

SVILUPPO DI UN SERVIZIO DI MAPPATURA E MONITORAGGIO DELLE FRANE IN ITALIA E SVIZZERA: INTEGRAZIONE DI TECNOLOGIE SATELLITARI ED ANALISI GEOLOGICA

Autori

Paolo Manunta, Anna Maria Deflorio
Planetek Italia, Bari
manunta@planetek.it

Marc Paganini, Francesco Palazzo
ESA ESRIN, Frascati
marc.paganini@esa.int, francesco.Palazzo@esa.int

Paolo Farina, Sandro Moretti
Università degli Studi di Firenze, Dip. Scienze della Terra
pfarina@geo.unifi.it

Davide Colombo
TRE Tele-Rilevamento Europa, Milano
Davide.colombo@treuropa.com

*Giovanni Menduni, Marcello Brugioni, Lorenzo
Sulli, Giovanni Montini*
Autorità di Bacino del Fiume Arno, Firenze
adbarno@arno.autoritadibacino.it

Antonio Risi, Carlo Terranova, Elena Piscitelli, Fabio Matano, Sabato Iuliano
P.O. Difesa Suolo PON ATAS 2000-2006
Unità di Supporto Locale n. 6 Campania MATT DGDS
Podis.campania@libero.it

Riassunto

Il progetto SLAM riguarda lo sviluppo di un servizio di mappatura e monitoraggio degli eventi franosi, basato su un'analisi integrata in ambiente GIS di dati satellitari (immagini radar e ottiche) con informazioni geologiche e geomorfologiche tradizionali.

Il progetto, durato circa due anni, è stato realizzato nell'ambito del programma DUP (Data User Programme) ESA (European Space Agency) da un consorzio internazionale guidato da Planetek Italia e ha visto la partecipazione attiva di alcune organizzazioni italiane e svizzere che si occupano di gestione del rischio idrogeologico. L'analisi è stata condotta su alcune aree campione in Italia e in Svizzera per un'estensione totale pari a circa 16000 km².

Introduzione

Il progetto SLAM è stato sviluppato nell'ambito del DUP dell'ESA, con l'obiettivo di sviluppare un servizio innovativo di mappatura e monitoraggio degli eventi franosi, basato sull'integrazione di osservazioni satellitari con dati acquisiti in situ tramite metodologie tradizionali.

La realizzazione del servizio è stata affidata al consorzio guidato da Planetek Italia, in collaborazione con Tele-Rilevamento Europa, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze, Geotest (Svizzera), Gamma Remote Sensing (Svizzera) e Spacebel (Belgio).

Il servizio SLAM è stato sviluppato in stretta collaborazione con un gruppo di utenti italiani e svizzeri, tra i quali figurano il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (CNR-GNDCI), il Ministero Italiano dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Direzione Difesa del Suolo, e l'ufficio Federale Svizzero delle Acque e della Geologia come principali utenti a livello nazionale. Inoltre, a livello locale il progetto si è avvalso della partecipazione attiva dell'Autorità di Bacino dell'Arno, della Regione Campania, Assessorato Ambiente e Territorio – Progetto PODIS e di alcuni cantoni svizzeri.

In particolare, il servizio SLAM è in grado di fornire tre tipologie di prodotto:

1. Mappatura degli eventi franosi: aggiornamento o creazione su larga scala (1:25.000) dell'inventario degli eventi franosi.
2. Monitoraggio degli eventi franosi: analisi geomorfologica a scala di dettaglio di un'area interessata da dissesto (scala 1:5.000-1:10.000).
3. Carta della suscettibilità da frana: zonazione dell'area d'interesse a media scala (1:10.000) secondo diversi livelli di suscettibilità da frana.

Il progetto ha avuto inizio nel maggio 2003 e si è articolato in due fasi della durata rispettivamente di dieci e quattordici mesi. La prima dedicata allo sviluppo della versione prototipo dei prodotti si è conclusa nel marzo 2004 con la validazione preliminare dei risultati; la seconda fase ha visto l'implementazione del servizio SLAM su tutte le aree campione

selezionate (circa 16000 km²), la validazione finale dei prodotti e la valutazione tecnica degli utenti che hanno usufruito del servizio.

Il workshop SLAM, tenutosi in ESA ESRIN il 5 maggio 2005, ha segnato la conclusione delle attività di implementazione per i casi di studio italiani ed è stata l'occasione per presentare ufficialmente i risultati del progetto ad una vasta platea di utenti che si occupano della gestione del territorio e sono particolarmente attenti alle tematiche inerenti il rischio idrogeologico.

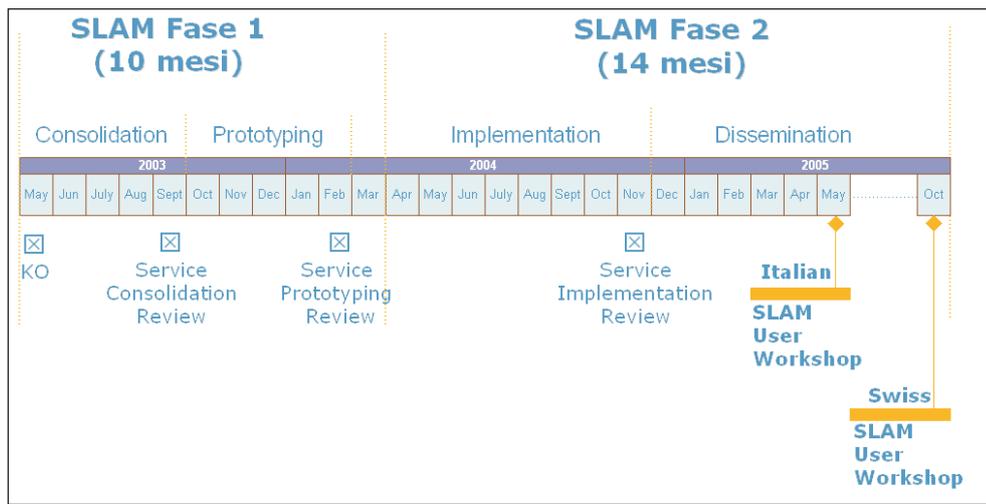


Figura 1. Schema della tempistica del progetto

I casi di studio

In Italia il servizio di mappatura su larga scala (prodotto tipo 1) è stato implementato per un'area nella provincia di Benevento in Campania e per l'intero Bacino del Fiume Arno, mentre l'analisi a scala di dettaglio (prodotto tipo 2) è stata sviluppata per alcuni siti test scelti nella regione Campania (Pesco Sannita, Reino, San Marco dei Cavoti, Campolattaro) e all'interno del Bacino del Fiume Arno (Poggibonsi, Pelago, Chianciano e Capannori). La carta della suscettibilità (prodotto di tipo 3) è stato sviluppato per l'intero Bacino del Fiume Arno.

Per quanto riguarda la fornitura del servizio in Svizzera, il prodotto di tipo 1 è stato fornito per la regione orientale del Cantone di Berna e del Canton Vallese e per la regione Tre Valli nel Canton Ticino, mentre l'analisi di dettaglio è stata sviluppata per alcuni siti nel Cantone di Berna (Grindelwald, Lauterbrunnen), nel Cantone Vallese (Grubengletscher, Montagnon, Gräichen), nel Canton Vaud (La Frasse, Villars sur Ollon), nel Canton Ticino (Biasca, Cerentino, Campo Vallemaggia) e nel Canton Friburgo (regione dello Schwarzsee).

