

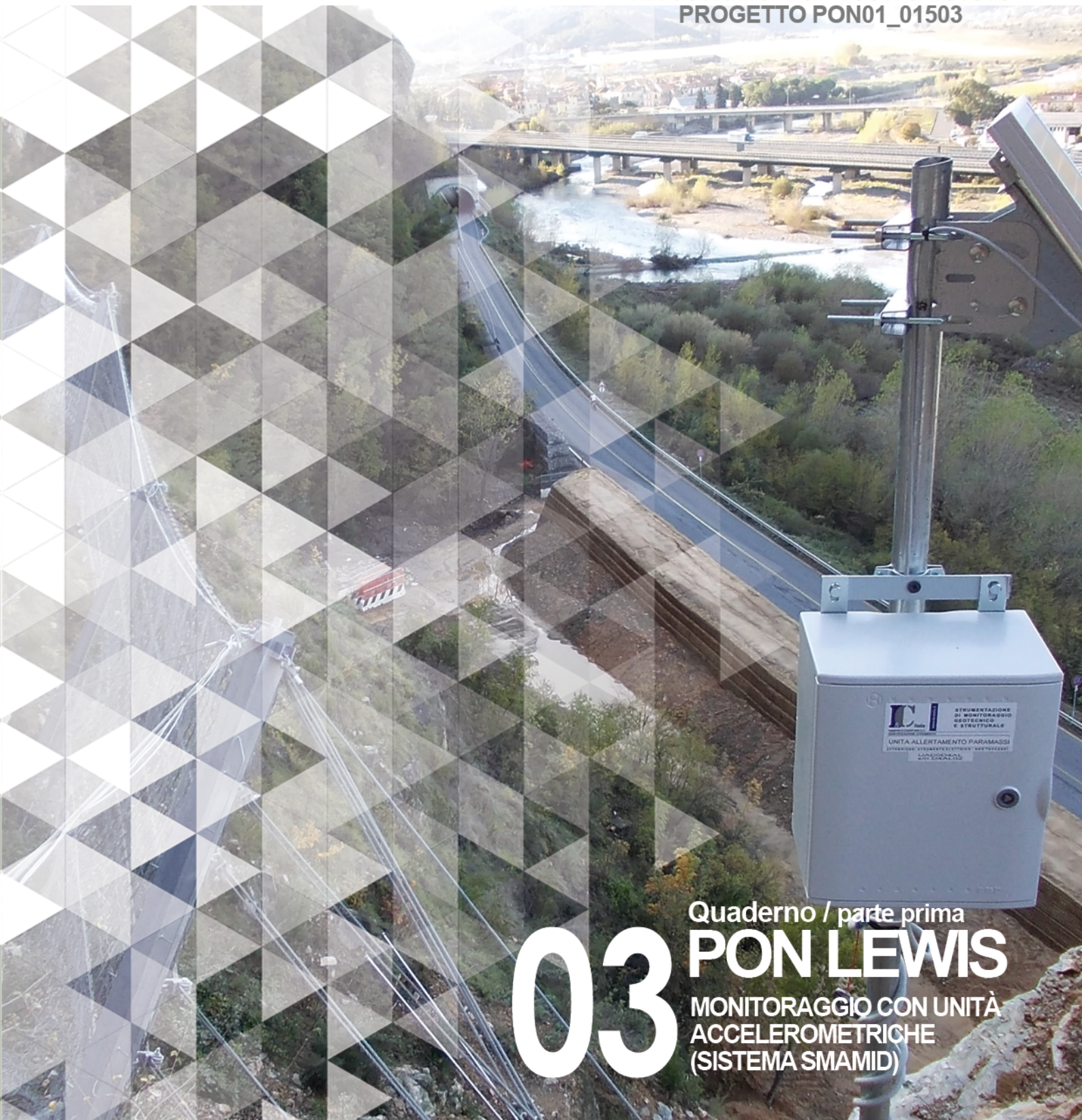
SISTEMI INTEGRATI PER IL MONITORAGGIO, L'EARLY WARNING
E LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO
LUNGO LE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE



UNIONE EUROPEA
Fondo europeo di sviluppo regionale



investiamo nel vostro futuro
PROGETTO PON01_01503



Quaderno / parte prima
03 PON LEWIS
MONITORAGGIO CON UNITÀ
ACCELEROMETRICHE
(SISTEMA SMAMID)





autostrade//Tech



A cura di Giovanni Mannara | **DELIVERABLE WP 2.2**
Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
/ Parte prima

Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione"

Premessa

Frane e inondazioni sono un problema di grande rilevanza nel nostro Paese. Negli ultimi anni le vittime e i danni dei disastri idrogeologici hanno raggiunto livelli inaccettabili e impongono un grande e immediato impegno della comunità nazionale per cercare di mitigare il livello di rischio, utilizzando strategie articolate ed efficaci capaci di integrare, in una visione organica, interventi strutturali e non strutturali.

Su questi temi l'Università della Calabria è impegnata da anni in attività di studio e di ricerca di rilevanza nazionale e internazionale e nella diffusione e promozione della cultura della previsione e prevenzione del rischio idrogeologico. Nel 2011 insieme ad altri partner, ha promosso un progetto di ricerca triennale, "Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione", finalizzato allo sviluppo di un sistema complesso e articolato di preannuncio delle frane da impiegare per le fasi di previsione/prevenzione del rischio idrogeologico.

Il Progetto, indicato con l'acronimo LEWIS (Landslide Early Warning Integrated System), è stato svolto, nel periodo 2012-2014, nel quadro del Programma Operativo Nazionale 2007-13 "Ricerca e Competitività".

I risultati conseguiti sono descritti in questa collana di Quaderni PON LEWIS.

Il progetto è stato sviluppato dall'Università della Calabria e Autostrade Tech S.p.A. insieme ai partner industriali Strago e TDGroup, alle Università di Catania, di Reggio Calabria e di Firenze e al CINID (Consorzio Interuniversitario per l'Idrologia). Per l'Ateneo calabrese hanno partecipato diversi laboratori e gruppi di ricerca: CAMILab (con funzione di coordinamento), μ Wave, Geomatica, Nems, Geotecnica, Dipartimento di matematica.

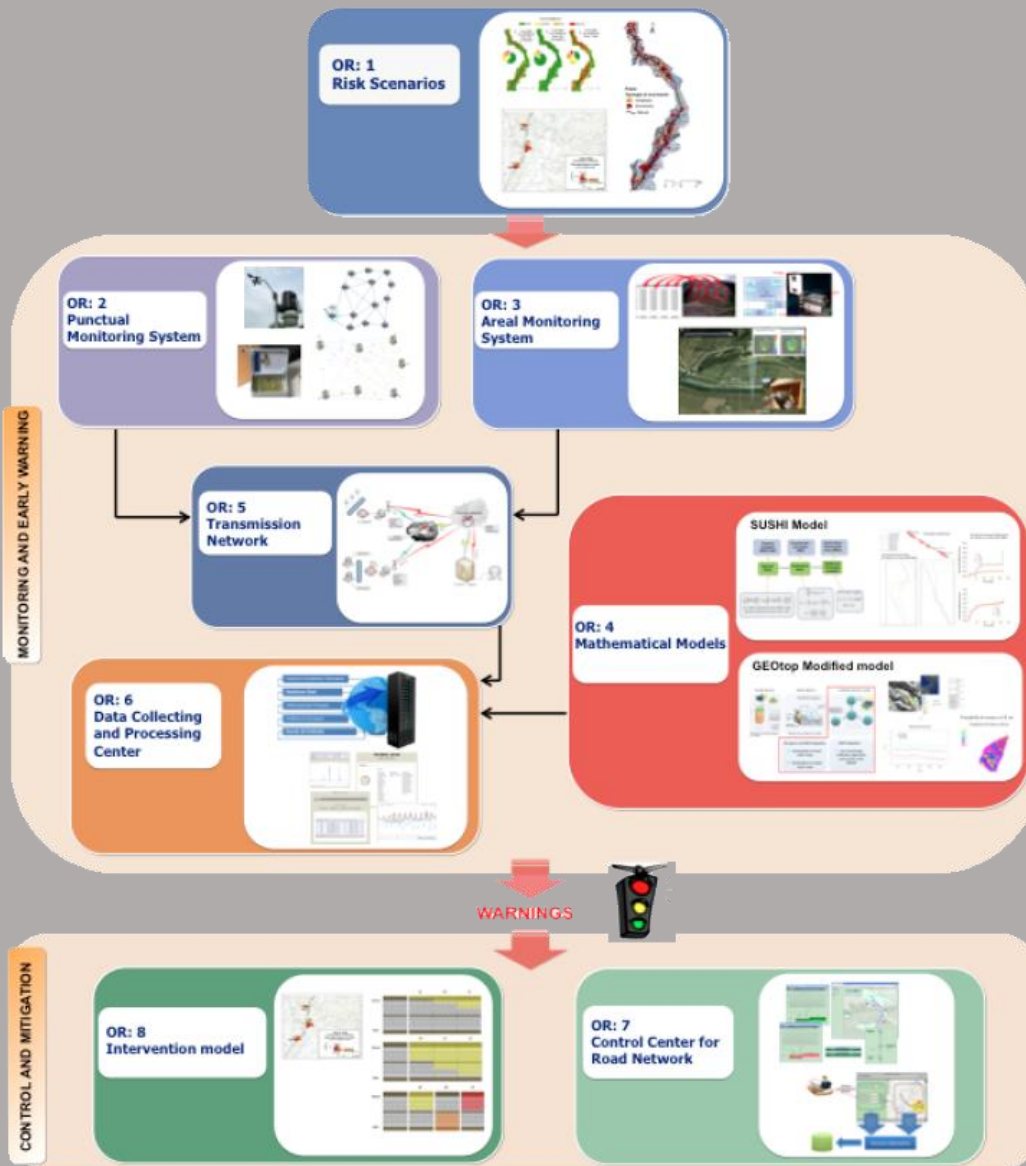


Figura 1 - Articolazione del sistema integrato di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi

Il progetto è finalizzato allo sviluppo di un sistema di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi che possono interessare le grandi vie di comunicazione e all'identificazione dei conseguenti interventi non strutturali di mitigazione.

Il sistema è articolato in due sottosistemi (fig. 1):

- ✓ Monitoraggio e preannuncio,
- ✓ Controllo e mitigazione,

che richiedono la preventiva individuazione degli scenari di rischio ossia dei danni che l'eventuale attivazione di una frana può produrre sugli elementi a rischio presenti (infrastruttura viaria, autoveicoli, persone). La procedura originale sviluppata nell'ambito del progetto prevede l'identificazione, lungo il tratto autostradale di interesse, delle aree soggette a movimenti franosi e la conseguente definizione dei relativi scenari di evento e di rischio.

Il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* è formato da diverse componenti: rete di monitoraggio "puntuale" che comprende sensori che misurano localmente l'inizio degli spostamenti superficiali o profondi; rete di monitoraggio "areale" che include sensori che controllano a distanza il fenomeno franoso con tecniche radar; modelli matematici di simulazione dell'innesco e della propagazione dei movimenti franosi. Nel progetto LEWIS sono state sviluppate numerose componenti innovative e sono state modificate e migliorate altre componenti già esistenti. In particolare tra i sensori puntuali sono stati sviluppati i sistemi SMAMID e POIS; tra quelli areali sono stati realizzati un radar in banda L, uno scatterometro, un interferometro; tra i modelli si sono sviluppati e/o migliorati: GEOtop, SUSHI, SCIDDICA.

La raccolta dei dati misurati dai sensori è affidata ad un unico sistema di trasmissione dati che trasmette anche le informazioni necessarie per il funzionamento dei modelli. Il sottosistema è completato da un Centro di acquisizione ed elaborazione dei dati (CAED) che, sulla base dei dati misurati dai sensori e delle indicazioni dei modelli, valuta la situazione di pericolo lungo il tronco autostradale emettendo i relativi livelli di criticità.

I livelli di criticità emessi dal CAED sono l'elemento di collegamento tra il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* e il sottosistema *Controllo e mitigazione*. Gli avvisi di criticità sono acquisiti dal Centro di comando e controllo del traffico (CCCT) che, sulla base di un modello di intervento predefinito, attiva le procedure standardizzate per la mitigazione del rischio, che vanno dalla

sorveglianza diretta del tratto di interesse da parte di squadre tecniche all'interruzione del traffico su entrambe le direzioni di marcia.

Il progetto prevede anche lo sviluppo di attività sperimentali su tre tronchi autostradali lungo la A3, la A16 e la A18, nonché l'erogazione di un Master di secondo livello denominato ESPRI (ESperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico).

Il progetto di ricerca è stato organizzato in Obiettivi Realizzativi (OR), ciascuno dei quali suddiviso in Work Package (WP), a loro volta articolati in Attività Elementari (AE). In totale erano previste 11 OR, 47 WP e 243 AE. In particolare le OR 1-8 riguardano la ricerca e si articolano in 26 WP e 139 AE. Le OR 9-11 sono dedicate a sperimentazione, governance e trasferimento tecnologico, integrazione e aggiornamento dell'attività di ricerca nella fase di Sviluppo Sperimentale e si articolano complessivamente in 21 WP e 104 AE.

I Quaderni che compongono questa collana sono stati costruiti con riferimento ai singoli WP, per la parte che riguarda la ricerca, e quindi ogni Quaderno contiene la descrizione dei risultati conseguiti nel WP, articolata in base alle AE previste.

Sono, inoltre, previsti altri tre Quaderni:

Quaderno 0 che contiene una descrizione di sintesi, in inglese, dei risultati conseguiti nell'ambito del progetto.

Quaderno 28 che contiene l'informazione relativa alle attività di divulgazione dei risultati scientifici.

Quaderno 29 che contiene la descrizione dei risultati conseguiti con l'attività formativa.

