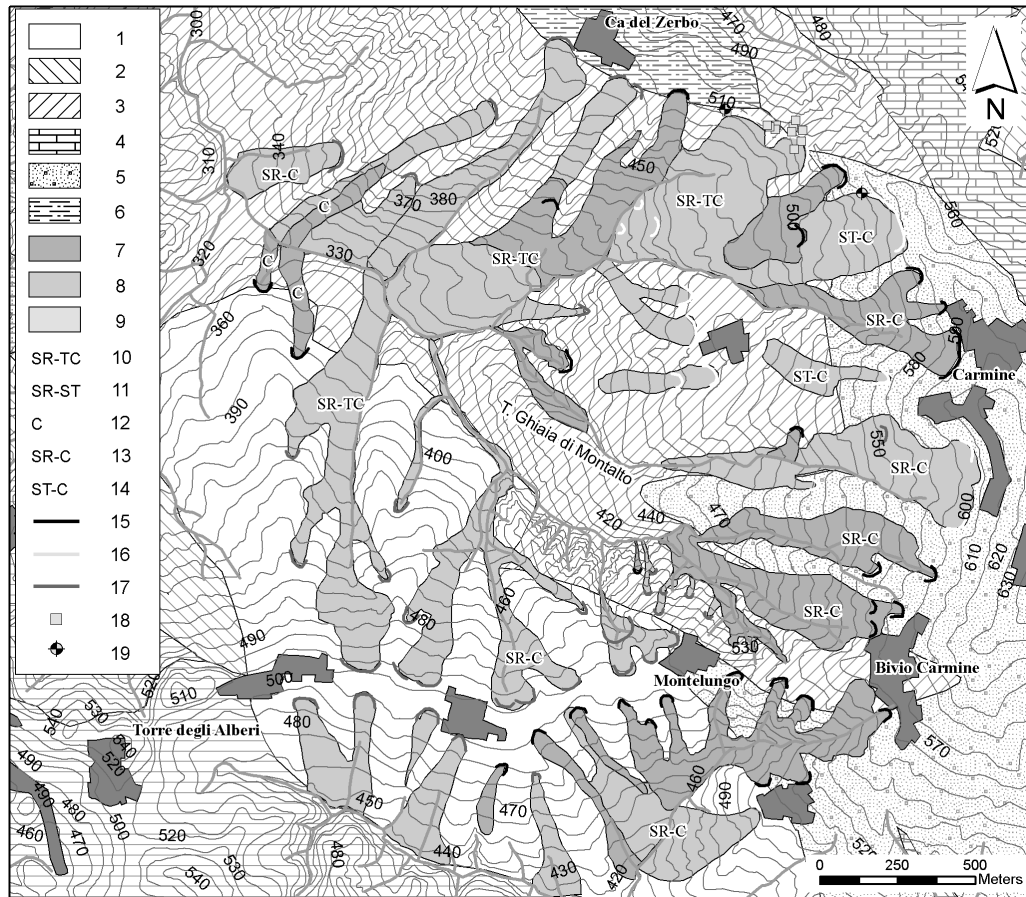


Fig.4. Carta dello stato del dissesto (zona di Carmine). 1: Complesso Indifferenziato (Oligoc.inf.); 2: Marne di Monte Piano (Eoc. sup.-Eoc. inf.); 3: Argille Varicolori di Cassio (Paleoc.-Turon.); 4: Calcari di Monte Cassio (Paleoc.-Turon.); 5: Arenarie di Scabiazza (Turon.-Cenoman.); 6: Complesso Caotico (età indefinibile); 7: frana attiva; 8: frana quiescente; 9: frana inattiva; 10: scivolamento roto-traslazionale evoluto in colamento; 11: scivolamento roto-traslazionale; 12: colamento; 13: scivolamento rotazionale evoluto in colamento; 14: scivolamento traslazionale evoluto in colamento; 15: nicchia attiva; 16: nicchia inattiva; 17: nicchia quiescente; 18: trincea esplorativa; 19: sondaggio.