Per l'analisi dei siti italiani è stata utilizzata la tecnica di interferometria SAR dei Riflettori Permanenti (Tecnica dei Permanent Scatterers), sviluppata dal Politecnico di Milano

e perfezionata da Tele-Rilevamento Europa, mentre per i casi svizzeri è stata utilizzata la tecnica di multi-interferometria SAR e IPTA (Interferometric Point Target Analysis) sviluppate da Gamma Remote Sensing.

Struttura del servizio

L'erogazione del servizio prevede il processamento dei dati di input e l'interpretazione geologica dei risultati. Il servizio si conclude con la validazione finale del prodotto.

La consegna del prodotto viene sempre seguita da una valutazione della qualità che vede coinvolti gli utenti finali allo scopo di verificare il livello di soddisfazione dei requisiti.

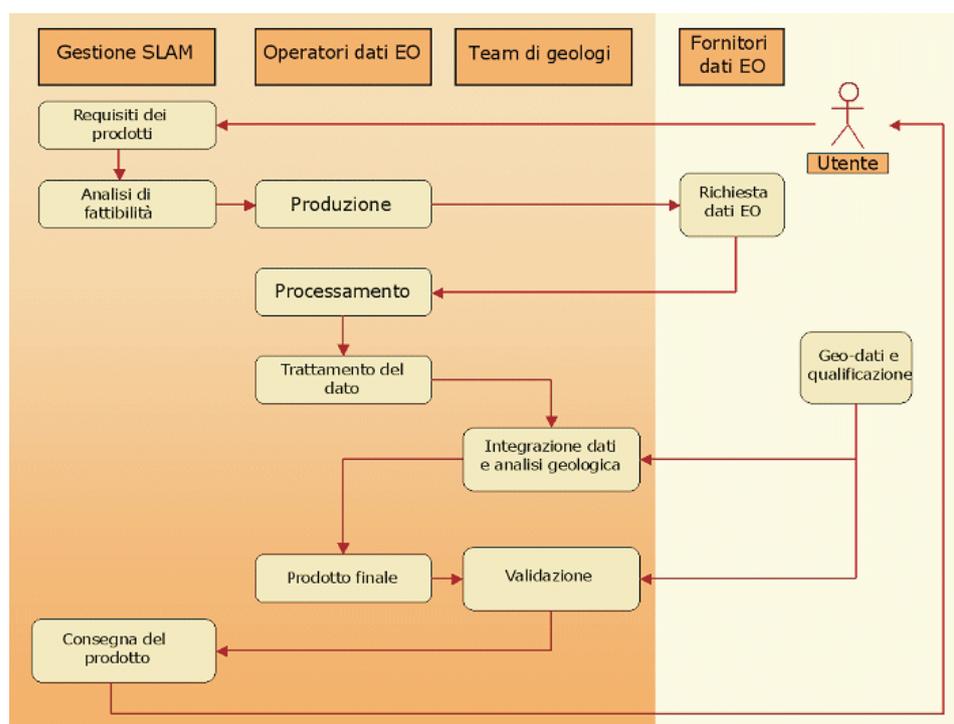


Figura 2. Struttura del servizio SLAM

Ordinazione del prodotto e acquisizione dati. L'utente può richiedere una delle tre tipologie di prodotto specificando i limiti amministrativi dell'area d'interesse e il periodo di osservazione su cui focalizzare l'analisi. I dati cartografici in uso presso l'utente, ove possibile, vengono resi disponibili al consorzio come dati ausiliari. Previa analisi di fattibilità dell'ordine, parte l'acquisizione dei dati.

Processamento dei dati in input. I dati radar vengono analizzati con la tecnica dei diffusori permanenti (PS) per costruire il database con le misurazioni millimetriche degli spostamenti lungo la direzione di vista del satellite. I dati ottici (es. immagini IKONOS, SPOT) vengono processati al fine di estrarre informazioni utili a ricostruire l'assetto geomorfologico del territorio.

Interpretazione geologica e produzione cartografica. Un team di geologi esperti sviluppa in ambiente GIS l'analisi geomorfologica e l'interpretazione dei risultati provenienti dal processamento dei dati in input. Quest'analisi consiste nell'integrazione di dati da satellite con informazioni geologiche e cartografiche, quali la carta d'inventario delle frane in uso presso l'utenza, dati di monitoraggio in situ e dati storici (database AVI, SCAI ed IFFI). Il risultato di tale analisi consiste nello sviluppo delle tre tipologie di prodotto SLAM.

Validazione. La verifica dell'accuratezza delle informazioni prodotte dal servizio viene affidata a rilievi sul campo effettuati su aree campione.

Consegna del prodotto e qualificazione. Il prodotto viene consegnato all'utente finale su CDROM o via FTP. Dopo la consegna del prodotto è prevista una fase in cui l'utente esprime una valutazione tecnica delle caratteristiche del prodotto consegnato.

1. Mappatura degli eventi franosi

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contenuto informativo | - Velocità medie annue degli spostamenti rilevati sui PS (mm/anno) - Mappa degli eventi franosi su scala regionale (vaste aree) |
| Periodo di osservazione | - a partire dal 1992 |
| Accuratezza | velocità accurate fino a 0,1 mm/anno |
| Risoluzione spaziale | 1:25000 |
| Sistema di riferimento | - PS secondo il sistema World Geographic Reference System - Mappa degli eventi franosi: su richiesta dell'utente |
| Formato dei dati | - Misure dei PS in formato DBF - Carta dei corpi franosi in formato Es® Shapefile e cartaceo |

2. Monitoraggio dei movimenti franosi

| | |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contenuto informativo | - Serie temporali degli spostamenti rilevati dai PS (mm/anno) - Mappa degli eventi franosi su scala di dettaglio (aree ristrette) - Report monografico delle aree in frana analizzate |
| Periodo di osservazione | - a partire dal 1992 |
| Accuratezza | velocità accurate fino a 0,1 mm/anno |
| Risoluzione spaziale | da 1:5.000 a 1:10.000 |
| Sistema di riferimento | - PS secondo il sistema World Geographic Reference System - Mappa degli eventi franosi: su richiesta dell'utente |
| Formato dei dati | - Misure dei PS in formato DBF - Carta dei corpi franosi in formato Es® Shapefile - Report monografico delle frana analizzata formato cartaceo/dig |

3. Mappatura della suscettibilità di frana

| | |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contenuto informativo | - Carta di suscettibilità di frana - Carta di previsione temporale di pericolosità (solo per aree in frana) |
| Risoluzione spaziale | da 1:10.000 a 1:25000 |
| Sistema di riferimento | su richiesta dell'utente |
| Formato dei dati | formato Es® Shapefile e cartaceo |

Figura 3. Le tabelle riportano in sintesi, le specifiche tecniche dei tre prodotti SLAM



Struttura dei prodotti SLAM

Il servizio SLAM fornisce all'utente un prodotto complesso costituito da due componenti principali:

Componente base: Insieme dei punti di misura rilevati nell'area di interesse grazie alla tecnica dei diffusori permanenti (PS) con i dati relativi agli spostamenti millimetrici lungo la congiungente satellite-bersaglio per tutto il periodo di osservazione.