Il Quadro editoriale complessivo è riportato in tabella 1:

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
0	-	-	Research outcomes
01 Parte prima	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
01 Parte seconda	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
02	2	2.1	Monitoraggio idrogeologico
03 Parte prima	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
03 Parte seconda	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
04	2	2.3	Circuiti integrati a bassa potenza per sistemi di monitoraggio con unità accelerometriche
05	2	2.4	Monitoraggio con sensori puntuali di posizione e inclinazione (Sistema POIS)
06	3	3.1	Sviluppo di uno scatterometro a risoluzione variabile
07	3	3.2	Elettronica di bordo dello scatterometro ed inclinazione
08	3	3.3	Sviluppo di un radar in banda L
09	3	3.4	Tecniche di analisi e sintesi di segnali radar per la simulazione accurata di scenari complessi
10	3	3.5	Elettronica di bordo del radar in banda L

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
11	3	3.6	Sistemi interferometrici radar ad apertura sintetica basati a terra
12	4	4.1	Modello areale per il preannuncio delle frane da innesco pluviale (Modello GEOtop)
13	4	4.2	Modelli completi di versante di tipo puntuale per il preannuncio di movimenti franosi (Modello SUSHI)
14	4	4.3	Modelli di propagazione delle frane tipo colate (Modello SCIDDICA)
15	5	5.1	Rete Wireless di Telecomunicazioni: sviluppo e scelta dei parametri di progetto
16	6	6.1	CAED. Acquisizione dati: architettura del sistema
17	6	6.2	CAED. Elaborazione dei dati
18	7	7.1	CCCT. Progettazione
19	7	7.2	CCCT. Interfaccia verso il centro di acquisizione ed elaborazione dati
20	7	7.3	CCCT. Interfaccia con altre centrali operative e canali di diffusione delle notizie
21	7	7.4	CCCT. Modulo per la presentazione e convalida delle allerte
22	7	7.5	CCCT. Modulo per la gestione delle informazioni di traffico
23	7	7.6	CCCT. Integrazioni con moduli speciali

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
24	8	8.1	Definizione del modello di intervento e predisposizione del Piano di Emergenza
25	8	8.2	CCCT. Gestione delivery allerte e attivazione squadre d'intervento
26	8	8.3	CCCT. Gestione percorsi alternativi
27	9	9.1 - 9.11	Sperimentazione
28	10	10.1 - 10.2	Piano di comunicazione e diffusione
29	-	-	Master ESPRI (Esperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico)

Tabella 1 - Quadro editoriale complessivo della collana di Quaderni PON LEWIS

31 dicembre 2014

Il Responsabile Scientifico del progetto PON LEWIS

Pasquale Versace

INDICE

1 Sommario

ATTIVITA' ELEMENTARE 2.2.1

5 **Progettazione e realizzazione di una versione ottimizzata del sistema SMAMID dal punto di vista hardware, firmware e software**

5	1. Valutazione di un sensore accelerometrico MEMS di caratteristiche superiori
5	1.1 Analisi comparata di sensori accelerometrici MEMS disponibili sul mercato
8	2. Ottimizzazione del sottosistema di comunicazione (hardware e firmware)
8	2.1 Test di comunicazione wireless di unità SMAMID
8	2.1.1 Fase Test A
11	2.1.2 Fase Test B
17	2.1.3 Fase Test C
29	3. Valutazione di componenti di memoria di massa (hardware) alternative
30	4. Ottimizzazione dei consumi
37	5. Sviluppo HW e test di verifica
40	6. Sviluppo SW di gestione e test di verifica
44	6.1 Definizione della logica di interpretazione dell'insieme dei dati
46	7. Indagini preliminari per le installazioni sui siti dimostratori

47 **Valutazione dell'applicabilità della metodologia e del sistema di monitoraggio SMAMID per lo studio e il monitoraggio dell'evoluzione dei fenomeni franosi**

47 **1. Tecniche di monitoraggio frane con particolare riferimento alle finalità di monitoraggio**

47 1.1 Le frane superficiali

52 1.1.1 Descrizione del metodo: l'approccio alla valutazione della pericolosità

54 1.1.2 Descrizione del metodo: il modello meccanico-idrologico

56 1.1.3 Il progetto

57 1.1.4 Il settore di indagine

59 1.1.5 Il processo in sintesi: dai dati di base all'allestimento cartografico

63 1.2 Il sistema SIA

78 1.3 Cenni sull'analisi del rischio frane

96 1.4 La suscettività di frana, un approccio statistico basato su reti neurali

105 1.5 Approccio deterministico

108 **2. Tecnologie di avanguardia nel monitoraggio frane**

108 2.1 Laser scanner. Cenni tecnici

116 2.2 Inclinometri MEMS dell'Università di Ferrara

136 2.3 Cenni tecnici all'interferometria

145 **3. Casi notevoli di monitoraggio frane**

145 3.1 ARPA Piemonte

145 3.1.1 Progetto INTERREG ALPS GPS QUAKENET

154 3.1.2 Gestione delle reti di controllo ARPA Piemonte

155 3.1.3 La RERCOMF

164 3.2 ARPA Lombardia

168	3.3 Provincia di Treviso
171	3.3.1 Carta della pericolosità da frana
176	3.3.2 Sintesi dei dati
187	3.3.3 Analisi propedeutica alla predisposizione di una cartografia di sintesi di attitudine alla franosità
192	3.3.4 Carta della sensibilità alla franosità
194	3.3.5 Indicazioni tecniche di indagine nelle aree sensibili
204	3.4 I casi di Serra di Buda e San Luca
204	3.4.1 Monitoraggio spostamenti Serra di Buda
210	3.4.2 Interferometria per Acri e San Luca
221	4. Definizione delle specifiche funzionali del sistema di monitoraggio frane
226	4.1 Identificazione differenze funzionali sistema inclinometrico SWAN-sistema ottico UNICAL
226	4.2 Definizione della tipologia di dati complementari a quelli inclinometrici utili allo scopo di monitoraggio dell'evoluzione
227	4.3 Sviluppo di un modello evolutivo del versante per il setting della configurazione del sistema di monitoraggio per il confronto numerico-sperimentale
228	4.4 Studio modello a automi cellulari SCIDDICA-SS3

Sommario

Nel presente report si illustrano le attività di ricerca svolte con l'obiettivo di sviluppare un sistema di misura inclinometrico nella forma di una Wireless Sensor Network (WSN) basata su tecnologia MEMS e denominata SWAN.

Si possono distinguere quattro ambiti, corrispondenti alle Attività Elementari, per ciascuno dei quali si sintetizzano obiettivi, attività, risultati e conclusioni:

AE 2.2.1. L'attività è finalizzata alla ottimizzazione prestazionale e al superamento di limiti prestazionali da un punto di vista tecnologico legati ai consumi e alla efficienza della trasmissione wireless, che limitavano la autonomia di funzionamento del sistema di misura accelerometrico preesistente all'avvio del progetto, denominato SMAMID, che costituisce il nodo intelligente della rete wireless SWAN. In quest'ottica sono state svolte attività di studio e di test in laboratorio sistematici e approfonditi relativi ai consumi e alla trasmissione wireless al fine di pervenire a una riprogettazione della unità SMAMID a partire dall'analisi dei componenti (sensore, memoria in primis) fino alla revisione firmware. È stata così progettata, realizzata e testata in laboratorio una nuova versione di SWAN in cui i tempi di autonomia di funzionamento sono raddoppiati rispetto alla versione preesistente. Detto sistema è passato attraverso un miglioramento di tutti i componenti del sistema, dal punto di vista hardware, firmware e software, al fine di superare i limiti della versione attuale ed elevarne il grado di prestazioni, fermo restando le finalità di monitoraggio, ovvero la identificazione e segnalazione di condizioni di allerta imminente.

AE 2.2.2. Anche a valle delle attività di studio ad ampio spettro dello stato dell'arte del monitoraggio di rilievi franosi, si è svolto un ventaglio di attività rivolte all'approfondimento del significato della misura di spostamento superficial nel monitoraggio dei rilievi franosi. In particolare le prestazioni misuristiche del sistema di monitoraggio (grandezza misurata, profondità del punto misura, specifiche del sensore, numero distribuzione di densità dei punti misura, modalità /finalità allarme, integrazione con dati parametri di innesco) vengono ricondotte a quelle funzionali strettamente connesse sia alle caratteristiche del sito (estensione e posizione, profondità di frana, cinematica, presenza e tipo di vegetazione, direzionalità della frana, distribuzione spaziale, parametri di innesco, livello e tipo di antropizzazione) che alle finalità del monitoraggio (studio, allarme/allerta, messa in sicurezza, etc...). La verifica dell'applicabilità della

metodologia e del sistema di monitoraggio SWAN, sviluppato in origine per l'allertamento in condizioni di pericolo imminente, allo studio e al monitoraggio dell'evoluzione dei fenomeni franosi passa attraverso non solo lo studio critico dello state dell'arte suddetto, ma anche attraverso un'interazione tra le competenze misuristiche attinenti il monitoraggio e quelle geologiche riferite ai fenomeni franosi, ivi incluse le tecniche di modellazione di versanti in frana. Nell'intento, infatti, di delineare un modello interpretativo dei dati sperimentali, in particolare nella determinazione di livelli di soglia di allarme e/o di preallarme dei dati inclinometrici, e di avere indicazioni su aspetti relativi al pattern di installazione, quali:

- numero di nodi sensori;
- distribuzione spaziale;
- densità minima;
- identificazione di zone a maggiore densità di punti misura;
- identificazione di direzioni privilegiate di misura dell'inclinazione.

Appare utile una conoscenza delle risultanze della modellazione (OR4) e/o dell'analisi di scenario (OR1). Come già per la definizione delle soglie di allerta/allarme, si è considerato che il dialogo tra i dati sperimentali di monitoraggio degli spostamenti superficiali e il modello puntuale potrà avere luogo in sede di sperimentazione dove sarà possibile anche valutare, sulla base delle evidenze sperimentali, in che misura, da un lato, i dati sperimentali sugli spostamenti superficiali possono supportare gli algoritmi, e quindi i risultati della modellazione, e secondo quali schemi i dati della modellazione possono guidare la installazione in campo in termini di pattern di distribuzione spaziale dei punti misura, dall'altro.

Infine, ancora dalla analisi dello stato dell'arte, emerge che nei fenomeni franosi a coltre superficiale, tipicamente meteo indotti, la combinazione di una misura tensiometrica con quella inclinometrica appare come un possibile improvement funzionale del sistema (per quanto al di fuori degli obiettivi del presente progetto).

AE 2.2.3. E' stata condotta una collaborazione col DEIS (UniCal) sull'indagine per possibili soluzioni architetture elettroniche alternative di SMAMID, attraverso una analisi comparativa di varie opzioni (microcontrollore più evoluto, ASIC, FPGA), che ha tenuto conto anche delle esigenze funzionali legate ad applicazioni specifiche cui il sistema accelerometrico è destinato. Il risultato ottenuto è stato un prototipo di unità FPGA realizzato dal DEIS secondo le

indicazioni STRAGO e testata in laboratorio con ottimi riscontri. Detto prototipo risponde alle esigenze di evoluzione architeturale dal punto di vista elettronico di SMAMID nell'ottica di:

- sviluppare una unità master dall'elevata capacità computazionale in grado di semplificare lo schema del sistema attuale fondendo la master e la unità centrale di elaborazione (PC host) in un solo sistema di gestione della rete e computazionale per i dati raccolti dalle unità di misura SMAMID;
- migliorare l'impianto hardware generale anche della singola unità SMAMID;
- incrementare le capacità computazionali della singola unità di misura SMAMID per future applicazioni, anche differenti dal monitoraggio frane, in cui il carico computazionale viene distribuito tra le n unità di una rete di misura wireless piuttosto che su un PC centrale;
- Ciò contribuisce non solo a limitare il carico computazionale dell'unità di elaborazione centrale che potrebbe, in taluni casi (numero di unità di misura molto elevato, algoritmi impegnativi, etc..) divenire molto oneroso, ma anche a snellire il carico di trasmissione dati dalla unità di misura alla unità centrale consentendo di inviare piuttosto che pesanti dati grezzi (profili accelerometrici, ad es, per lunghi periodi di tempo), dati elaborati di sintesi molto più "leggeri".

AE2.2.4. L'attività, inserita in corso d'opera appurata la necessità di integrazione di SWAN all'interno del sistema LEW (Figura 1), è stata orientata allo studio per la progettazione e realizzazione del software di comunicazione dati dal sito (laboratorio/campo) al CAED tramite middleware del nodo concentratore (OR5) secondo la logica per cui il sistema acquisisce, con cadenza e durata configurabili in funzione dello stato del rilievo da remoto anche dal CAED, ed invia un file di dati contenenti informazioni di sintesi circa lo stato inclinometrico di ciascun punto misura e lo stato del rilievo franoso secondo dei criteri modificabili da remoto (oltre che dati ambientali circa la temperatura e lo stato di carica della singola unità).

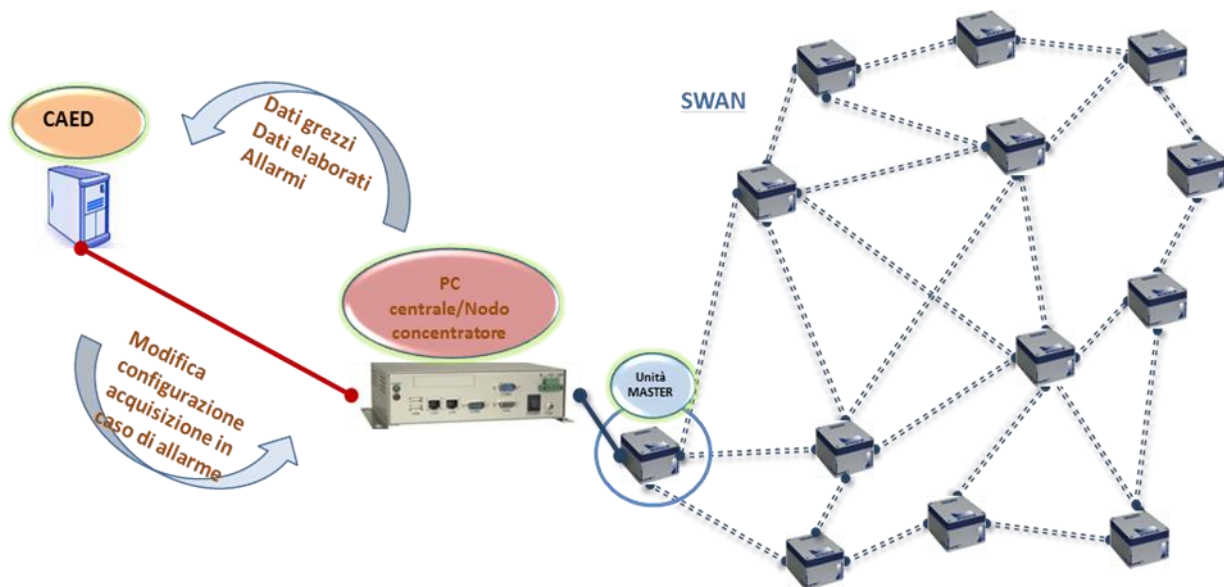


Figura 1. Schema generale del sistema SWAN in comunicazione col CAED tramite nodo concentratore.

Progettazione e realizzazione di una versione ottimizzata del sistema SMAMID dal punto di vista hardware, firmware e software

Preliminarmente all'avvio delle specifiche attività, è stata svolta un'attività di pianificazione ragionata delle stesse, in funzione di un'analisi critica dell'attuale versione di SMAMID, individuando le seguenti aree di intervento:

- Ottimizzazione hardware in termini di efficienza energetica, disturbi elettromagnetici, interfaccia utente;
- Ottimizzazione codice firmware;
- Valutazione di componenti di memoria di massa (hardware) alternative;
- Ottimizzazione del sottosistema di comunicazione (hardware e firmware);
- Valutazione di un sensore accelerometrico MEMS di caratteristiche superiori;
- Ottimizzazione dei consumi.

1. VALUTAZIONE DI UN SENSORE ACCELEROMETRICO MEMS DI CARATTERISTICHE SUPERIORI

> 1.1 Analisi comparata di sensori accelerometrici MEMS disponibili sul mercato

Sono stati individuati una serie di sensori accelerometrici MEMS e sono state messe a confronto alcune delle caratteristiche prestazionali al fine di individuare il dispositivo ottimale.

Ciò che si può dedurre dai primi risultati riportati schematicamente nella tabella 1 è che, rispetto al dispositivo attualmente in uso, LIS3LV02DQ della STMicroelectronics, evidenziato in giallo in tabella 1, esistono margini di miglioramento in termini di riduzione dei consumi e anche di sensibilità e rumore (parametro che poi determina anche il limite della risoluzione). Ciò su cui bisogna porre l'accento è il fatto che di tutti i dispositivi in tabella 1 solo il modello MPU6000/6050 della InvenSense presenta l'ingresso per clock esterno, analogamente al dispositivo in uso. Tale elemento risulta irrinunciabile per talune

applicazioni in cui è richiesto un alto grado di sincronizzazione dei nodi di rete, dal momento che consente di adoperare un clock esterno molto più preciso di quelli di cui sono equipaggiati questo tipo di dispositivi al loro interno, i quali inducono oscillazioni sui valori effettivi delle frequenze di campionamento dell'ordine finanche del 10%.