Landslide inventory map. 1: *Complex Indifferentiated (Oligoc.inf.); 2: Monte Piano Marls (Eoc. sup.-Eoc. inf.); 3: Argille Varicolori (Paleoc.-Turon.); 4: Monte Cassio Limestones (Paleoc.-Turon.); 5: Scabiazza Sandstones (Turon.-Cenoman.); 6. Complesso Caotico; 7: active landslide; 8: dormant landslide; 9: inactive landslide; 11: roto-traslational slide; 12: flow; 13: roto-traslational slide evolving into flow; 14: traslational slide evolving into flow; 15: active scarp; 16: inactive scarp; 17: dormant scarp; 18: trench pit; 19: borehole.*

Il profilo geotecnico del terreno, ricostruito sulla base dei diagrammi Rp e RI/Rp di tre prove CPT (Fig.6B), evidenzia al di sotto del piano di posa delle fondazioni la presenza di terreni sostanzialmente argillosi, a diverso grado di consolidazione (più elevato al centro e nel settore NO dell'area del fabbricato) con intercalati livelletti/lenti limoso-sabbiose di spessore decimetrico. La potenza dell'orizzonte limoso-argilloso varia da 8,40 m (CPT1) a 12,3 m (CPT2) ed è maggiore nel settore SE (14 m). Ad esso seguono strati prevalentemente ghiaioso-sabbiosi con spessore tra 0,5-1,0 m a 3,4 m (CPT1) e con struttura

lenticolare. La falda freatica superficiale ha una soggiacenza minima intorno ai 3m; è presente inoltre un acquifero più profondo (da 10 a 25 m), dal quale viene estratta acqua ad uso idropotabile. I terreni sono caratterizzati da una plasticità medio-alta ($18 < IP < 35$), i minerali argillosi attivi sono presenti in percentuali non superiori al 30% e sono rappresentati da vermiculite e smectite.

Il potenziale di rigonfiamento stimato è da alto a medio. I dissesti dell'edificio appaiono imputabili ad un fenomeno di ritiro del terreno di fondazione, conseguente alla siccità prolungata che ha caratterizzato il periodo 1989-1993. Il

consolidamento delle fondazione coinvolte nel cedimento è stato attuato nel Gennaio del 1994, con l'esecuzione di micropali in corrispondenza del lato SE, tuttavia nell'edificio è stata registrata una ripresa delle lesioni a partire dal 1998. In corrispondenza dell'edificio sono stati identificati alcuni PS di tipo non lineare (Fig.6C). Le serie storiche presentano un abbassamento dell'ordine di 14-22 mm nel periodo 1992-2001, con velocità medie di -4mm/anno. Si osserva un rapido incremento del cedimento dai primi mesi del 1997 con brusche accelerazioni

soprattutto nel periodo 1998-2000, caratterizzato da un'intensa siccità. Si nota inoltre una buona corrispondenza tra la serie storica dei PS e l'andamento degli emungimenti dei pozzi dell'acquedotto, che nel periodo 1997-1998 mostrano un sensibile e graduale aumento. L'analisi dei PS ha perciò confermato l'esistenza di più probabili cause di dissesto: il ritiro del terreno a causa di periodi siccitosi e la subsidenza connessa all'estrazione di acqua dall'acquifero profondo.