Componente interpretata: cartografia in formato Esri® Shapefile e report tecnici risultato di un'analisi integrata della componente base con i dati ottici (immagini satellitari IKONOS e SPOT), dati in-situ (inclinometri, piezometri) e dati ancillari (carta delle pendenze, carta litologica, geomorfologica, uso del suolo, etc.).



Descrizione dei prodotti SLAM e risultati

In questa sezione vengono descritte le tre tipologie di prodotto fornite da servizio SLAM con particolare riferimento ai casi di studio italiani.

Tipo 1 - Mappatura degli eventi franosi

Il servizio prevede l'aggiornamento o la creazione su vasta scala della carta inventario degli eventi franosi.

Dati in input:

- Dati interferometrici: velocità media annua degli spostamenti millimetrici rilevati sul terreno dai diffusori permanenti secondo analisi standard (Standard PS Analysis).
- Carta inventario delle frane in uso presso l'utenza (ove disponibile).
- Dati satellitari ad alta risoluzione: immagini da satellite (per es. SPOT o IKONOS).
- Dati cartografici: modello digitale del terreno, carta delle pendenze, esposizione dei versanti, carta litologica, foto aeree.

La necessità di effettuare un controllo a vasta scala sulla presenza di movimenti di versante trae beneficio dall'utilizzo di dati satellitari provenienti dall'analisi interferometrica. Per i casi italiani, la tecnica utilizza come sorgenti di dati i sistemi radar satellitari ad apertura sintetica (Synthetic Aperture Radar, SAR) ed in particolare i sensori di tipo SAR montati sui satelliti ERS1 ad ERS2 dell'Agenzia Spaziale Europea.

I dati ERS vengono analizzati con la tecnica dei Diffusori Permanenti (PS, Permanent Scatterers), basata sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito tipicamente da parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, elementi per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione.

La possibilità di coprire grandi estensioni spaziali con una

singola immagine radar monitorando con una frequenza di acquisizione mensile le deformazioni del terreno, permette di rilevare la presenza di frane a cinematica lenta (fino ad alcuni cm/anno) o movimenti precursori relativi a fenomeni ad evoluzione più rapida.

La metodologia necessaria per tale attività prevede l'integrazione delle misure di deformazione dei PS con dati cartografici di base e con l'utilizzo di foto aeree o immagini da satellite ad alta risoluzione (per es. SPOT, Ikonos) al fine di dare un significato geologico ai movimenti puntuali misurati da satellite.

In primo luogo si valuta se in corrispondenza di PS in movimento esistano le condizioni morfologiche e vegetative per la presenza di un fenomeno franoso (scarpate, terrazzi, curvature anomale delle curve di livello, anomalie nella copertura vegetale rispetto al contorno, ecc.). L'analisi, quindi, mira a delineare l'area interessata potenzialmente dai movimenti e la geometria degli stessi, risalendo ad una probabile direzione di movimento.

A supporto di tale analisi vengono impiegati, oltre alle suddette basi topografiche e foto aeree, una serie di tematismi utili per una migliore interpretazione dei dati di deformazione. Tra questi di annovera il modello digitale del terreno, per la proiezione 3D delle foto aeree, carte delle pendenze e dell'esposizione dei versanti, desunte dal modello digitale del terreno e carte inventario del dissesto.

Al fine di gestire in un modo semplice e rapido questi dati vengono elaborati in ambiente GIS. Tale piattaforma informatica permette, infatti di gestire, elaborare ed archiviare contemporaneamente dati digitali sia in formato raster che in formato vettoriale, garantendo la massima flessibilità in termini di sistema geografico di riferimento.

L'analisi si può sinteticamente riassumere nei seguenti passaggi:

1. Visualizzazione e classificazione dei PS. I punti di misura vengono tematizzati in funzione della velocità secondo un numero finito di classi.
2. Integrazione dei dati cartografici e da satellite. La sovrapposizione delle diverse sorgenti di dati unitamente alla distribuzione dei PS consente di ottenere informazioni utili all'identificazione delle aree instabili.
3. Interpretazione delle aree in movimento. L'output della fase interpretativa consiste nell'identificazione delle aree in frana e nell'aggiornamento della carta di inventario preesistente.

Il caso della provincia di Benevento

I risultati dell'analisi integrata per l'area di Benevento consistono nel censimento di circa 250 aree in frana. Più di 110 immagini ERS sono state processate per l'estrazione di 110.000 PS. Delle aree in frana analizzate circa il 19% è rappresentato da nuove frane individuate dal servizio SLAM, mentre per le frane preesistenti nell'inventario in uso presso l'utenza il 13% ha subito modifiche nella perimetrazione.

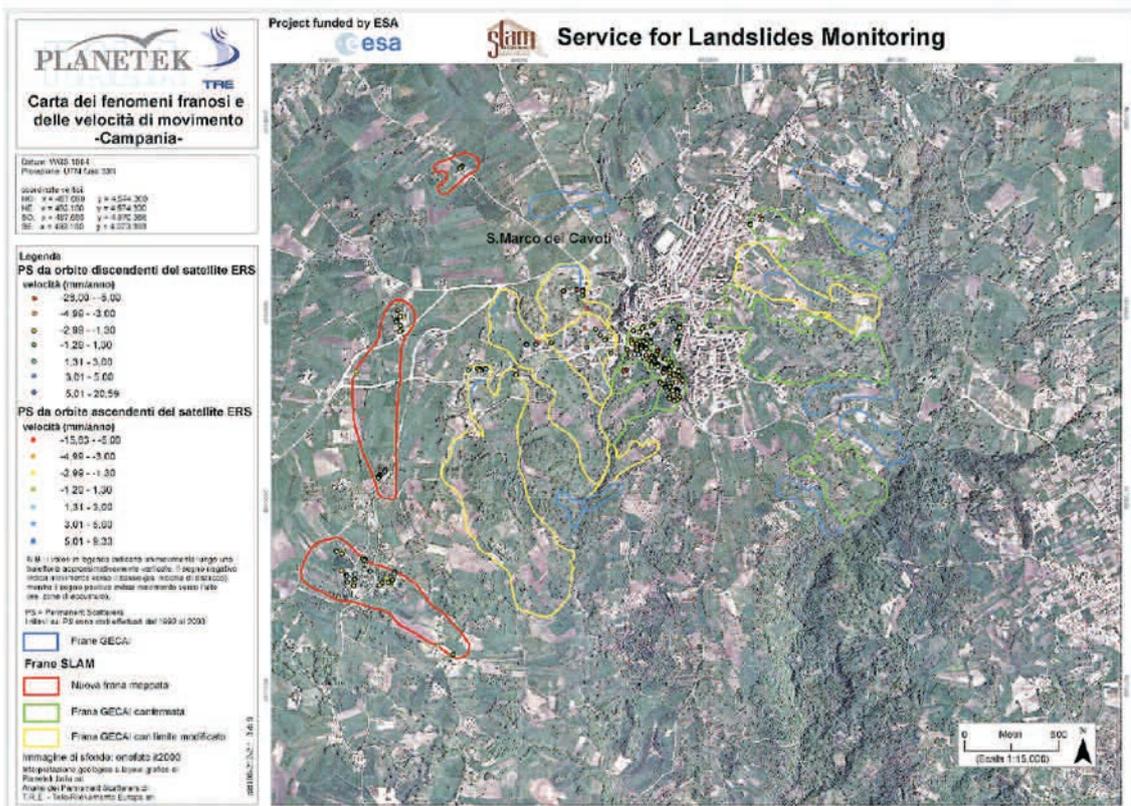


Figura 4. Esempio di Mappatura degli eventi franosi prodotta per un comune della Campania

La carta riporta i PS classificati in base all'entità dello spostamento lungo la direzione satellite-bersaglio. I valori sono contrassegnati da segno positivo o negativo in funzione di un avvicinamento o un allontanamento dei punti rispetto al satellite. Nel caso di una frana rotazionale, ad esempio, i valori negativi possono indicare movimenti lungo la scarpata principale laddove ha origine il distacco del materiale, mentre i valori positivi (movimento verso il sensore) possono essere indizio di una zona di accumulo nella quale il materiale mobilizzato si trova a quote superiori rispetto a quelle della superficie originaria del versante.