Si deve registrare, per quanto concerne il sensore accelerometrico a bordo SMAMID che l'attuale sensore LIS3LV02DQ, oggetto di analisi comparata, esce dalla produzione STM e viene sostituito dal sensore equivalente LIS3LV02DL (<http://www.st.com/internet/analog/product/127514.jsp>).

Modello	Produttore	#assi	Range	Sensibilità	Rumore ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	Output	Alimentazione (V)	Corrente assorbita
ADXL346	Analog Devices	3	$\pm 2\text{g}$ $\pm 4\text{g}$ $\pm 8\text{g}$ $\pm 16\text{g}$	256 LSB/g@2g 128 LSB/g@4g 64 LSB/g@8g	1.1LSBrms @x, y axes 1.5LSBrms @z axes	SPI/I ² C	1.7 - 2.75	23 μA @2.6 V full 0.2 μA @2.6 V standby
ADXL312	Analog Devices	3	$\pm 1.5\text{g}$ $\pm 3\text{g}$ $\pm 6\text{g}$ $\pm 12\text{g}$	345 LSB/g @1.5g 172 LSB/g @3g 86 LSB/g @6g 43 LSB/g @12g	470	SPI/I ² C	2.0 - 3.6	57 μA @3.3 V full 0.1 μA @3.3 V standby
LIS3LV02DQ	ST	3	$\pm 2\text{g}$ $\pm 6\text{g}$	1024 LSB/g@ $\pm 2\text{g}$ 340 LSB/g@ $\pm 6\text{g}$	300	SPI/I ² C	2,16 - 3,6	600 μA @ 2.5 V 1 μA @ 2.5 V power-down mode
LIS302D LH	ST	3	$\pm 2\text{g}$ $\pm 4\text{g}$ $\pm 8\text{g}$	4 mg/digit	218	SPI/I ² C	2.16 - 3.6	250 μA @ 2.5 V normal mode 10 μA @ 2.5 V low-power mode 1 μA @ 2.5 V power-down mode
KXR94-2050	Kionix	3	$\pm 2\text{g}$	660	45	Analogico (Multiplexed)	2.5 - 5.25	950 μA @ 3.3 V
LIS3LV02DL	ST	3	$\pm 2\text{g}$ $\pm 6\text{g}$	1024 LSB/g@ $\pm 2\text{g}$ 340 LSB/g@ $\pm 6\text{g}$	300	SPI/I ² C	2,16 - 3,6	600 μA @ 2.5 V 1 μA @ 2.5 V power-down mode

LIS3DSH	ST	3	± 2g ± 4g ± 6g ± 8g ± 16g	0.73 mg/digit	150	SPI/I ² C	1.71 - 3.6	225 uA@ 2.5 V Active mode(1.6 KHz ODR) 2 uA@ 2.5 V power-down/standby mode
LIS331DLH	ST	3	± 2g ± 4g ± 8g	3.9 mg/digit	218	SPI/I ² C	2.16 - 3.6	250 uA@ 2.5 V normal mode 10 uA@ 2.5 V low-power mode 1 uA@ 2.5 V power-down mode
LIS331HH	ST	3	± 6g ± 12g ± 24g	12 mg/digit	650	SPI/I ² C	2.16 - 3.6	250 uA@ 2.5 V normal mode 10 uA@ 2.5 V low-power mode 1 uA@ 2.5 V power-down mode
LIS3DH	ST	3	± 2g ± 4g ± 8g ± 16g	12 mg/digit	220	SPI/I ² C	1.71 - 3.6	11 uA@ 2.5 V normal mode 6 uA@ 2.5 V low-power mode 0.5 uA@ 2.5 V power-down mode
MPU-6000/6050	InvenSense	3	± 2g ± 4g ± 8g ± 16g	16 LSB/g@±2g 2 LSB/g@±16g	400	SPI/I ² C/I ² C	2.375 - 3.46	3.9 mA@full (acc+gyro) 140 uA@ 2.5 V low-power mode
SCA3100-D04	VTI	3	± 2g	900 count/g	5 mg RMS	SPI	3,30	3 mA@ 3.3 V active mode 0.12 mA@ 3.3 V power down mode
SMB380	Bosch	3	± 2g ± 4g ± 8g	256 LSB/g@2g 128 LSB/g@4g 64 LSB/g@8g	500	SPI/I ² C	2.4 - 3.6	200 uA normal mode 1 uA idle current

Tabella 1. Sensori accelerometrici MEMS triassiali e alcune caratteristiche prestazionali a confronto

2. OTTIMIZZAZIONE DEL SOTTOSISTEMA DI COMUNICAZIONE (HARDWARE E FIRMWARE)

> 2.1 Test di comunicazione wireless di unità SMAMID

Sono stati svolti test di comunicazione wireless di singole unità SMAMID studiando l'andamento del parametro RSSI (Received Signal Strength Indication), che è un indicatore della potenza del segnale ricevuto sull'antenna in dBm, cercando di correlarlo con i valori della temperatura T e tensione di alimentazione V , parametri entrambi misurati a bordo di ciascuna unità SMAMID. Le misure sono state eseguite in differenti condizioni sperimentali di laboratorio, individuando le dipendenze eventuali tra queste grandezze e alcune condizioni di misura.



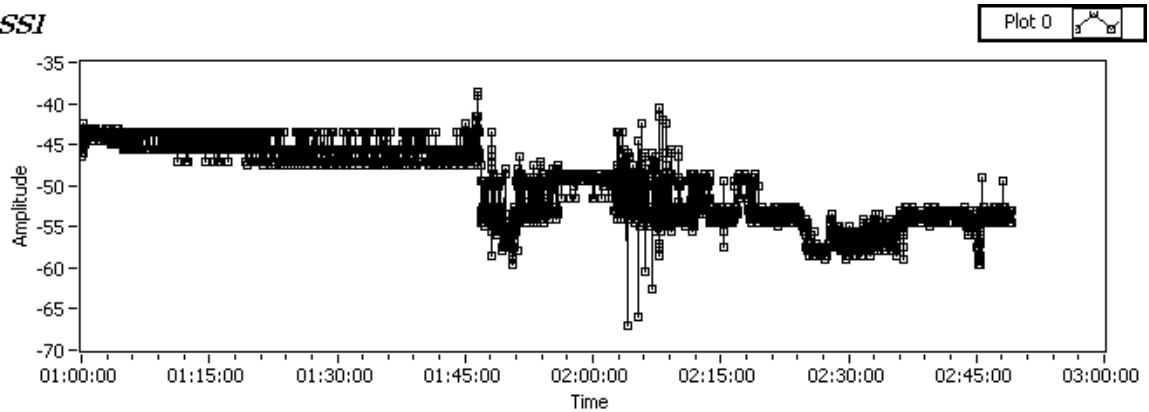
*Figura 2. Unità SMAMID master e slave impiegate nei test di comunicazione wireless (sx);
postazione sperimentale (dx)*

Fase Test A

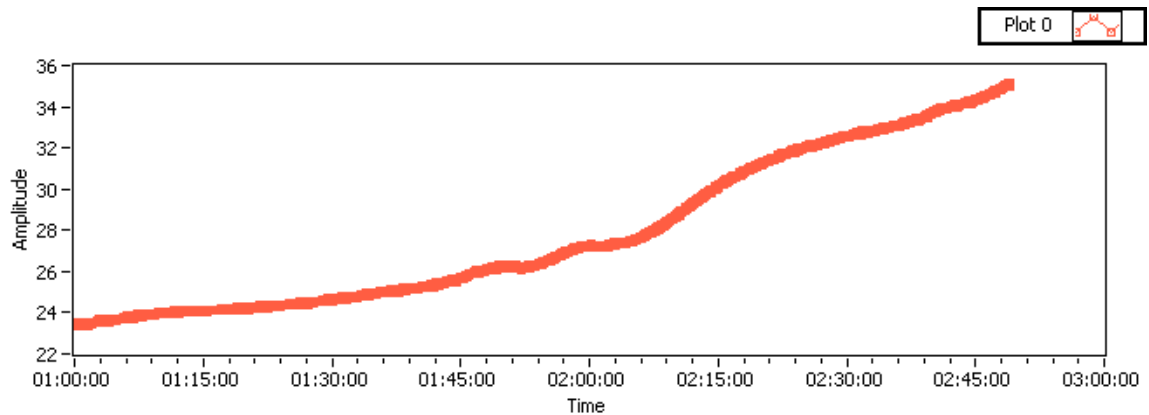
L'UF 25 messa in esterno vicino la finestra. La master è in posizione standard la UF 25 al centro tra le due finestre in posizione esterna. Il secondo test va dalle 9:35 alle 12. Anche se valutando i punti presi si potrebbe considerare un intervallo di solo 1.50 ore. Si deve tener conto dei tempi di risposta e di eventuali retray o punti in cui non si riceve che sono stati eliminati dal grafico (2 punti).

Si tenga presente che il tempo sulle ordinate può essere inferiore rispetto al tempo reale del 20-30 %.

RSSI



T



V

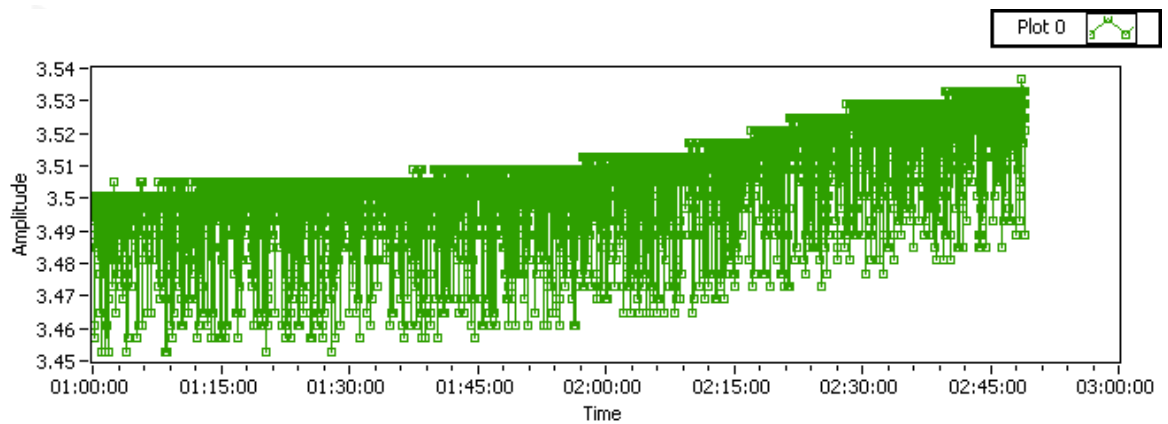


Figura 3

Si va da valori di -40 a valori di -60 se si considerano anche le variazioni di breve periodo, altrimenti si può parlare di variazioni tra -45 e -55. Tali grafici sono poi ricostruiti impiegando un fattore di compressione 15.

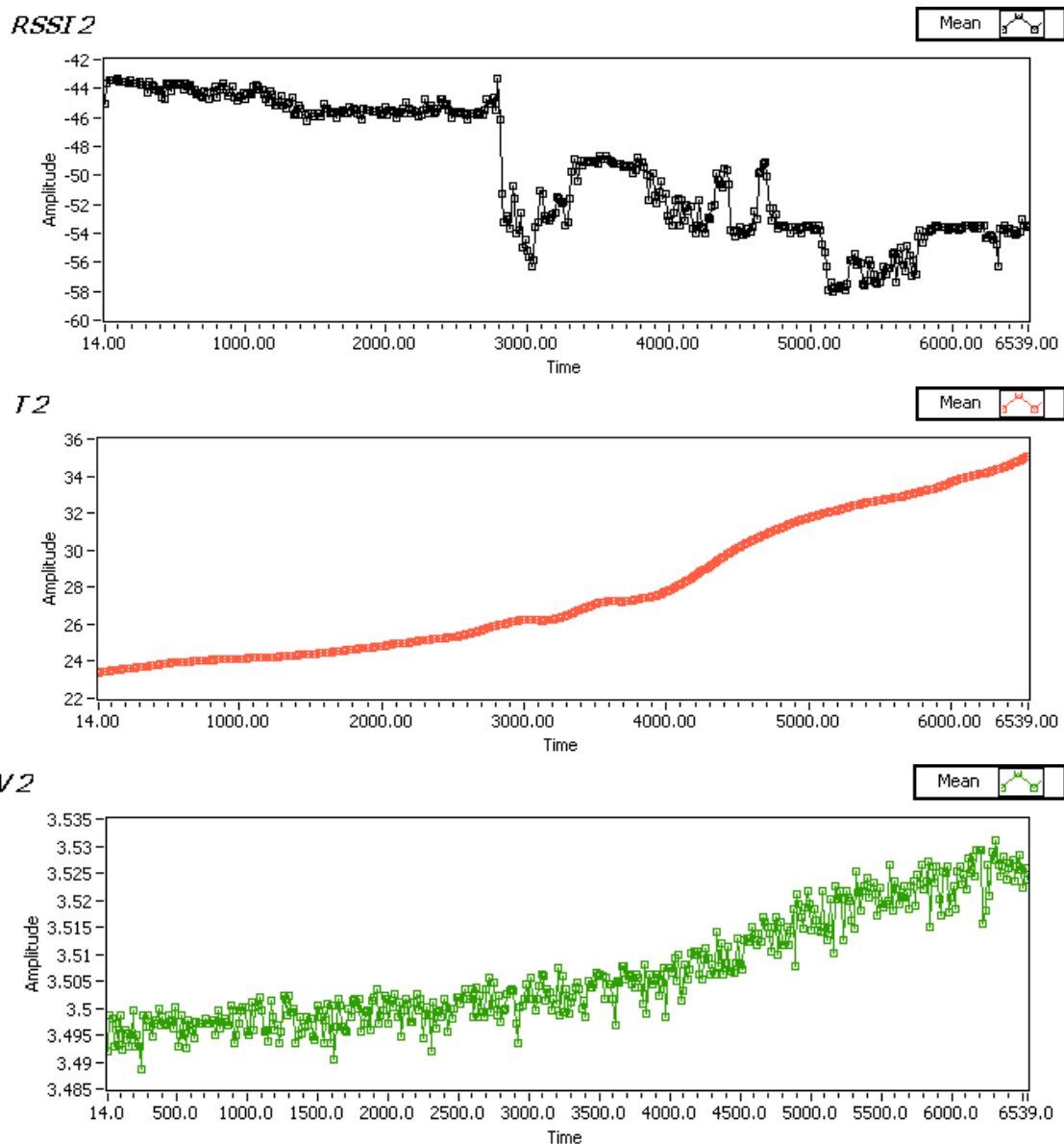


Figura 4

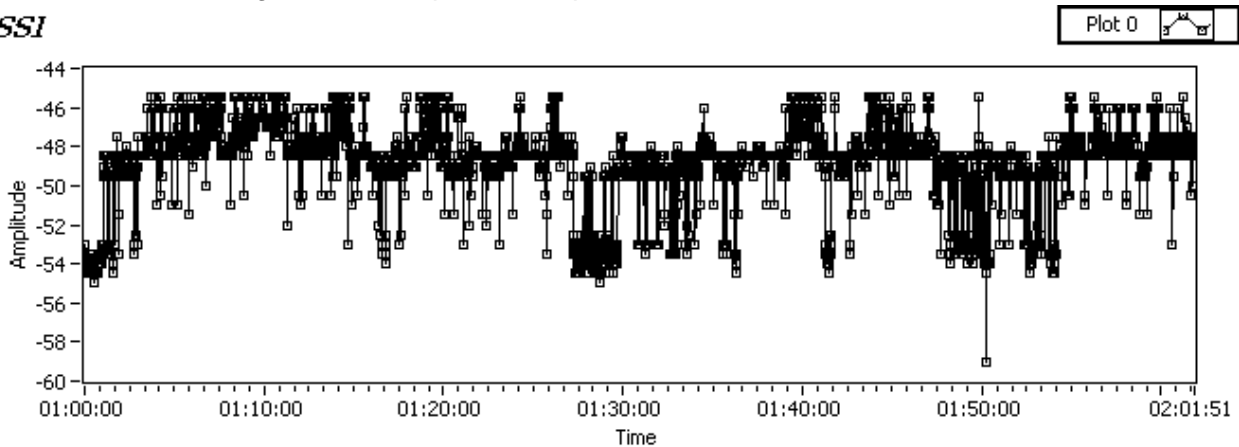
La variazione è presente in tutti e 3 i parametri ma sembra abbastanza intuibile un andamento inverso del parametro RSSI con quello della Tensione. Un aumento della tensione sembra corrispondere ad una diminuzione della portata RSSI. Si deve tener presente che eventi occasionali potrebbero essere anche imputati a persone in stanza.