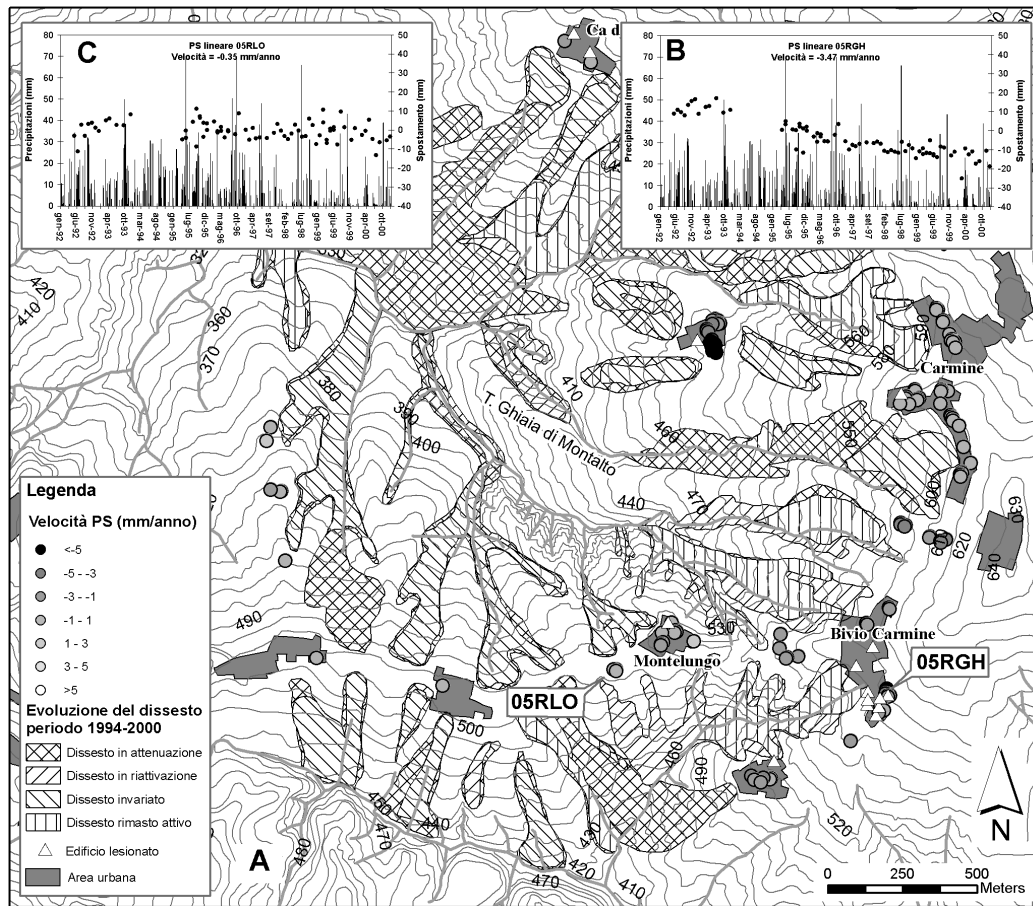


Fig.5. A. Evoluzione del dissesto nella zona di Carmine (periodo 1994-2000) e distribuzione dei PS. B e C: serie storiche di alcuni PS correlate con le precipitazioni giornaliere della stazione di Santa Maria della Versa.
 A. Landslide evolution (1994-2000) and PS distribution in Carmine area. B. and C: Daily rainfall (Santa Maria rain gauge) vs. PS displacement series.

Conclusioni

L'applicazione della tecnica PS in Oltrepo Pavese ha confermato le sue elevate potenzialità nell'identificazione e monitoraggio delle deformazioni del terreno a scala regionale. Nonostante il limitato numero di PS a disposizione sulle aree in frana l'analisi ha permesso non solo di verificare il comportamento di zone instabili già conosciute, ma anche di identificare nuove situazioni caratterizzate da movimenti del suolo significativi, non evidenziati dai rilevamenti geomorfologici. In alcuni casi

l'indagine ha inoltre permesso di aggiornare lo stato di attività del dissesto inizialmente definito sulla sola base geomorfologica. La tecnica descritta si è dimostrata utile nell'identificazione di aree di priorità, dove le autorità locali possono indirizzare gli studi geologici di dettaglio e progettare gli interventi di mitigazione. La principale limitazione della tecnica è connessa alla distribuzione non omogenea dei PS che generalmente corrispondono ad edifici e al fatto che i movimenti registrati possono essere connessi a fattori locali, quali la struttura del singolo edificio ed il relativo terreno di fondazione.