Il caso del bacino dell'Arno

L'analisi è stata condotta sull'intero bacino del Fiume Arno coprendo un'estensione pari a circa 9.000 km². Sono state processate 350 immagini ERS con circa 600.000 PS rilevati. Sulla totalità delle aree in frana cartografate dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno ben 1.883 frane sono state caratterizzate dalla presenza di PS. Il 18,3% di queste sono state modificate nell'estensione, il 6,1% nello stato di attività, mentre per il 63,8% delle frane preesistenti le informazioni riportate nella carta inventario sono state confermate. In aggiunta è stato possibile individuare altre 220 aree instabili non cartografate precedentemente.

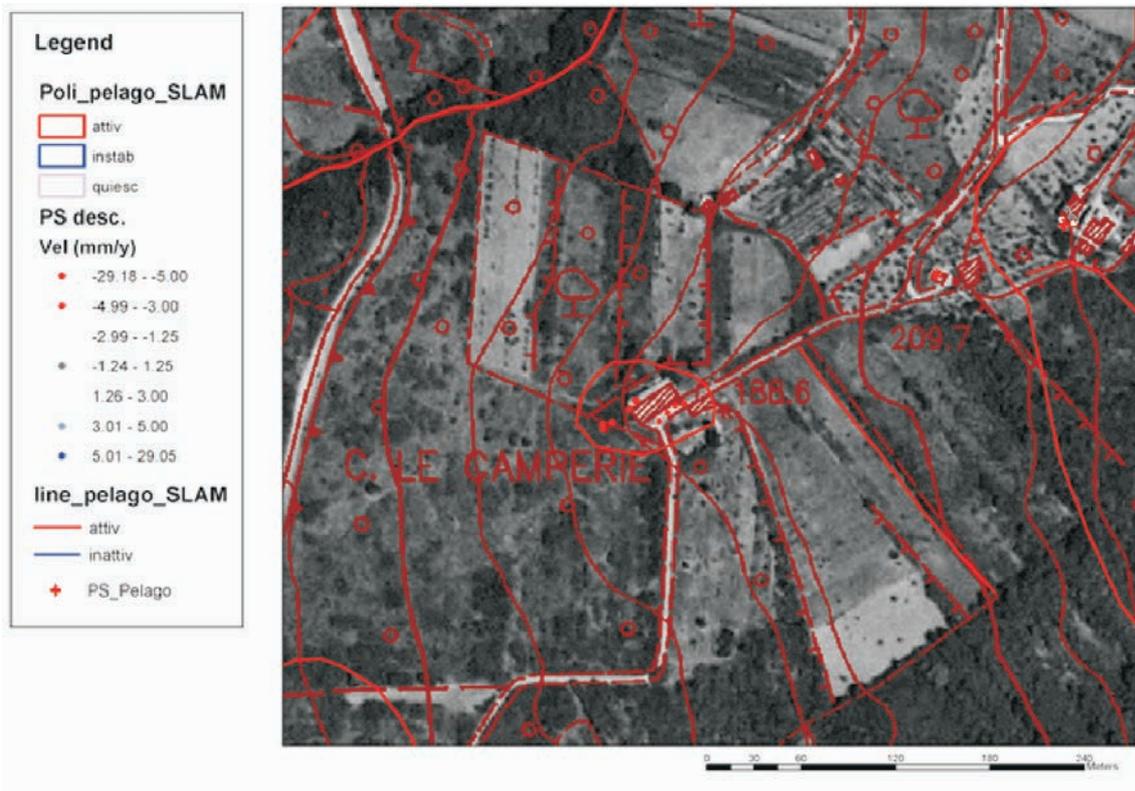


Figura 5. Evidenze di lesioni su edifici e muretti corrispondenti alla zona mappata sulla figura in alto.

Tipo 2 - Il prodotto di monitoraggio degli eventi franosi

Il prodotto di Monitoraggio degli eventi franosi deriva dall'integrazione delle informazioni dell'analisi interferometrica e delle immagini ottiche ad alta risoluzione con i dati provenienti da monitoraggio in-situ, archivi storici e dati bibliografici.

I dati in input:

- Dati interferometrici: serie temporali degli spostamenti millimetrici rilevati dai diffusori permanenti secondo analisi avanzata (Advanced PS Analysis).
- Dati satellitari ad alta risoluzione: immagini da satellite SPOT e IKONOS;
- Dati bibliografici (per es. informazioni sulla geologia e la geomorfologia del territorio)
- Dati di monitoraggio in situ (per es. misure da piezometri, inclinometri, etc.)
- Dati cartografici: modello digitale del terreno, pendenza, esposizione dei versanti, carta litologica, foto aeree.

L'obiettivo è la costruzione di un modello geologico dell'evento franoso in analisi.

Per i casi di studio in Italia, in questo caso viene utilizzata l'Analisi Avanzata PS, che permette di ottenere le serie temporali di ogni PS, ossia i grafici spostamento in funzione del tempo di ogni caposaldo radar.

L'integrazione di tali dati con un'approfondita analisi geologica della frana, consente di ottenere i seguenti risultati:

- definizione degli esatti limiti dell'area interessata da movimenti;
- definizione di aree omogenee affette da diversi tassi di deformazione;
- correlazione tra possibili superfici di scivolamento (desunte da misure inclinometriche) con movimenti superficiali;
- creazione di sezioni geologiche su zone "sensibili" per risalire al vettore di spostamento reale (proiezione lungo linea di massima pendenza e confronto con misure in-situ).

La metodologia necessaria per tale attività prevede l'integrazione delle misure di deformazione dei PS con dati cartografici di base e con l'utilizzo di foto aeree al fine di dare un significato geologico ai movimenti puntuali misurati da satellite.

In particolare, l'analisi è volta alla definizione di aree omogenee dal punto di vista geomorfologico, affette da simili tassi di deformazione, al fine di zonare l'area in frana in settori con cinematismi differenti e definire i limiti della frana. Una volta effettuata tale zonazione, l'integrazione dei dati esistenti di sottosuolo con i dati di deformazione superficiale dei PS permette di risalire alle geometrie del fenomeno. A supporto di tale analisi vengono impiegati, oltre alle suddette basi topografiche e foto aeree, una serie di informazioni deducibili da precedenti studi del fenomeno, quali

relazioni tecniche contenenti informazioni sulle stratigrafie e misure in-situ.