Fase Test B

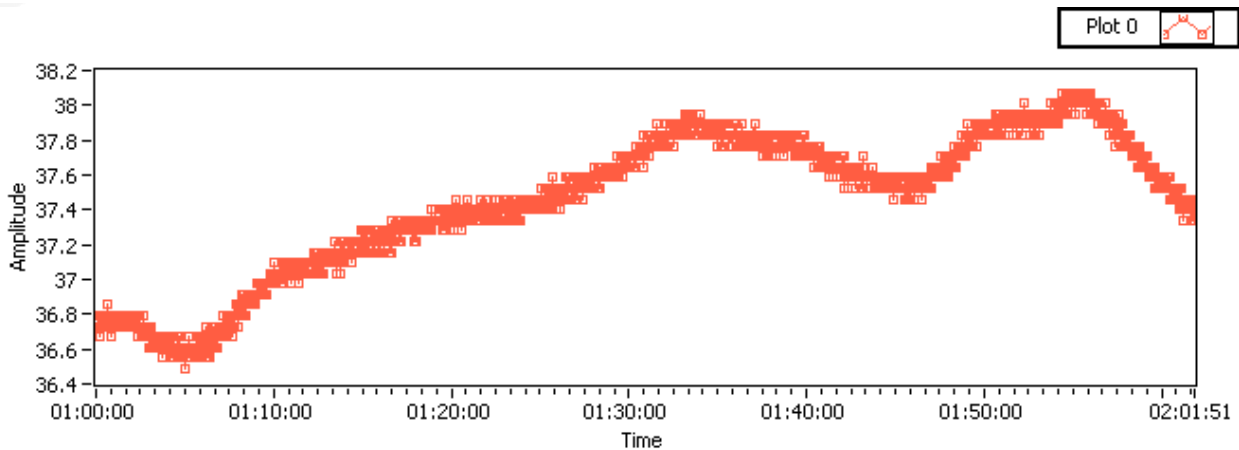
La scheda è all'esterno in una giornata parzialmente nuvolosa.

Questo test inizia alle 12:07 e continua fino alle 16; sebbene per due volte si sia dovuto riavviare il pc a causa di uno schermo blu, i dati sono presentati come un tutt'uno. Si consideri che il tempo di attesa è stato cambiato quindi i tempi reali e nel grafico sono quasi corrispondenti.

RSSI



T



V

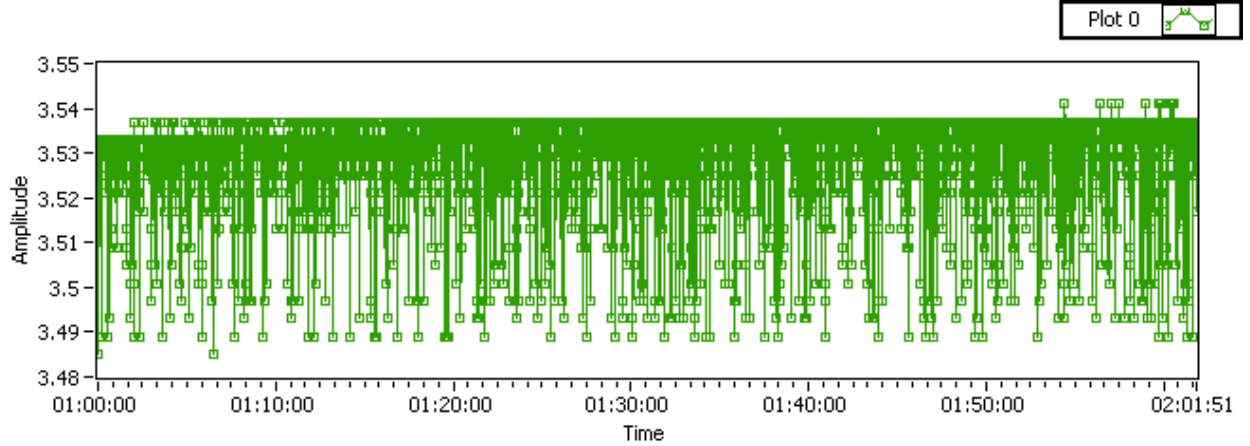
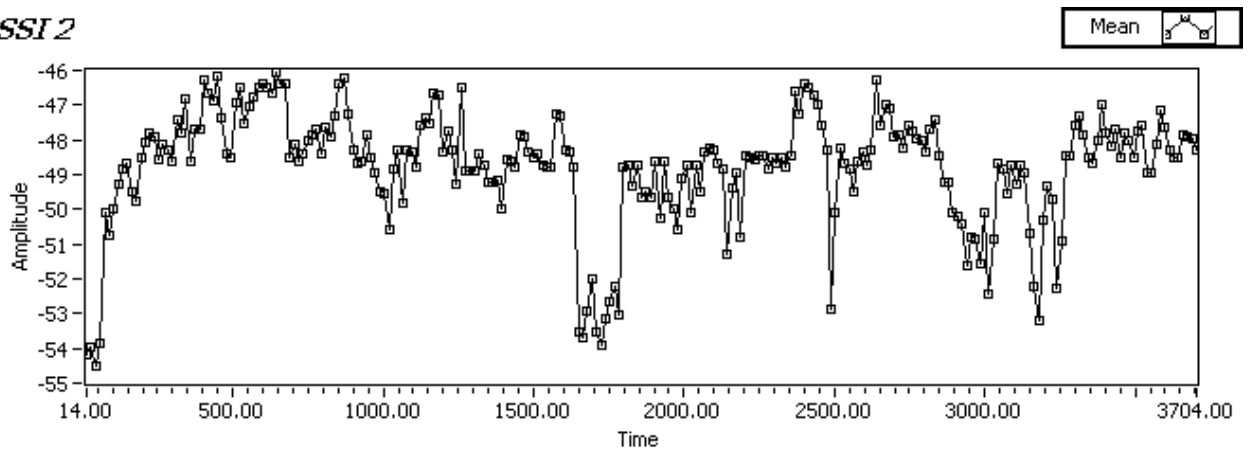


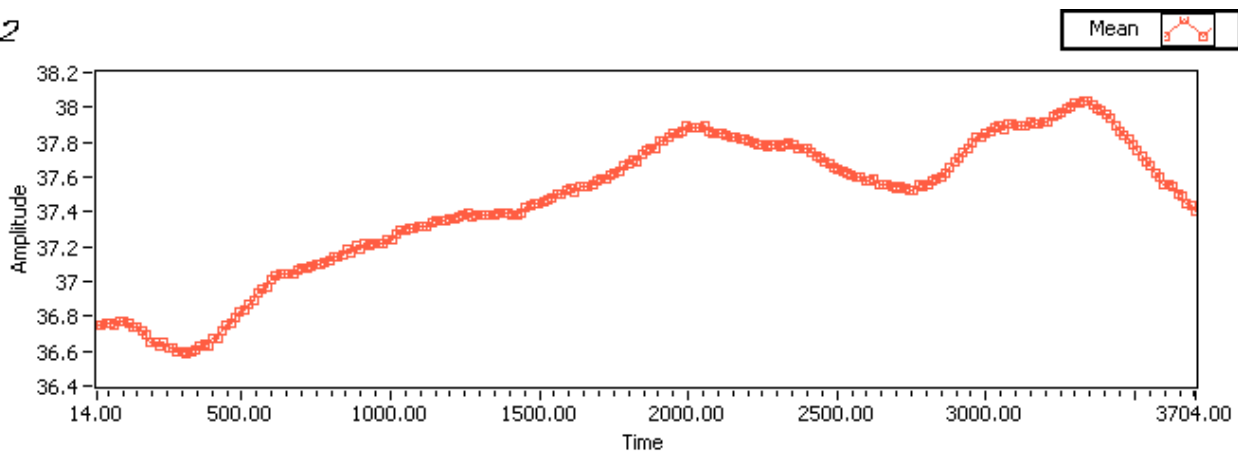
Figura 5

Ad osservare i grafici RSSI si nota un andamento piuttosto variabile tra i -54 e -46 in cui è improbabile intravedere una regolarità o associarlo a qualche funzione. Anche i valori delle tensioni variano in maniera random tra 3.538 e 3.485 con valore medio intorno a 3.53; non si riscontrano però degli andamenti particolari. Al contrario le variazioni di temperatura sia in termini complessivi di 2 gradi sia locali non sembrano essere associabili a nessuno degli altri due grafici.

RSSI2



T2



V2

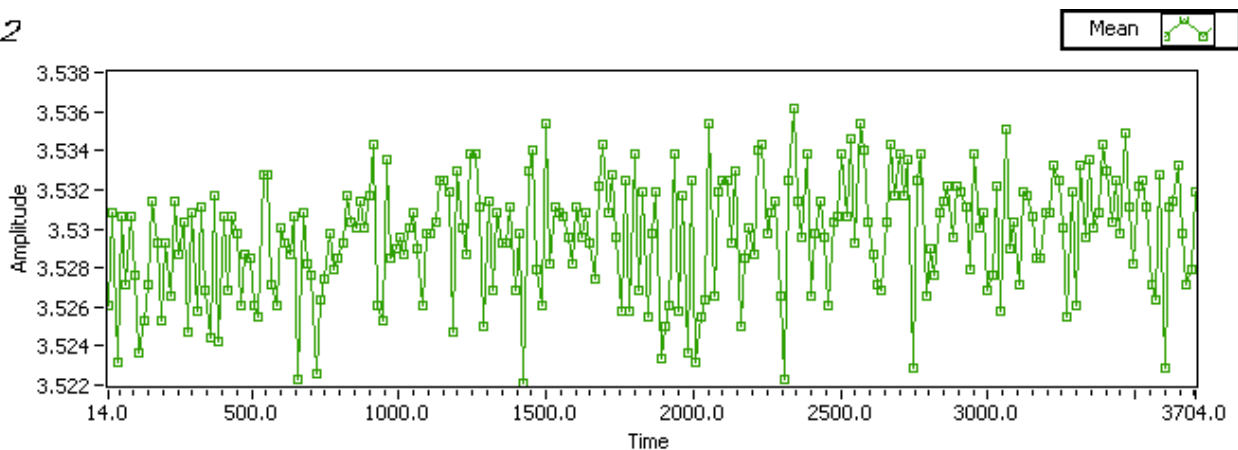
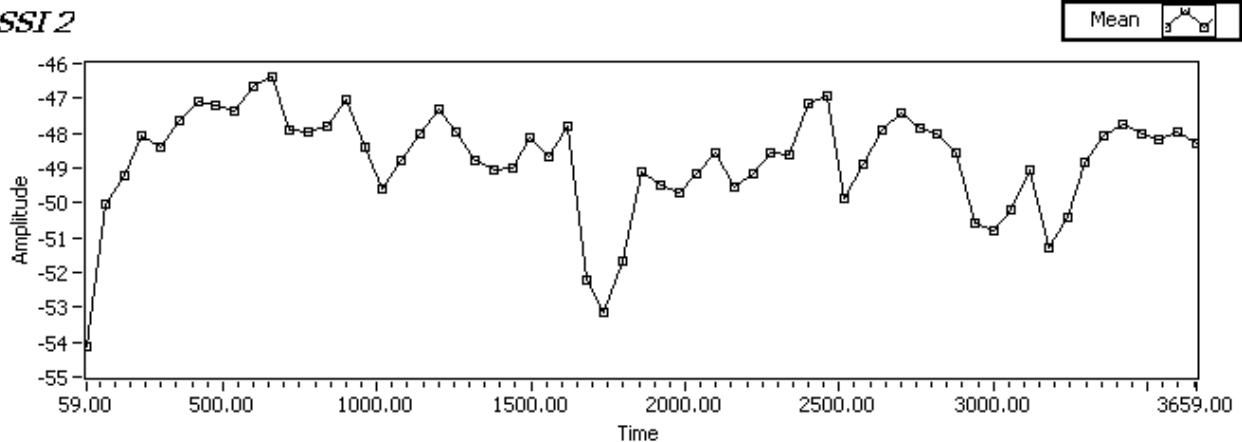


Figura 6

Se si effettuano i grafici mediati fattore 15, nei valori di RSSI si riscontrano dei decrementi improvvisi piuttosto pronunciati; a questi intervalli non è immediato associare una variazione della tensione con aumento positivo, se non in minima parte (1700; 2500; 3050).

Tale effetto è forse maggiormente visibile con una media con fattore 60.

RSSI 2



V2

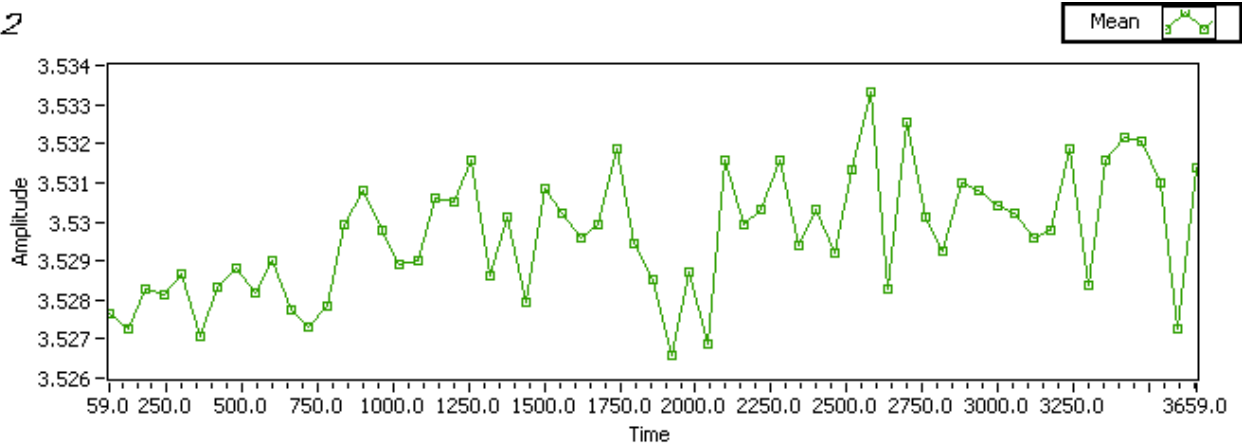


Figura 7

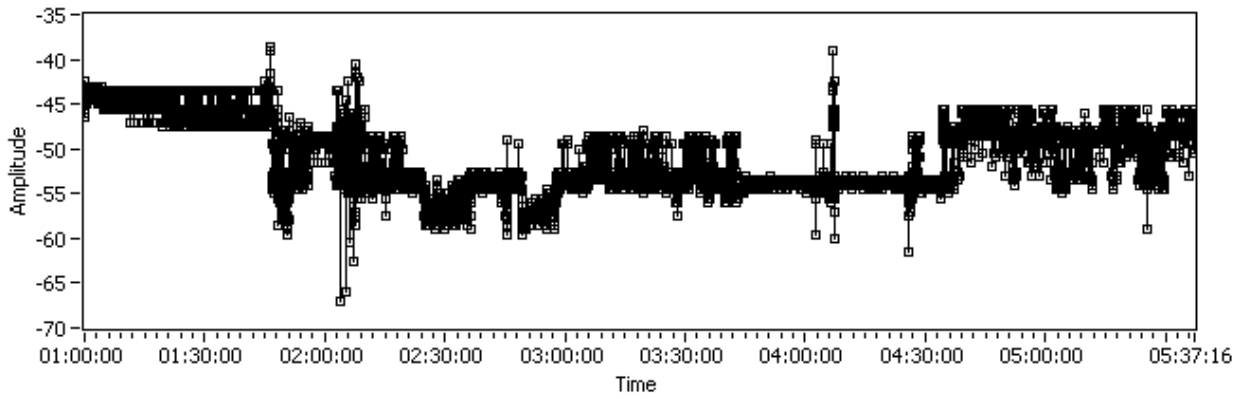
Sintesi UF 25

I risultati dei test effettuati dalle ore 9:30 alle ore 16 sono stati quindi accorpati in un unico grafico, pur tenendo presente che tali misure sono state svolte in sessioni separate a volte anche di 5-10 minuti.