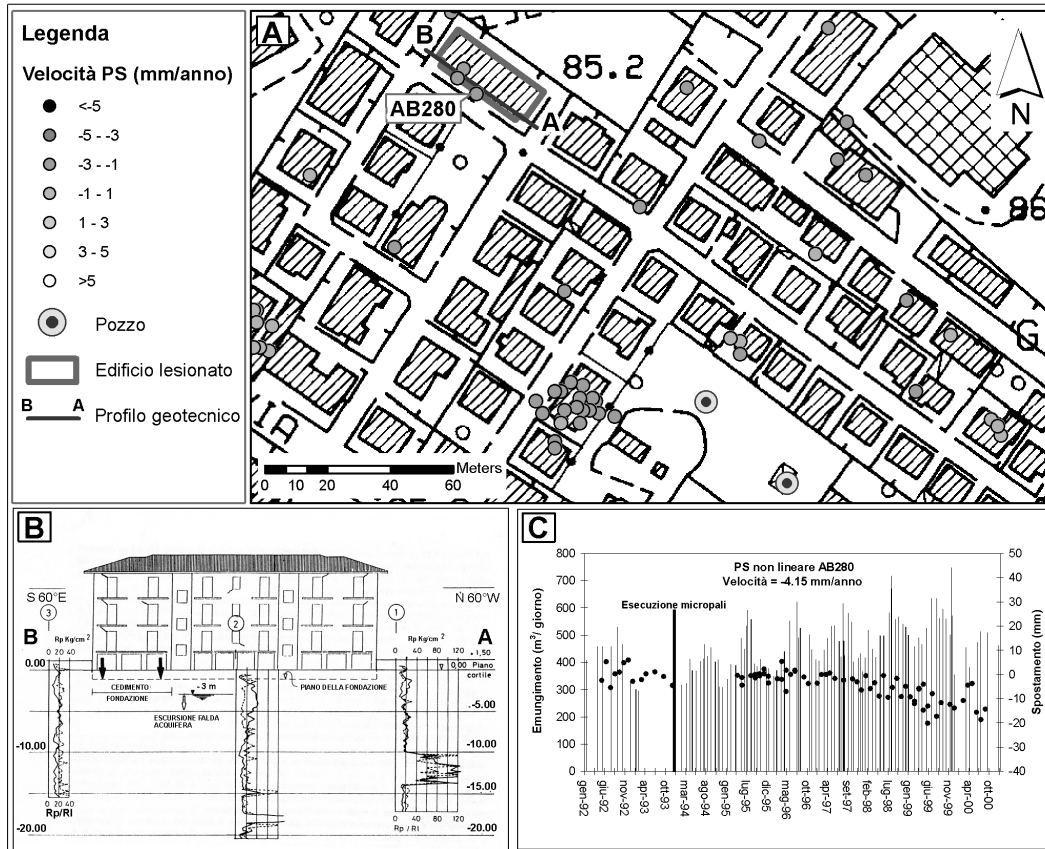


Fig.6. A. Distribuzione dei PS in corrispondenza di alcuni edifici ubicati nella zona di pianura dell’Oltrepo Pavese. B. Profilo geotecnico dei terreni sottostanti un edificio lesionato. C. Serie storica del PS “AB280” situato sull’edificio lesionato.

A. PS distribution on some buildings located in the plain. B. Geotechnical section of the damaged building soil foundation. C: Time series relative to the PS “AB280”, located on the damaged building.

Gli abbassamenti ed i sollevamenti identificati dai PS risultano dalla combinazione di più fenomeni: movimenti franosi e ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi, spesso sovrapposti e difficilmente distinguibili.

L’analisi interferometrica si è dimostrata un valido strumento di supporto per lo studio delle problematiche connesse ai fabbricati (condizioni di stabilità) in relazione ai

fenomeni di dissesto idrogeologico.

A scala di dettaglio l’analisi advanced ha permesso di evidenziare la presenza di movimenti non lineari connessi al ritiro del terreno e alla subsidenza in relazione all’estrazione di acqua dal sottosuolo, identificando il periodo di comparsa e di aggravamento del quadro di dissesto dell’edificio.

Bibliografia

- Beatrizzotti, G., Bellinzona, G., Beltrami, G., Boni, A., Braga, G., Marchetti, G., Mosna, S., 1969. Geological map of Italy Fg.71 – Voghera (2nd Ed) - Servizio Geologico d’Italia, Roma.
- Braga, G., Braschi, G., Calculli, S., Caucia, F., Cerro, A., Colleselli, F., Grisolia, M., Piccio, A., Rossetti, R., Setti, M., Spalato, A., Soggetti, F., Veniale, F., 1985. I fenomeni franosi nell’Oltrepo Pavese: tipologia e cause. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 20, 621-666.
- Braga, G., Meisina, C., Piccio, S., 2003. Study of a complex landslide movement for risk assessment: the example of the Poggio Ferrato landslide (Northern Italy). *International Conference Fast slope movements prediction and prevention for risk mitigation*, 1, 37-45, Picarelli Editor, Naples.
- Canuti, P., Casagli, N., Ermini, L., Fanti, R., Farina, P., 2004. Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. *Environmental Geology*, 45, 907-919.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2003a. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (7), 1685-1701.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003b. Monitoring Landslides and Tectonic Motion with the Permanent Scatterers Technique. *Eng. Geol.*, 68, 3-14.
- Cruden, D., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes, *Landslides, investigation and mitigation*. Special Report 247. A.K. Turner and R.L. Schuster Eds.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 39, 8-20.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, pp. 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, F., Rocca, N., Casagli, N., Farina, P. Young, B., 2005. Permanent Scatterers

Technology: a powerful state of the art tool for historic and future monitoring of landslides and other terrain instability phenomena. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, 31 May - 3 June 2005; pp. 1-9.

Meisina, C., 2003. Light buildings on swelling/shrinking soils: case histories from Oltrepo Pavese (north-western Italy). Int. Conf.

on Problematic Soils, Nottingham, July 28-30, 2, 365-374.

Meisina, C., Zucca, F., Verri, F., Conconi, F., Fossati, D., Ceriani, M., Allievi, J., 2005. Use of permanent scatterers technique for large scale mass movement investigation. 14th Meeting of the Association of European Geological Societies, Torino, September 19-23 2005, 100-

101.

Panini, F., Fioroni, C., Fregni, P., Bonacci, M., 2002. Le rocce dell'Oltrepo Pavese: note illustrative della carta geologica dell'Appennino Vogherese tra Borgo Priolo e Ruino. Atti Ticinesi di Scienze della Terra, 43, 83-109.