Le fasi successive dello studio possono essere sintetizzate come segue:

1. Raccolta e analisi delle informazioni bibliografiche e dei dati cartografici a disposizione;
2. Integrazione in ambiente GIS dei dati interferometrici con le immagini da satellite ad alta risoluzione e i dati cartografici. L'obiettivo è quello di definire esattamente l'estensione dei corpi franosi ed individuare le aree interessate da differente tasso di deformazione.
3. Analisi comparativa della distribuzione spaziale dei dati interferometrici (misure dei PS) con i dati di monitoraggio in-situ
4. Costruzione di un modello geologico in grado di definire la tipologia dell'evento, la distribuzione dell'attività e un possibile scenario futuro.

Il caso della Provincia di Benevento

L'analisi SLAM è stata condotta anche su alcune aree campione in provincia di Benevento.

Nella Figura 6 sono illustrate alcune aree instabili visualizzate in 3D in sovrapposizione ai diffusori permanenti e all'immagine Ikonos.

L'analisi ha permesso in alcuni casi di modificare i limiti dei corpi franosi e in altri di confermare l'estensione delle frane come cartografate in precedenza dall'utente. Le foto evidenziano i riscontri sul campo delle misure di spostamento rilevate sui PS.

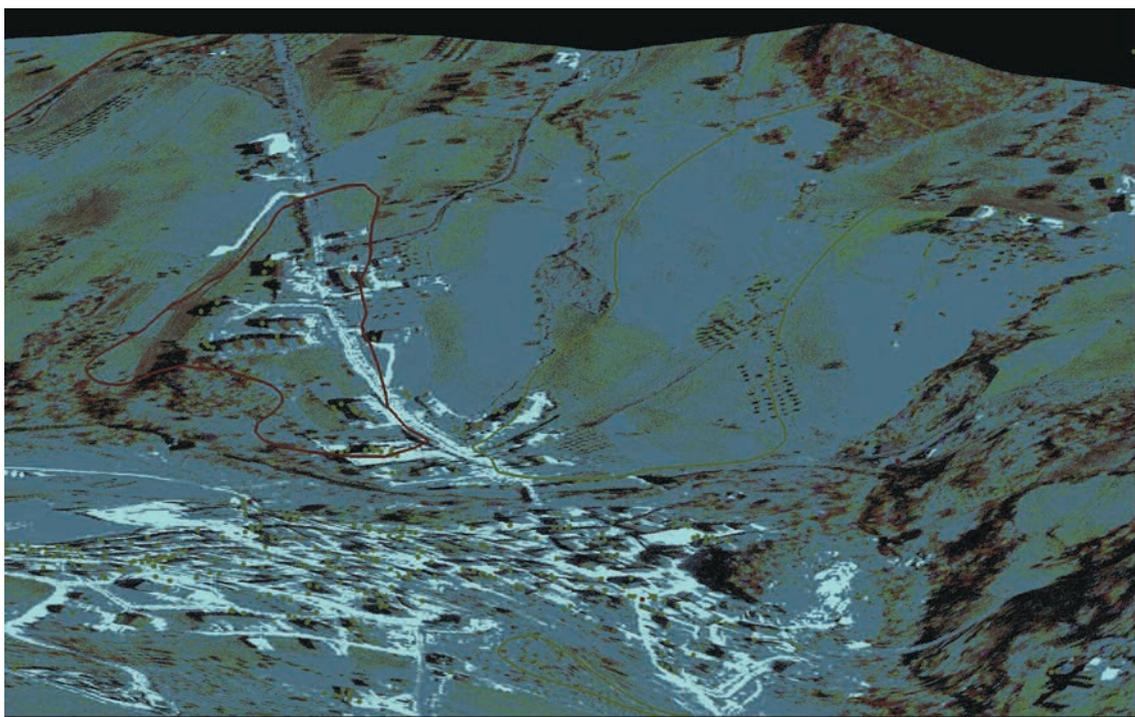


Figura 6. Visualizzazione in 3D, di una area in frana in provincia di Benevento con alcuni riscontri fotografici degli spostamenti del terreno rilevati sui PS.

Il caso del Bacino dell'Arno

Fra gli utenti del servizio figura l'autorità di Bacino dell'Arno che ha utilizzato l'output del progetto SLAM nell'ambito dell'aggiornamento del Piano di Bacino. Nella Figura 7 è possibile notare la distribuzione dei dati dell'analisi avanzata dei PS, rappresentati su foto aerea e proiettati sul DTM dell'area di Carbonile (FI).

È possibile notare i Permanent Scatterers e le frane classificate in base allo stato di attività. La distribuzione dei PS e la loro velocità hanno permesso di ripermire l'area in movimento.

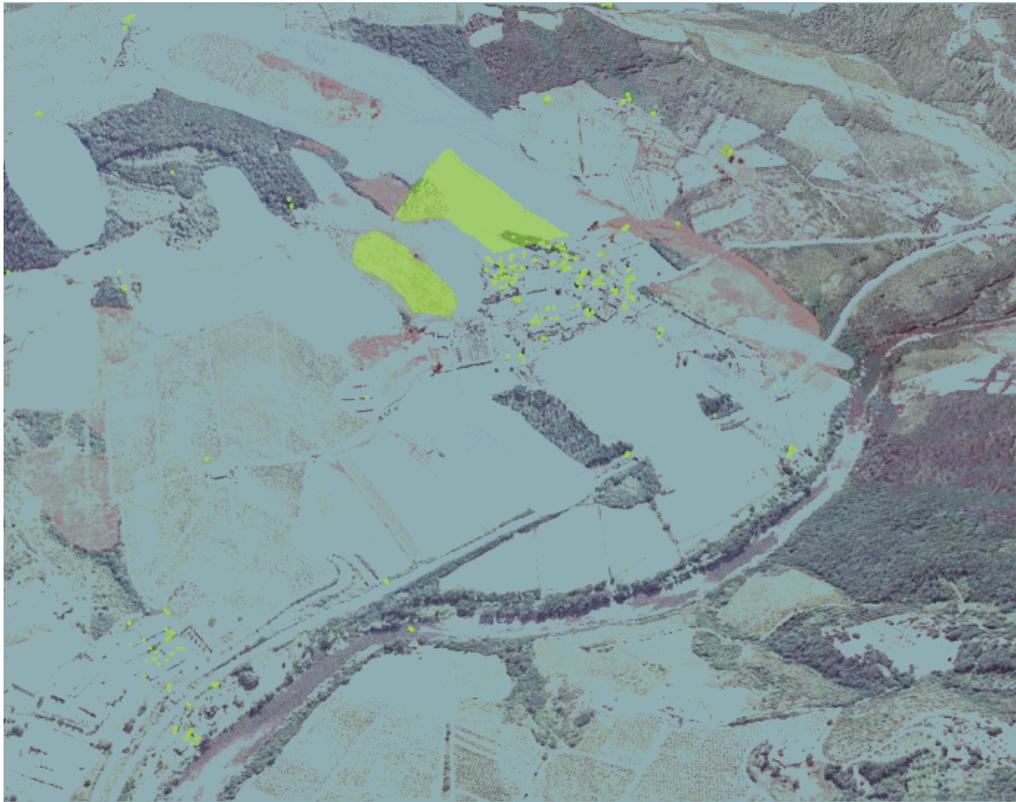


Figura 7. Visualizzazione 3D di una foto aerea drappeggiata sul DEM. Frane in rosso: attive; Frane in verde: stabilizzate; Frane in azzurro: quiescenti.