Si presentano i grafici.

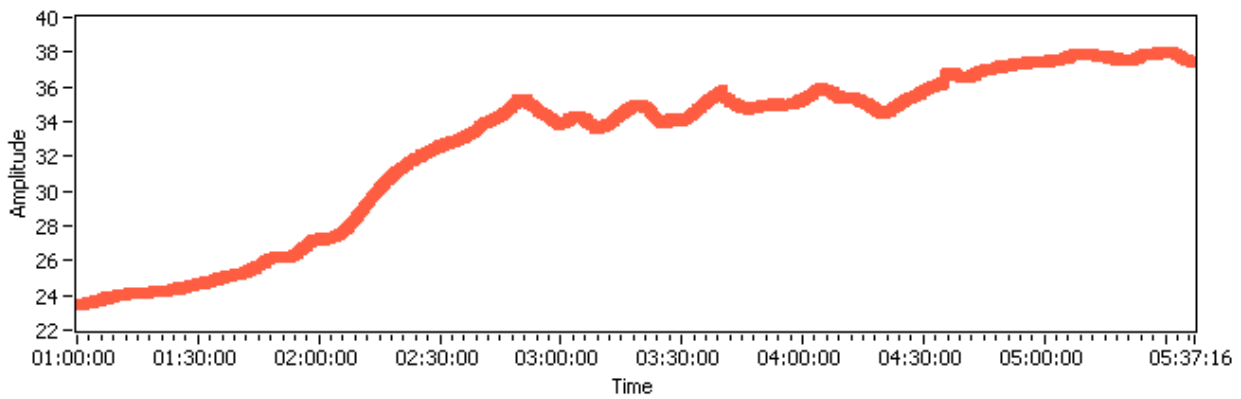
RSSI

Plot 0 




T

Plot 0 



V

Plot 0 

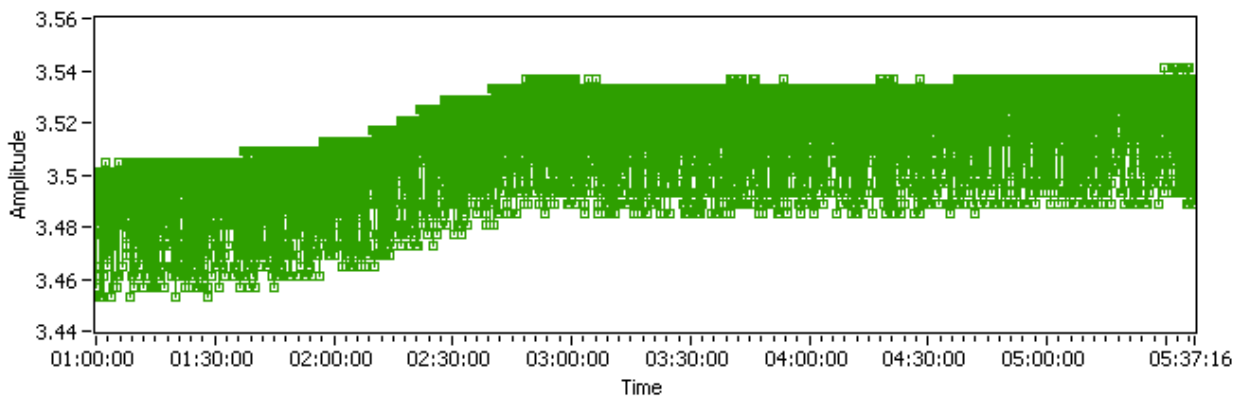
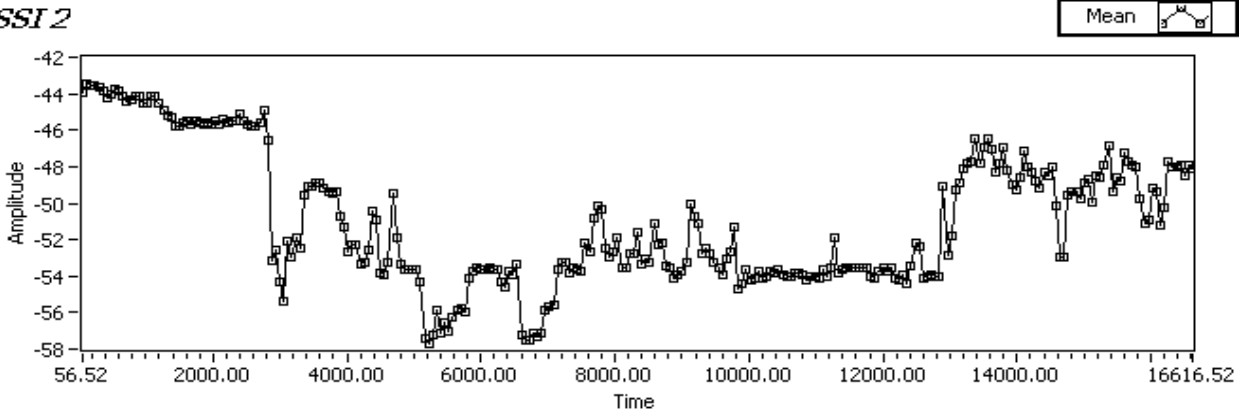


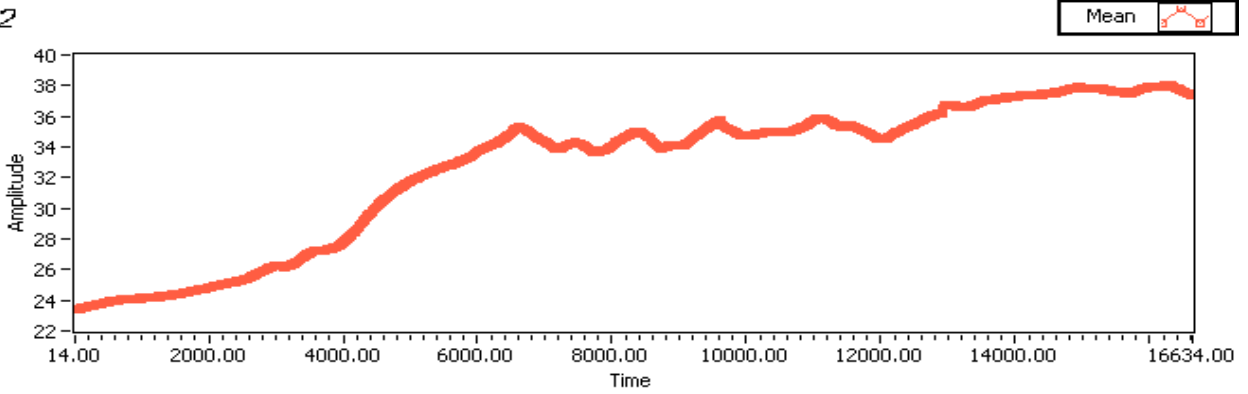
Figura 8

In termini mediati con 15 di fattore.

RSSI 2



T2



V2

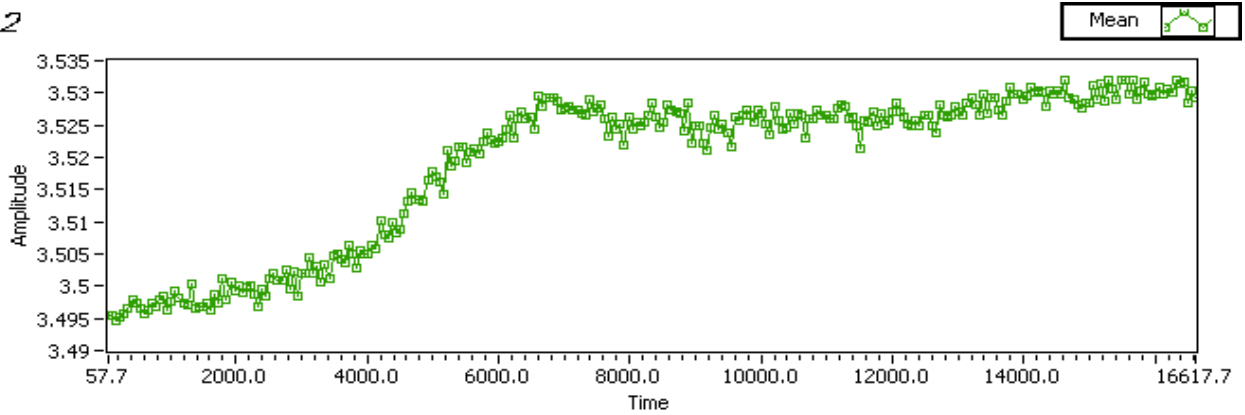


Figura 9

Questi grafici nel loro complesso dimostrano come:

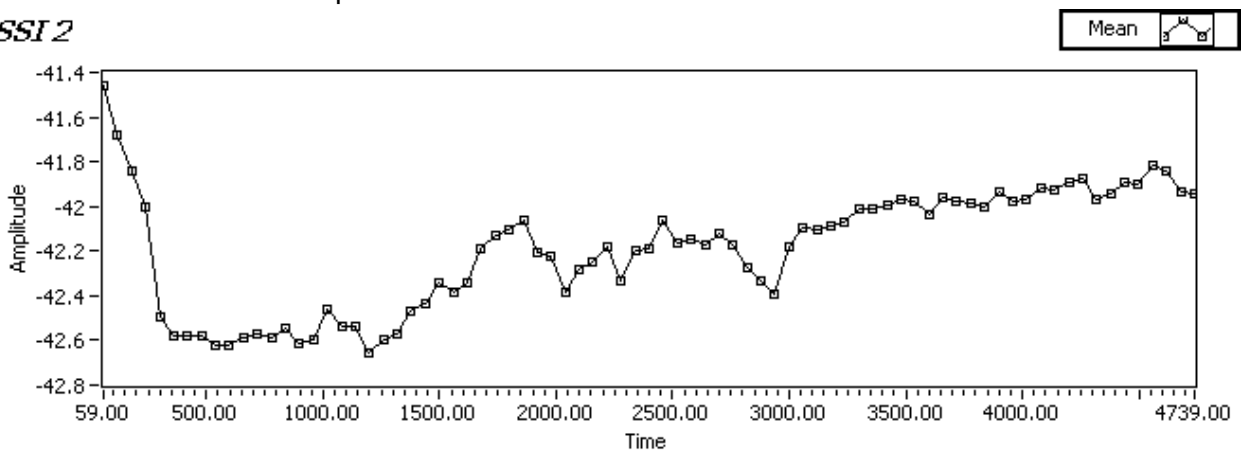
1. Aumento di temperatura comporta un aumento della tensione.
2. L'aumento di tensione (o della temperatura) provocano una diminuzione anche forte del valore di RSSI (10 gradi-> 10 dB).
3. Il valore di RSSI ha poi delle variazioni di carattere locale non sempre associabili alla temperatura e alla tensione. Anzi nelle analisi precedenti le variazioni di breve periodo sembrano associabili essenzialmente a variazioni più della tensione che della temperatura.

Fase Test C

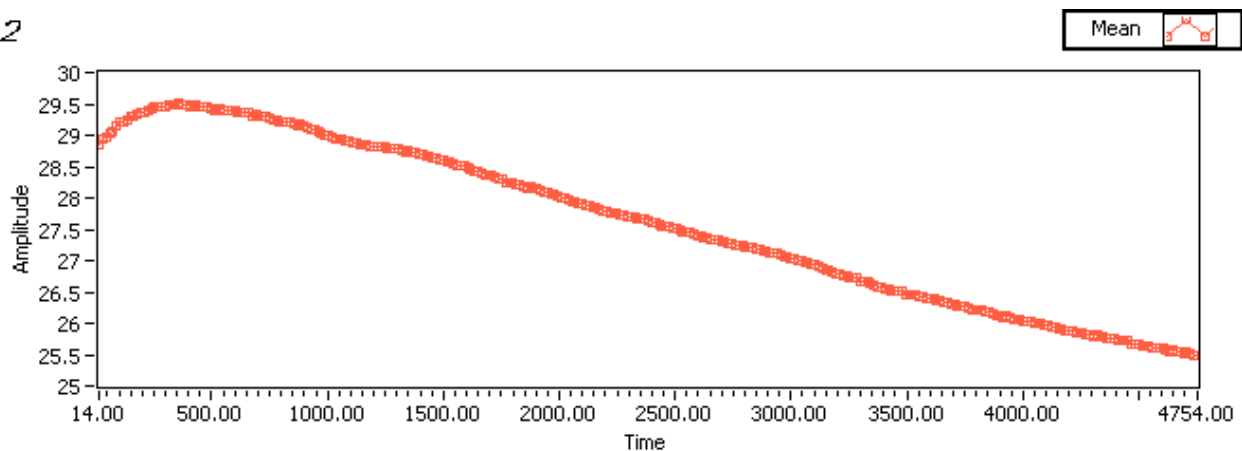
Inizio test ore 18:03 fine test (arresto corrente intorno 21:30).

Tenendo presenti le considerazioni effettuate in precedenza, si riportano direttamente i risultati ottenuti attraverso un processo di decimazione con fattore 60. Ancora una volta i tre parametri appaiono strettamente correlati tra loro. Una variazione di 4.5 gradi, comporta una variazione di 1 centesimo di V a cui segue una variazione di circa 1 db. Gli andamenti paiono confermati ma non sembrano variare sempre allo stesso modo.