Tipo 3 - Mappatura della suscettibilità di frana

La Mappatura della suscettibilità di frana consente di definire la propensione del territorio al verificarsi di fenomeni franosi, in relazione a diverse combinazioni di fattori preparatori.

Inoltre, per le aree instabili, come definite nel prodotto di Mappatura gli eventi franosi, restituisce anche una previsione temporale della pericolosità di frana.

I dati in input:

- Prodotti SLAM sviluppati per la Mappatura e il Monitoraggio degli eventi franosi;
- Dati cartografici: litologia, pendenza, uso del suolo;
- Report tecnici e database (per es. AVI, SCAI).

La pericolosità di frana è definita come la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo in una data area (VARNES & IAEG, 1984). I fattori che contribuiscono alla pericolosità da frana possono essere suddivisi in due categorie: fattori preparatori e fattori innescanti. I fattori preparatori rendono il versante suscettibile alla rottura mantenendolo in condizioni di stabilità precaria e sono ad esempio: geologia, uso del suolo, quota, gradiente morfologico e curvatura del versante. I fattori di innesco sono quelli che

portano il versante in condizioni instabili attivando così il fenomeno franoso in un'area con una determinata suscettibilità e possono essere: precipitazioni, eruzioni vulcaniche, scosse sismiche, variazioni del livello di corsi d'acqua, scioglimento delle nevi e attività antropica. L'analisi dei fattori preparatori permette la previsione spaziale della pericolosità o "suscettibilità", mentre quella dei fattori di innesco la previsione temporale. Molto spesso, a causa della difficoltà di valutare la probabilità temporale di occorrenza di un fenomeno franoso, la valutazione della pericolosità da frana corrisponde alla produzione di carte di suscettibilità alla franosità che mostrano la propensione del territorio al verificarsi di fenomeni franosi in relazione a diverse combinazioni di fattori preparatori. Questo è particolarmente vero nelle valutazioni a scala di bacino che coinvolgono aree vaste nelle quali il numero di fenomeni e la grande variabilità dei parametri in gioco non consentono un'analisi dettagliata alla scala del versante. La valutazione della pericolosità all'interno del progetto SLAM è stata valutata in due passaggi successivi. Utilizzando i fattori predisponenti e la carta inventario ed analizzandoli mediante un'analisi con le reti neurali è stata valutata la previsione spaziale della pericolosità di frana. L'integrazione della carta inventario contenente informazioni sullo stato di attività dei fenomeni franosi, in parte desunta dall'aggiornamento tramite l'utilizzo dei PS, con la carta di suscettibilità prima creata, ha poi permesso di sovrapporre alla previsione spaziale la distribuzione delle aree in frana, ottenendo su queste una valutazione della previsione temporale della pericolosità.

L'analisi può essere illustrata percorrendo fasi successive di lavoro:

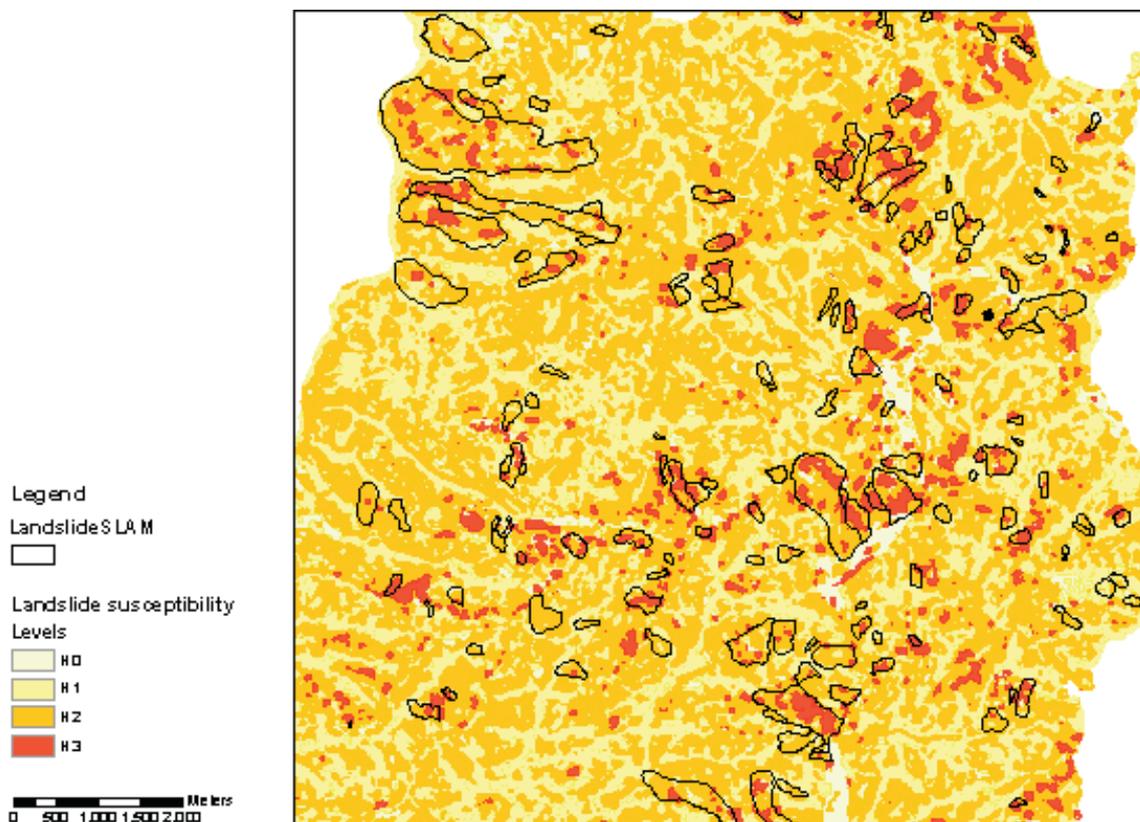
1. Definizione di unità fisiografiche individuate considerando diversi fattori quali litologia, pendenza, uso del suolo, etc.
2. **Previsione spaziale.** Costruzione della carta di suscettibilità da frana. Individuazione di aree a differente predisposizione al dissesto grazie ad un'analisi statistica a rete neurale artificiale (A.N.N.) delle unità fisiografiche individuate nella fase precedente.
3. **Previsione temporale.** Costruzione della carta di pericolosità da frana. In quest'ultima fase di lavoro viene preso in considerazione anche il fattore temporale: l'analisi integra i dati di monitoraggio resi disponibili dal prodotto di Monitoraggio degli eventi franosi, le informazioni storiche dei database AVI, SCAI ed IFFI e lo stato di attività come riportato nel prodotto di Mappatura degli eventi franosi.

Il caso del Bacino dell'Arno

La Tabella 1 mostra la scala di pericolosità delle frane in base al tempo di ritorno, utilizzata all'interno del progetto SLAM. Per il Bacino dell'Arno, le informazioni sulla ricorrenza dei fenomeni franosi mappati nella carta inventario sono state

ottenute da diverse fonti, comprendenti data-base locali raccolti dai singoli comuni o da altri enti pubblici e dall'Autorità di Bacino del F. Arno, i dati raccolti nell'ambito dei progetti AVI (Aree Vulnerate Italiane) e SCAI (Studio dei Centri Abitati Instabili) del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche. In aggiunta le informazioni sullo stato di attività, per le frane caratterizzate dalla presenza di PS, sono state desunte anche dalla velocità media degli scatteratori presenti all'interno del corpo di frana, calcolata su due intervalli temporali: 1992-2002 e 1999-2002. Queste due serie di dati sono servite per discriminare tra frane attive, quiescenti ed inattive. In funzione di questi dati è stata associato un tempo di ritorno e quindi una probabilità di occorrenza annuale per ognuna delle classi di pericolosità, come indicato nella tabella riportata di seguito.