RSSI 2



T2



V2

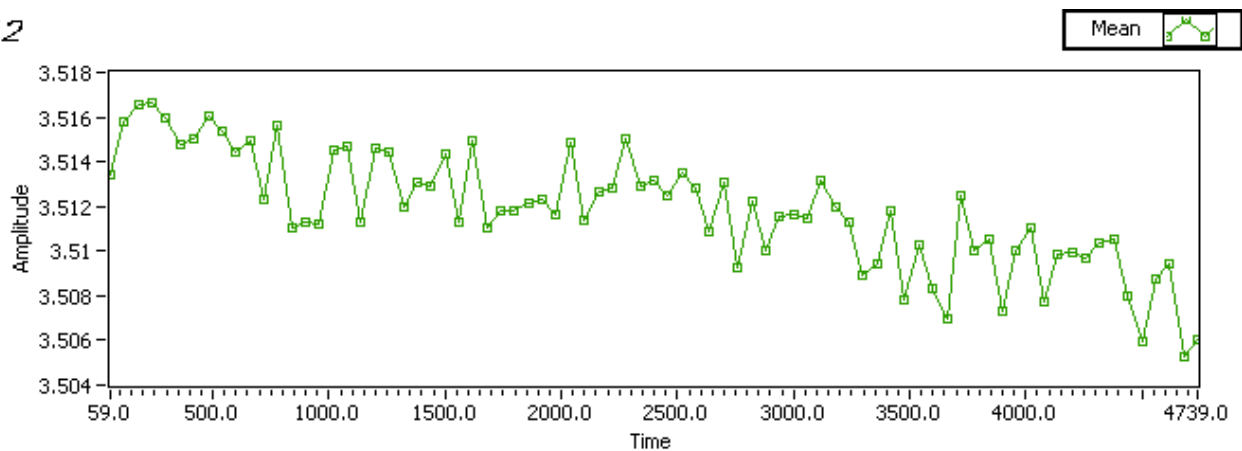


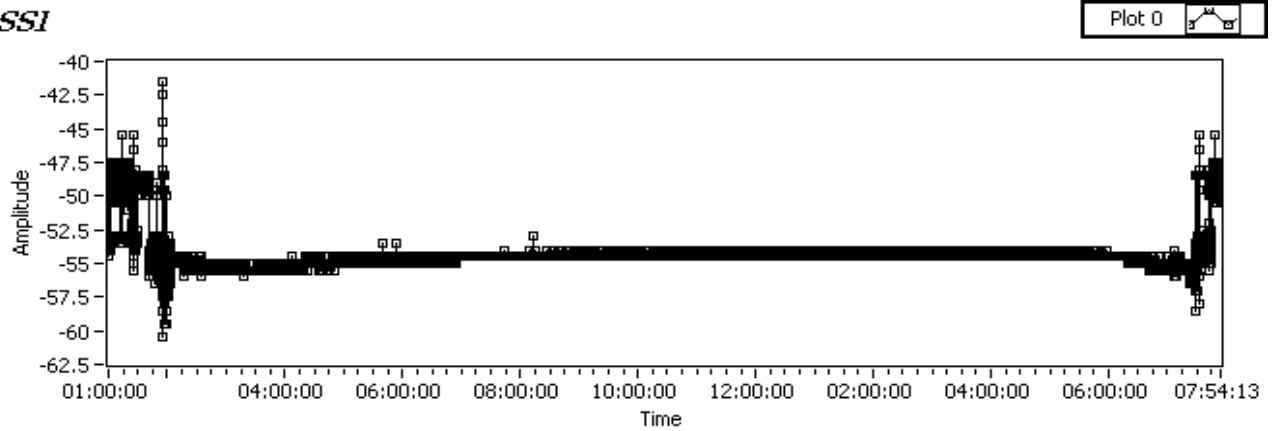
Figura 10

Test UF 25 messa in esterno vicino la finestra + UF 42 e 58 su posizione standard 1 interna alla stanza.

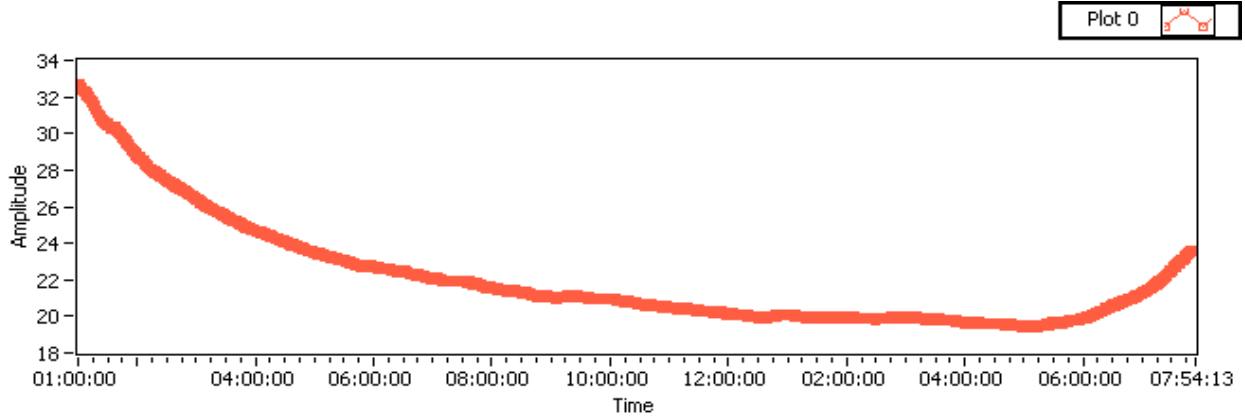
La master è in posizione standard, la UF 25 al centro tra le due finestre in posizione esterna, le altre due UF 42 e 58 sono poste sul cartone; in particolare la UF 42 è nella classica posizione.

Questi test sono iniziati alle 17:10 per essere arrestati intorno alle 9:30 del giorno successivo.

RSSI



T



V

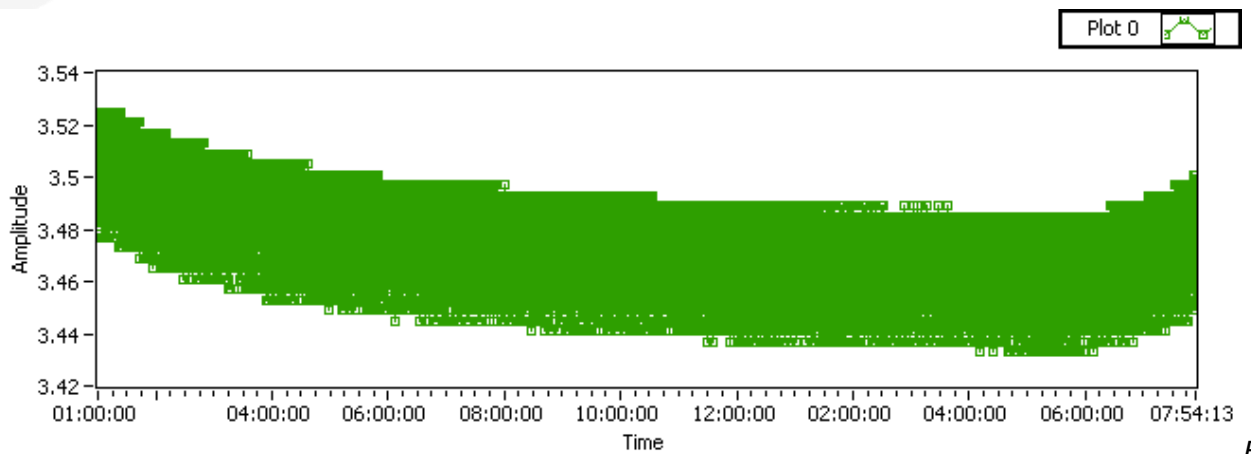
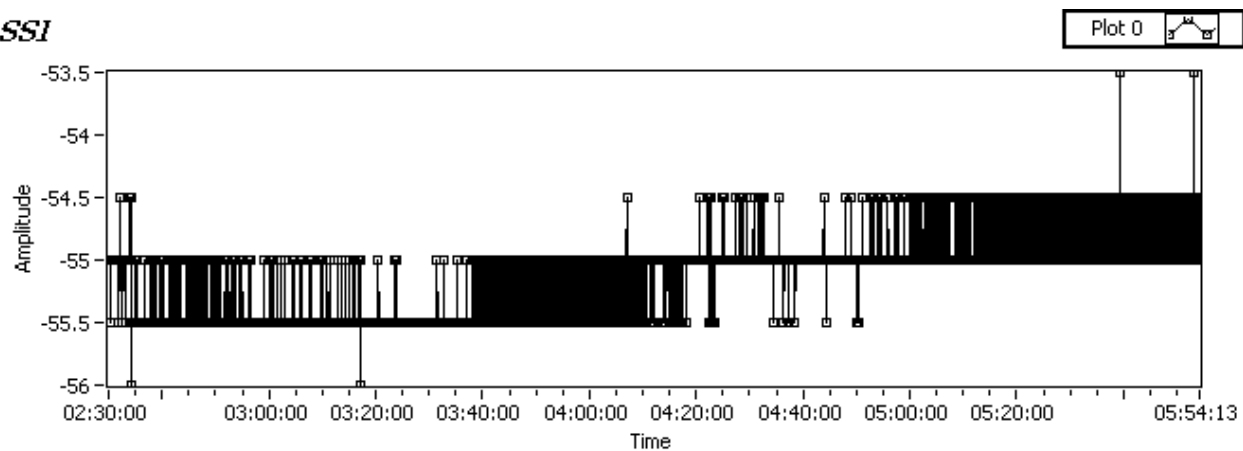


Figura 11

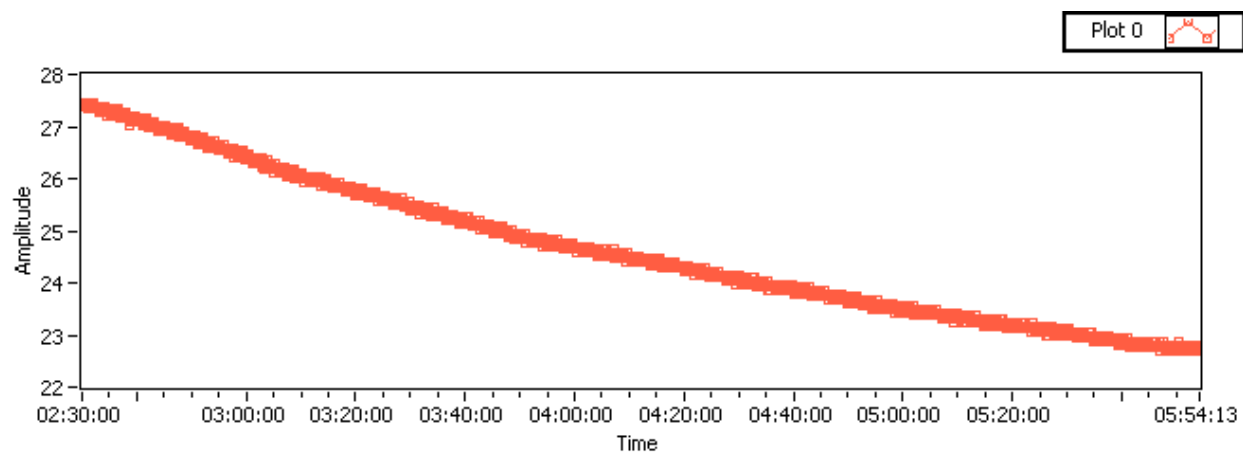
F

Si notano nel grafico RSSI dei tratti iniziali e finali molto disturbati. Durano circa 2 ore, come pure nei casi a seguire.

RSSI



T



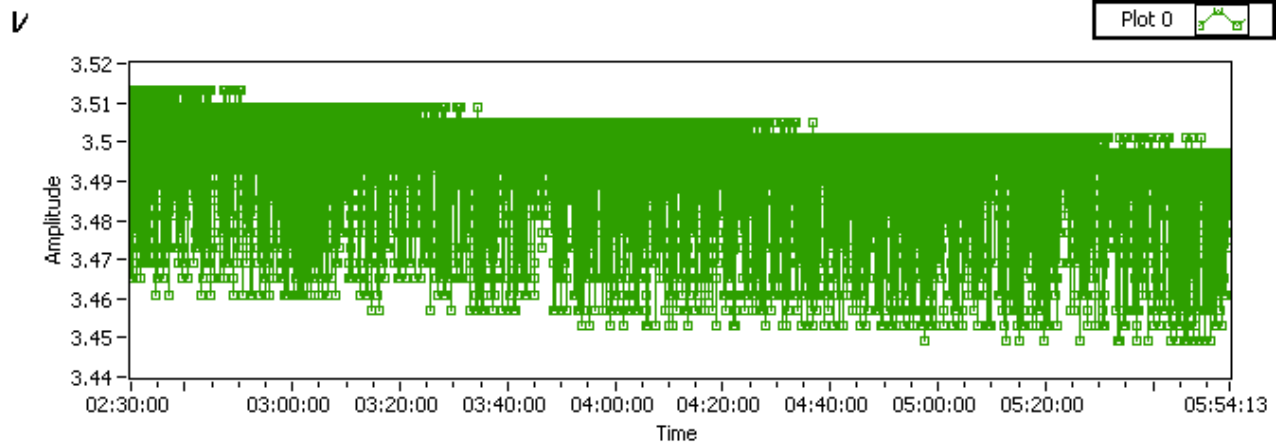
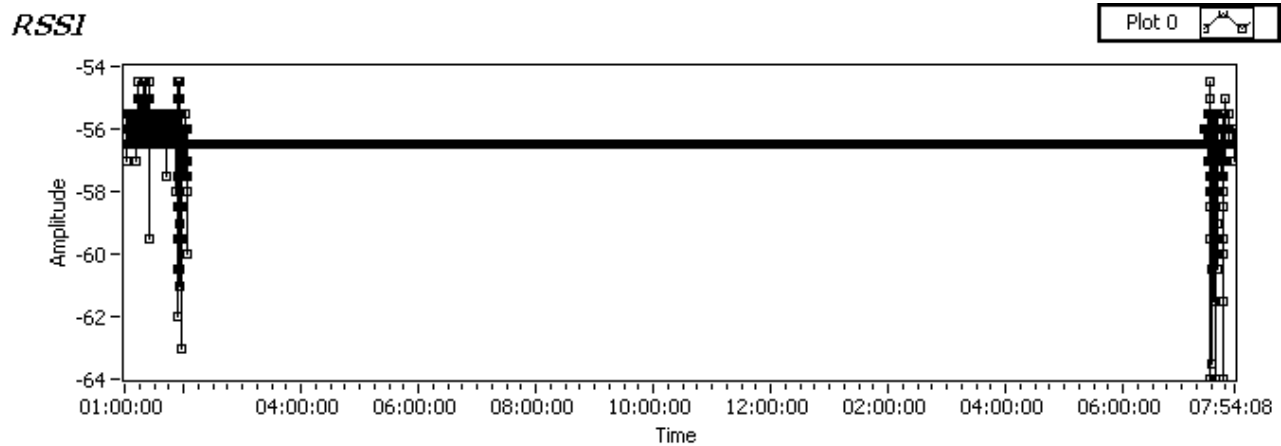
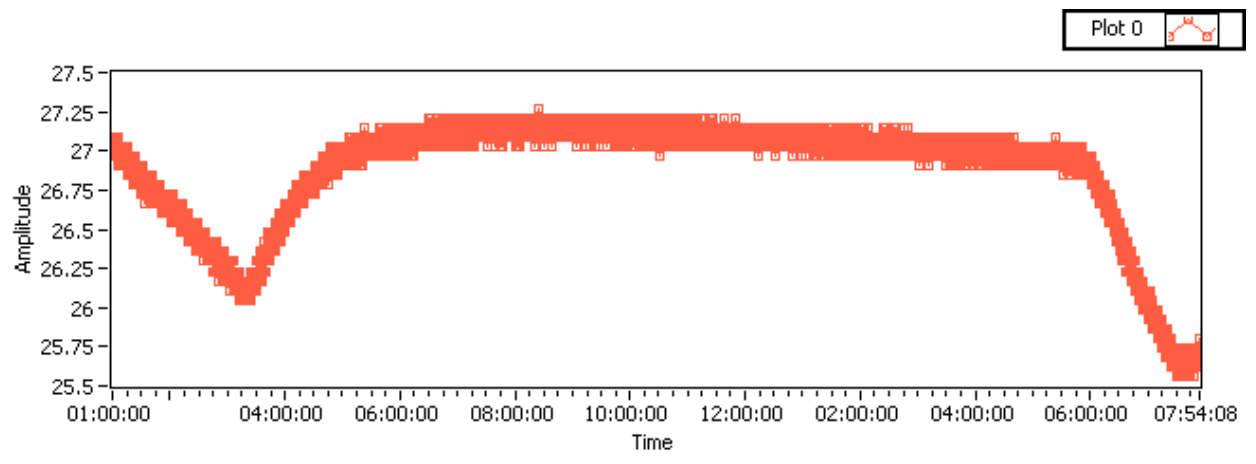