Il tempo di ritorno è stato valutato pari ad 1 anno per la classe a più elevata pericolosità (H4), comprendendo questa classe solo frane attive. Per la classe H3 è stato scelto il valore di 10 anni, essendo questa classe caratterizzata dalla presenza di frane quiescenti (mosse quindi entro gli ultimi 10 anni), inattive ed aree con un'elevata incidenza di fattori predisponenti l'occorrenza di fenomeni franosi. Per le ultime due classi, a pericolosità media e bassa, sono stati selezionati tempi di ritorno facendo riferimento a quelli più comunemente riportati in letteratura. Nella Figura 8 è riportata una porzione della carta di suscettibilità prodotta per il bacino del Fiume Arno in sovrapposizione alla Mappatura degli eventi franosi.



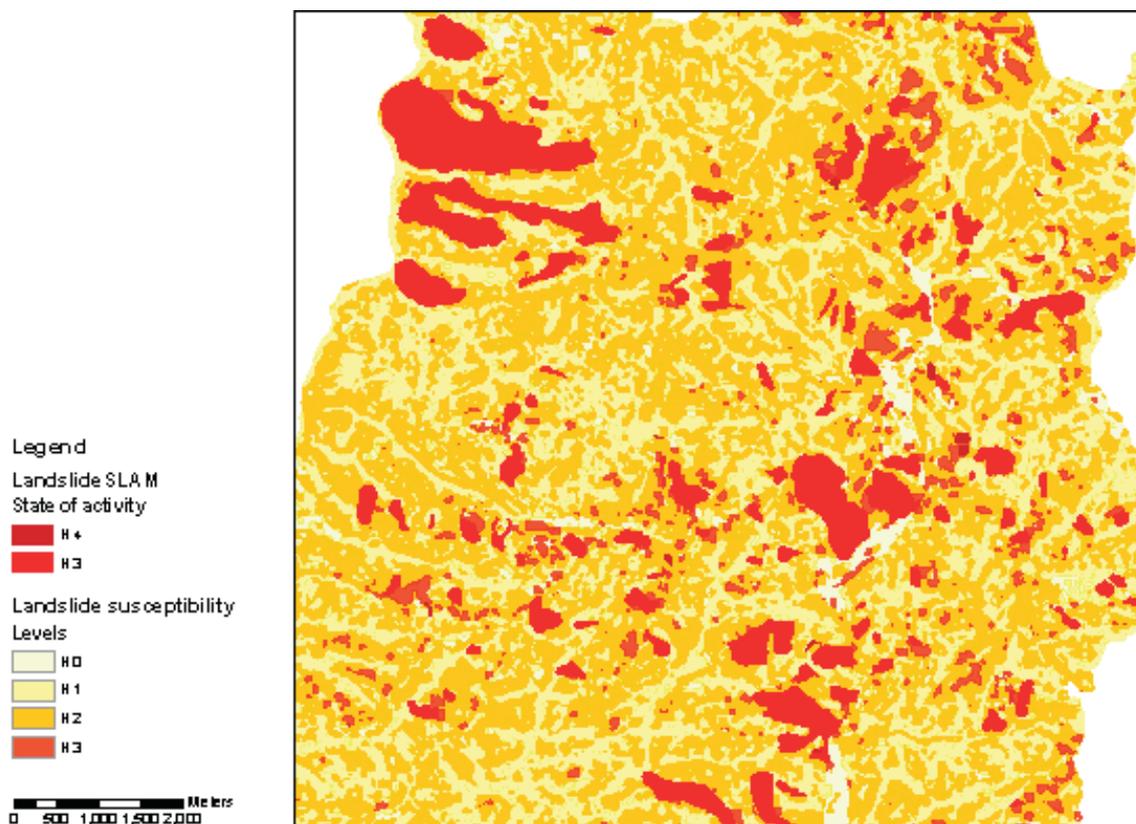


Figura 8. Carta inventario delle frane sovrapposta alla carta di suscettibilità (pagina precedente) e carta di pericolosità finale (sopra).

| Pericolosità | T (anni) | P (annuale) |
|-------------------------|----------|-------------|
| H4-ESTREMAMENTE ELEVATA | 1 | 1 |
| H3-ELEVATA | 10 | 0.1 |
| H2-MEDIA | 50 | 0.02 |
| H1-BASSA | 1000 | 0.001 |
| H0-NULLA | - | - |

Tabella 1. Scala di pericolosità delle frane in base al tempo di ritorno utilizzata all'interno del progetto SLAM.

L'integrazione in ambiente GIS

I livelli informativi prodotti dal servizio SLAM sono stati prodotti secondo un formato perfettamente integrabile nell'ambiente GIS dell'utente.

La mole di informazioni contenuta nei prodotti SLAM può essere facilmente gestita con l'utilizzo del "Tool di integrazione GIS" fornito dallo stesso servizio.

In primo luogo, il Tool consente di tematizzare il livello informativo dei diffusori permanenti (PS) sia in relazione alle velocità di spostamento registrate, sia rispetto ai valori di coerenza di ciascun punto. In questo modo, la visualizzazione dei punti di misura risulta molto efficace in quanto facilita l'identificazione delle aree contraddistinte da maggiore o minore stabilità.

Inoltre, il Tool consente di interrogare il database per individuare, ad esempio, le aree dove si registrano movimenti più intensi in un determinato arco temporale.

Un ulteriore vantaggio è offerto dalla possibilità d'incrociare rapidamente le informazioni contenute nei diversi livelli informativi così da individuare l'entità degli spostamenti registrati dai punti di misura in relazione alle classi di pendenza, o di esposizione dei versanti, o ancora in relazione alla diversa copertura del suolo.

Infine, è possibile visualizzare in ambiente GIS i grafici delle misure dei PS registrate in funzione del tempo per tutto il periodo di osservazione. I grafici restituiscono l'andamento dei valori di spostamento millimetrico registrati con frequenza mensile per ogni singolo punto o anche per un insieme di punti con comportamento simile.