Figura 12

UF 42



T



V

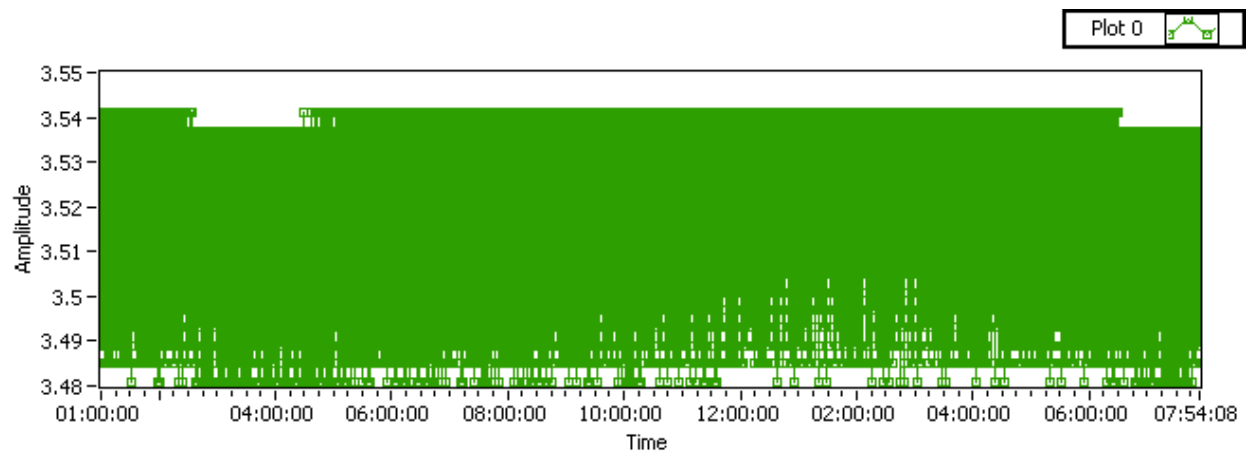

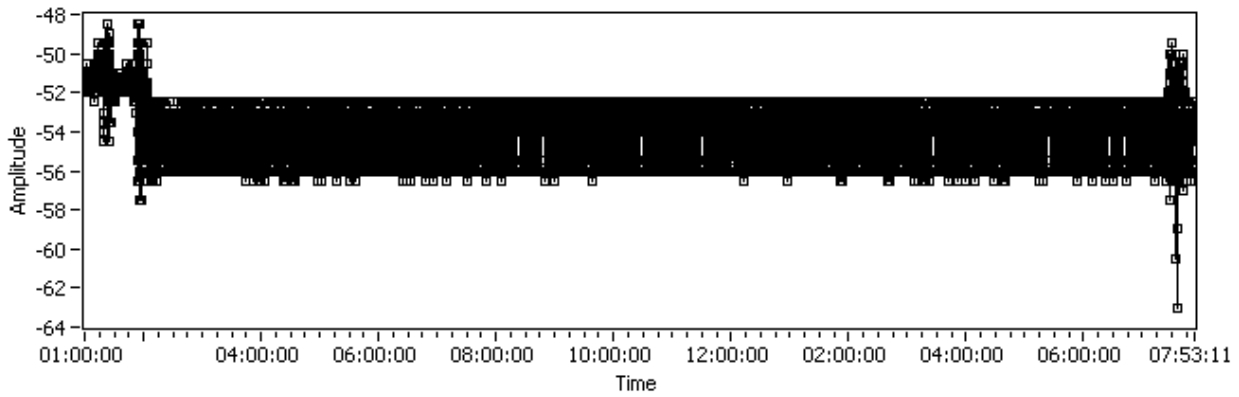


Figura 13

UF 58

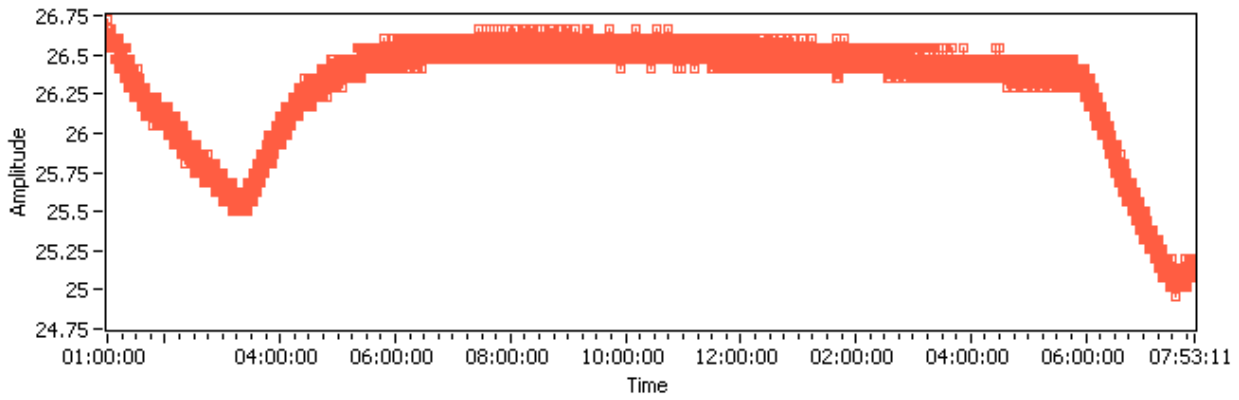
RSSI

Plot 0 



T

Plot 0 



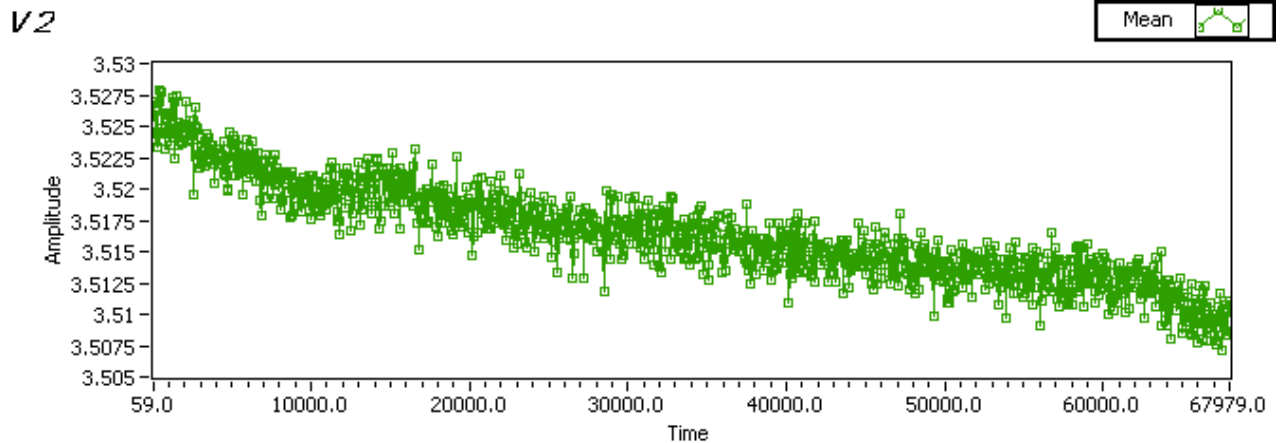
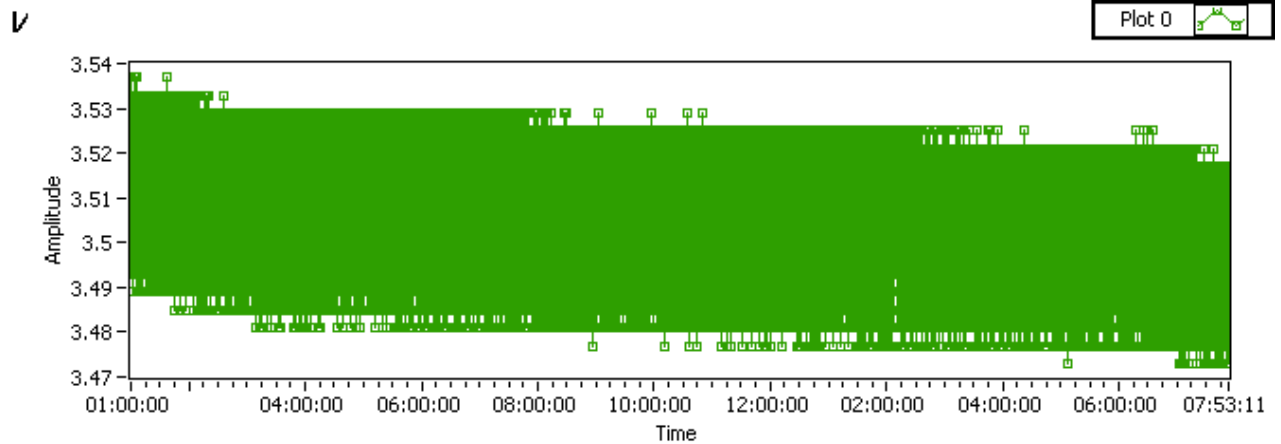


Figura 14


Test UF 27

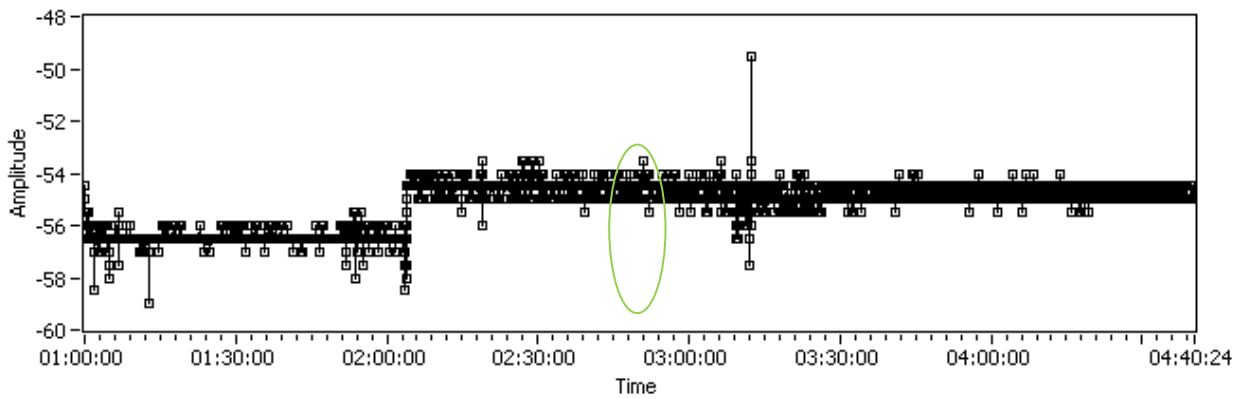
Primo test 2 ore

La scheda UF 27 è posta nella stanza a circa 3.5 m dalla master; in questa stanza non ci sono persone e si assume la probabilità di disturbi esterni bassa o per lo meno costante.


Il primo test è stato lanciato intorno alle 18, ma si è arrestato dopo un paio di ore a causa dell'assenza di corrente. Al solito i punti presi sono inferiori al tempo reale restituendo una scala temporale più ristretta. Si presentano le chart così come ritrovate.

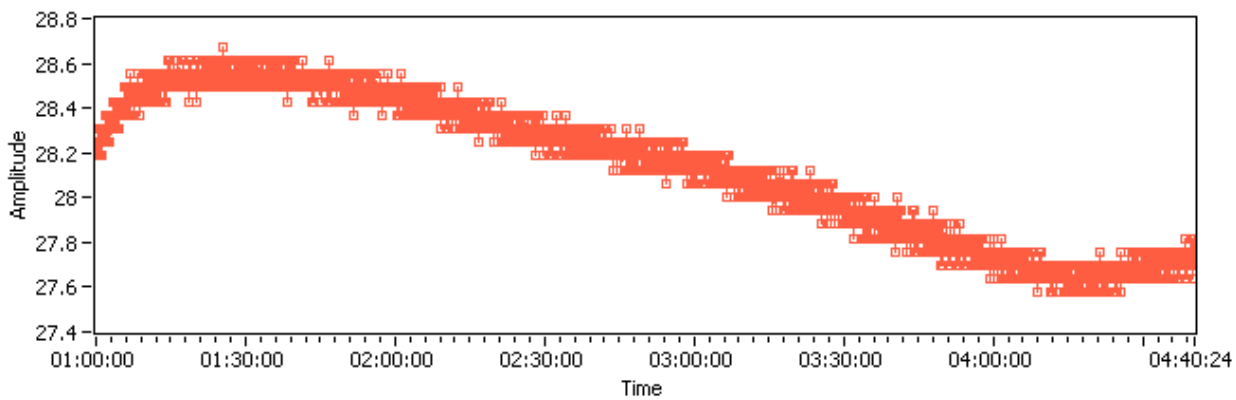
RSSI

Plot 0 



T

Plot 0 



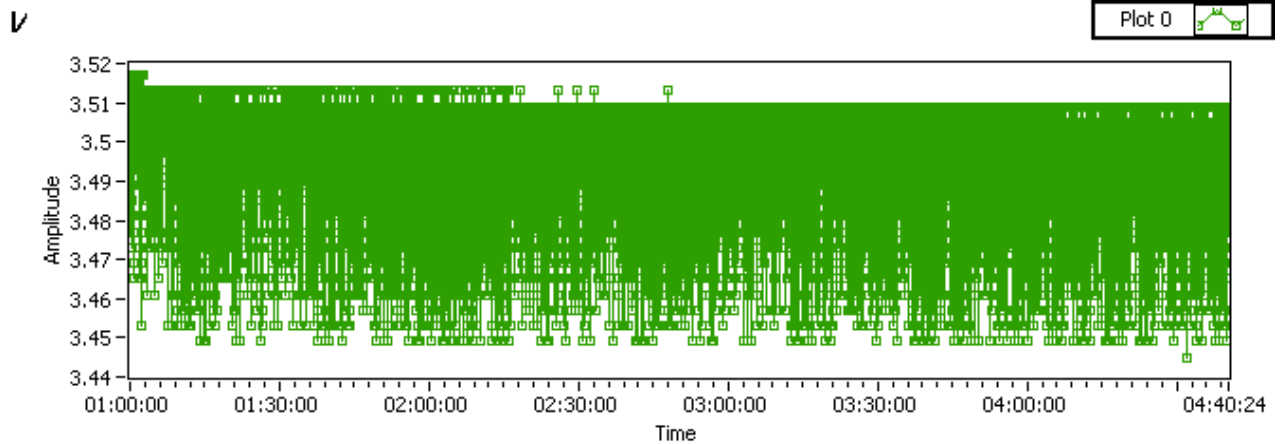
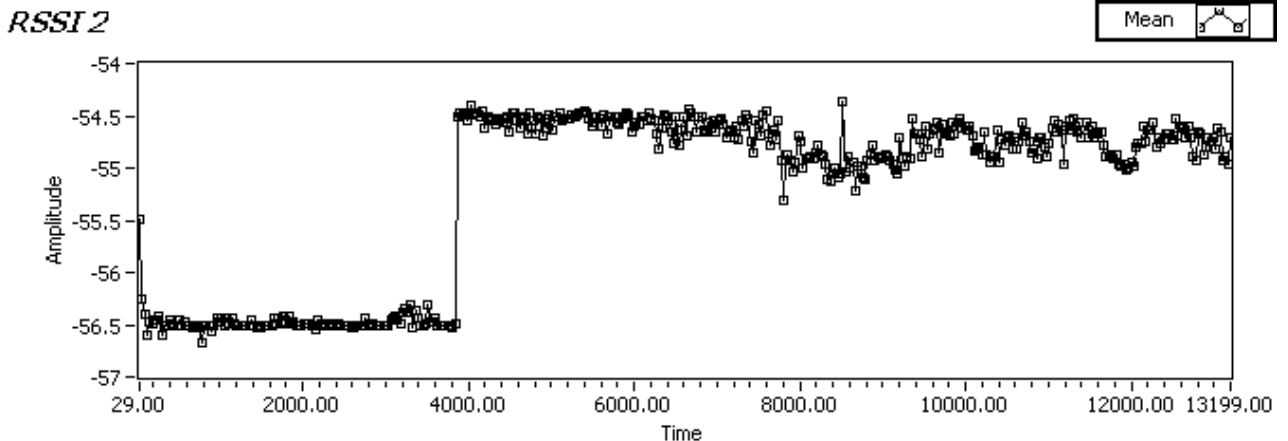