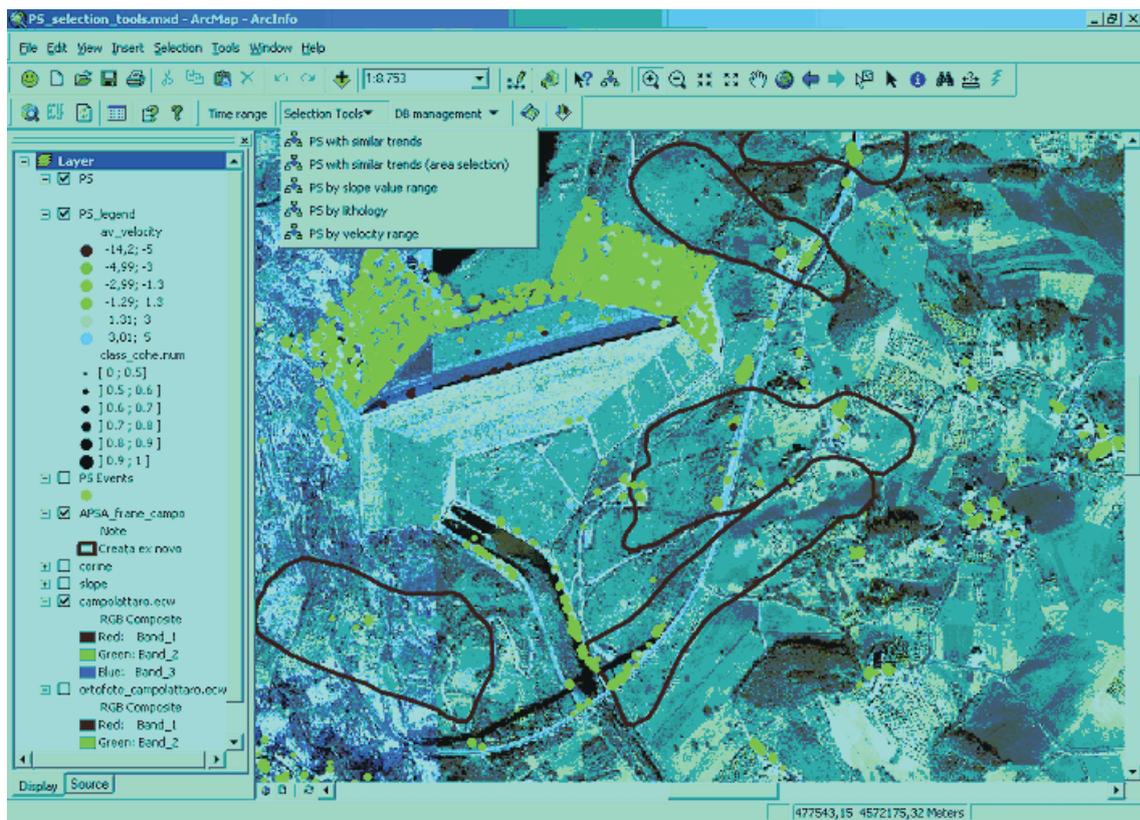


Figura 9. Overlaying in ArcGIS® dei diversi livelli tematici prodotti dal servizio SLAM. Sono illustrate le diverse funzionalità disponibili con il GIS integration tool.



Conclusioni

Il progetto SLAM ha messo in evidenza attraverso l'utilizzo integrato di tecnologie satellitari e metodologie tradizionali come sia possibile implementare in modo efficace un'analisi spaziale degli eventi franosi attraverso l'osservazione delle aree soggette a movimenti lenti su scala regionale e locale.

Il processo d'integrazione delle fonti informative, la loro interpretazione applicativa e l'organizzazione dei risultati in un ambiente gis-ready è quello che consente la generazione di nuova informazione direttamente fruibile dall'utente. Il feedback positivo dell'utenza raccolto nel corso del progetto, rafforza la convinzione che i prodotti SLAM possano rappresentare uno strumento innovativo per l'identificazione delle aree instabili su larga scala, facilmente fruibile dalle pubbliche amministrazioni e dalle autorità della protezione civile.

SLAM, infatti, rappresenta per le autorità preposte alla gestione del dissesto idrogeologico, la possibilità di costruire una memoria storica dell'area di interesse utilizzabile per studi futuri e per una più consapevole pianificazione del territorio.



Bibliografia

ALEOTTI P., CHUWHDURY R. (1999)- *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bull. Eng. Geol. Env., 58, 21-44.

BISHOP, C. (1995)-. *Neural Networks for pattern recognition*. Oxford University Press.

BAEZA C., COROMINAS J. (1996)- Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. Proc. VII Int. Symp. On Landslides, Trondheim, Giugno 1996, 1: 147-152.

BERNKNOFF RL, CAMPBELL R.H., BROOKSHIRE D.S., SHAPIRO CD (1988)- A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati Ohio, with application for economical evaluation. Bull. Of the Assoc. Engin. Geologists, 25, 39-56.

BIANCHI, F. & CATANI, F., 2002. Landscape dynamics risk management in Northern Apennines (ITALY). In: C.A. Brebbia & P. Zannetti (Editors), Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies. WIT Press, Southampton, chap.1, 319-328.

CARRARA A. (1983)-*Multivariate methods for landslide hazard evaluation*. Mathematical geology, 15, 403-426.

CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V., REICHENBACK P. (1991)-*GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth surface processes and landforms, 16, 427-445.

CARRARA A., GUZZETTI F., CARDINALI M. (1992)- *Uncertainty in assessment landslide hazard and risk*. ITC Journal, 1992-2, 172-183.

CHUNG, CH., F., FABBRI, A.G., VAN WESTERN, C.J. (1995). *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. In: Carrara A., Guzzetti F., (eds): Geographical information System in Assessing Natural Hazards, Kluwer Pub., Dordrecht, The Netherlands, 107-142.

CROZIER M. J. (1986)- *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. Croom Helm, London, pp. 252.

CUMER, A. (1994) - *Il progetto CORINE Land Cover in Italia: un modello da seguire* Documenti del Territorio Anno VIII N.28/29 giugno/dicembre 1994.

DEL PRETE M., GIACCARI E. & TRISORIO-LIUZZI G. (1992) - Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata. *Pubb. n.841 - GNDCl.* 84pp.

ERMINI L, CATANI F., CASAGLI N. (2005)- *Artificial neural networks applied to landslide hazard assessment*. *Geomorphology*.

FELL R. (1994) - Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 261-272.

FERNANDEZ-STEEGER T.M., ROHN J., CZURDA K. (2002)- *Identification of landslide area with neural nets for hazard analysis*. In Rybáfi, j. Stemnerk, j. Wagner, P. *Landslides, Proc. Of the I ECL, Prague, Cz Rep., Giugno 2002, Balkema, Netherland, 163-168.*

HEYMANN Y., STEENMANS C., CROISILLE G. & BOSSARD M. (1994) - *CORINE land cover project - Technical guide*. European Commission, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, ECSC-EEC-EAEC, Brussels- Luxembourg, 136 pp.

JADE S., SARKAR S.(1993)- *Statistical model for slope stability classification*. *Engineering geology*, 36, 91-98.

MAYORAZ F., CORNU T., VUILLET L. (1996)- *Using neural networks to predict slope movements*. *Proc. VII Int. Symp. Landslides, Tronfheim, Giugno 1996, 1:295-300.*

SOETERS R., VAN WESTEN C.J. (1996)-*Slope stability: recognition, analysis and zonation*. In Turner AK, Shuster RL (eds)" *Landslides: investigation and mitigation*". *Transportation research board- National research council, Special report 247, pp. 129-177.*

VARNES D.J. & IAEG Commission on landslides(1984)- *Landslides hazard zonation- a review of principles and practice*. UNESCO Paris. 63pp.

WIECZOREK G. F. (1996)- *Landslides triggering mechanisms*. In: Turner A. K. & Schuster R.L. (eds), „ *Landslides: Investigation and Mitigation*”, *Transportation Research Board, National Academy of Sciences, USA, Special Report 247, chapter 4, 76-90.*

ZEZERE J.L. (2002)- *Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal)*. *Natural hazard and earth system sciences*, 2, 78-82.