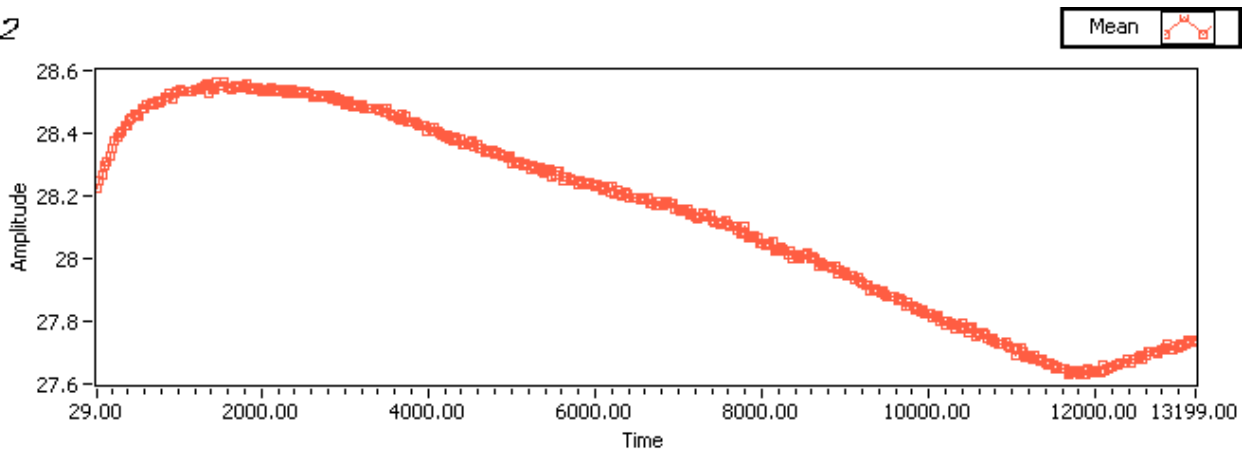
Figura 15

Nel grafico RSSI si evincono essenzialmente due valori costanti separati da un gradino che ricopre circa 40 secondi in cui si verifica una variazione di circa 2 dB. Valutando gli andamenti degli altri grafici (temperatura) e tensione che sembra costante, non si evince nessuna variazione.

Si prova ad effettuare una ricampionatura con un fattore di compressione 30.



T2



V2

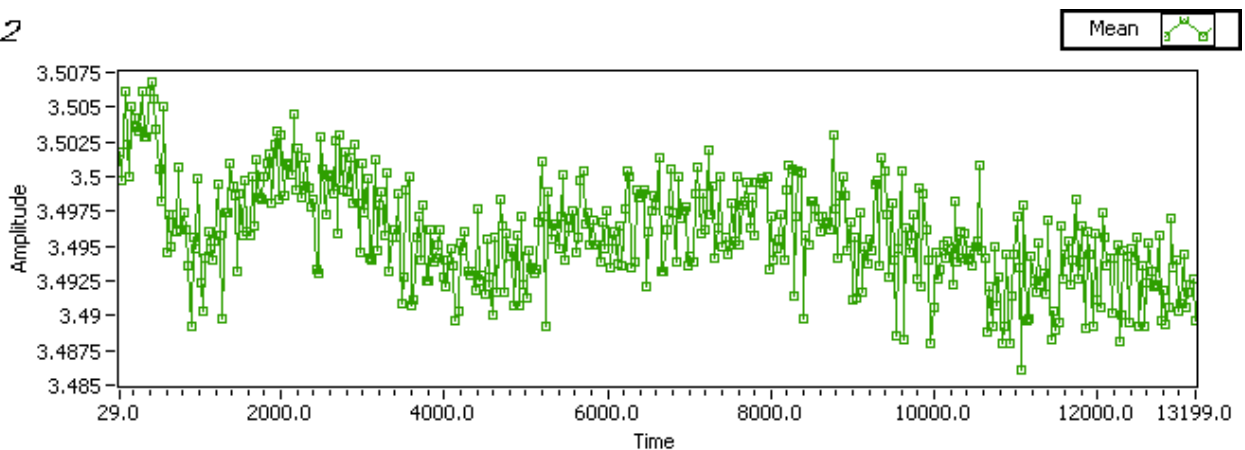


Figura 16


Con questa procedura si evidenziano almeno due effetti:

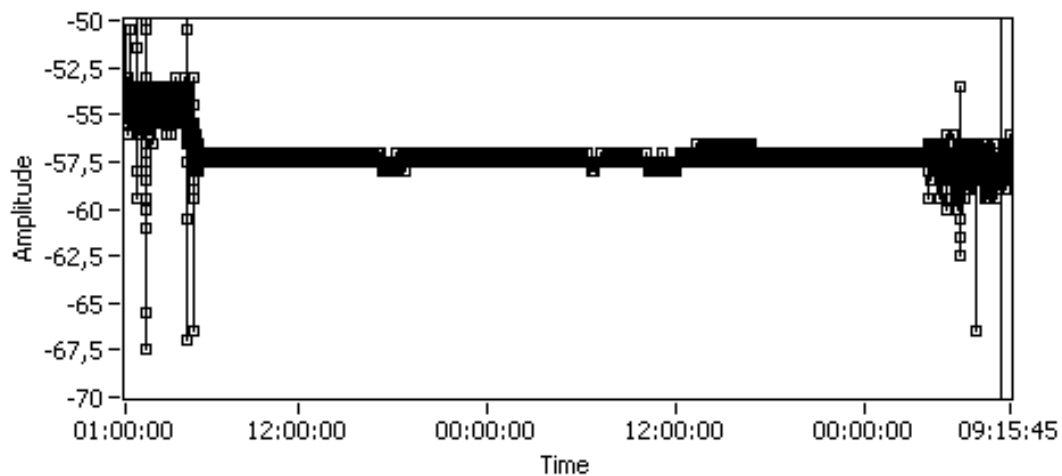
1. Il salto di 2 dB è netto e molto rapido e non sembra correlabile a nessun occasionale in temperatura e tensione; tuttavia non sembra trascurabile che proprio intorno alla media n°4000 si ha un minimo nella tensione.
2. Se si ricostruisce l'andamento della tensione e si trascura l'effetto salto in RSSI si nota un andamento abbastanza corrispondente all'inverso di RSSI: in pratica se la tensione tende a diminuire (anche pochi millesimi di V) si riscontra un miglioramento del valore di RSSI.

Secondo test circa 3 giorni.


In questo test effettuato con la UF 27 si ritrovano degli ottimi risultati:

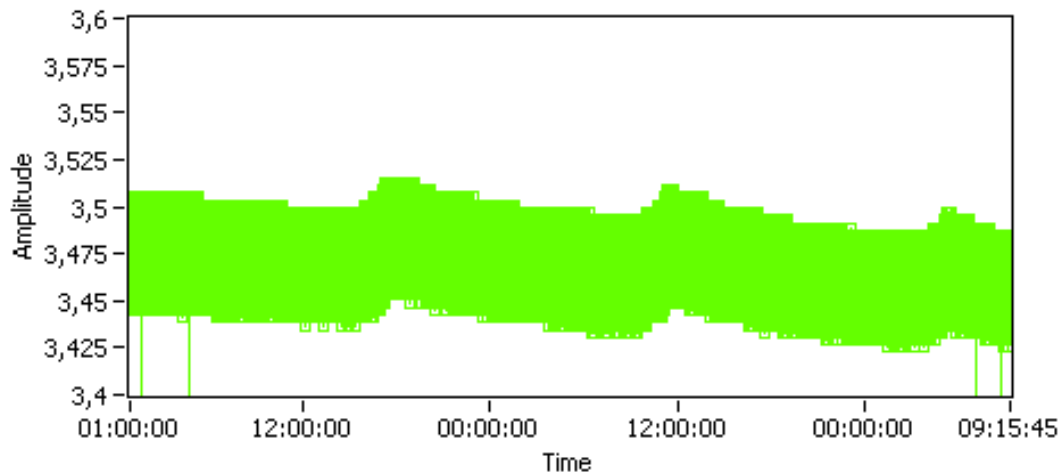
RSSI

Plot 0 



V

Plot 0 



T

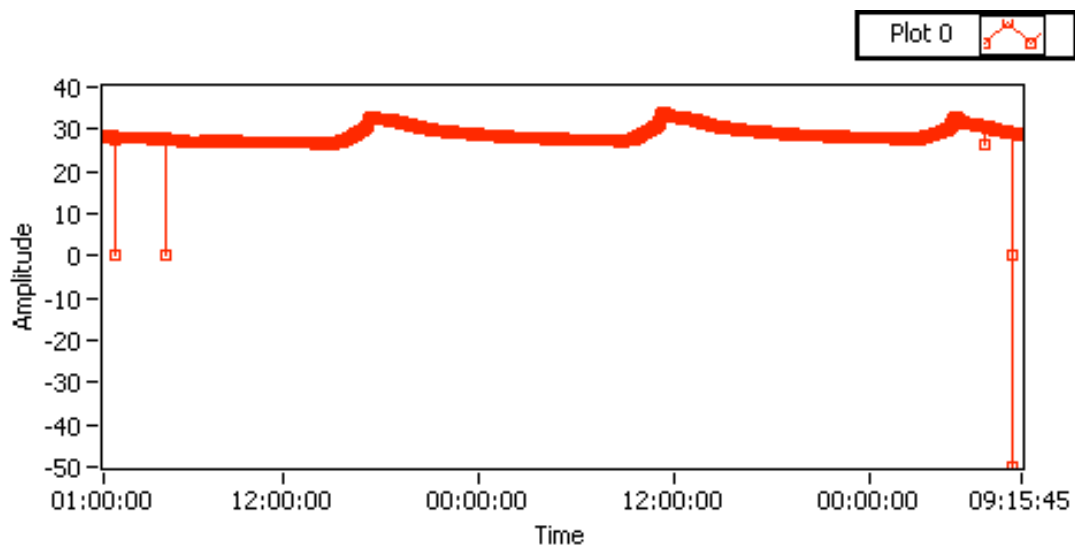


Figura 17

Gli andamenti di tensione e temperatura sono perfettamente correlati, anche le variazioni di RSSI sembrano correlabili a questi andamenti, tranne le parti iniziali e finali dove sono presenti dei disturbi maggiori.

3. Valutazione di componenti di memoria di massa (hardware) alternative

Premesso che attualmente viene impiegato un dispositivo di RAM statica (CY62177EV30LL-55ZXI della Cypress), si sono esaminate e comparate le possibilità tecniche relative all'impiego di:

1. RAM statica alternativa a quella in uso dalle prestazioni superiori
2. Flash fissa a bordo scheda
3. MICROSD

Circa la prima opzione, si è trattato di individuare sul mercato i dispositivi alternativi a quello attualmente in uso, riscontrando che, essendo disponibili dispositivi di pari memoria e al contempo di pari prestazioni dal punto di vista dei consumi, non risulterebbero significativi vantaggi dal punto di vista prestazionale nell'effettuare il cambio dell'attuale RAM statica con un altro dispositivo dello stesso tipo.

Volendo poi indagare possibilità tecniche di tipo differente da quello in uso, si sono analizzati il caso 2 della flash fissa a bordo della singola scheda SMAMID e

quello 3 della MICROSD. Nel primo caso, si è constatato che, rimanendo pari al caso di RAM statica le prestazioni in termini di memoria, l'adozione di una flash fissa a bordo comporterebbe consumi maggiori, a fronte di notevoli complicazioni sul fronte della routine firmware destinata al dispositivo in questione. Queste considerazioni hanno comportato l'esclusione di questa opzione.

Per quanto concerne, infine, il dispositivo di tipo 3, MICROSD, per quanto questo tipo di soluzione per la RAM renda disponibile una memoria molto ampia (dell'ordine dei GB contro i 32 Mb (2M x 16 / 4M x 8) della RAM in uso), tuttavia l'adozione di un tal tipo di dispositivo avrebbe comportato delle modifiche a livello firmware molto pesanti in termini di investimento.

Per tali ragioni, è parso ragionevole, convenendo che, pesando i vantaggi possibili con gli svantaggi, il bilancio non risultava particolarmente positivo in nessuno dei casi tecnici esaminati, rimanere fermi al dispositivo oggi in uso in SMAMID.

4. Ottimizzazione dei consumi

Nei sistemi di reti di sensori wireless il vantaggio conseguente all'impiego della comunicazione wireless, ovvero l'assenza di cablaggio, risulta un punto di forza in molte applicazioni, soprattutto in quelle come il monitoraggio di rilievi franosi, in cui la presenza di cavi da installare in territori impervi costituisce uno degli ostacoli maggiori alla applicazione diffusa dei tradizionali sistemi di monitoraggio cablati.

Tuttavia, perché questo vantaggio derivante dalla comunicazione wireless sia effettivo è necessario che vengano eliminati anche tutti i cablaggi per l'alimentazione, adottando una alimentazione a batteria, tipicamente, o da pannello solare. A questo punto si crea però una nuova problematica connessa alla durata della batteria o alla disponibilità di sufficiente energia per i pannelli. Una riserva energetica limitata o non sufficiente in ogni fase di funzionamento del sistema di monitoraggio, a sua volta, rischia di compromettere un altro punto di forza dei sistemi di monitoraggio automatici, ovvero l'autonomia operativa sul lungo periodo (un anno almeno). È chiaro infatti che se i consumi delle unità di misura della rete wireless sono tanto elevati da comportare un cambio di batteria a breve termine, con conseguenti costi di manutenzione del sistema ed eventuale perdita periodica di funzionalità, si annulla il vantaggio della comunicazione wireless e si compromette la affidabilità del sistema.

Pertanto la minimizzazione dei consumi a bordo delle schede sensori diventa uno dei target in base ai quali si orienta sia la scelta dei componenti hardware che l'architettura firmware sulla unità e software del sistema.

In quest'ottica, in maniera funzionale alla definizione delle specifiche di dettaglio riguardo i requisiti funzionali e alla progettazione del sistema in termini di architetture hardware e software, si è svolta un'ampia campagna di esperimenti in laboratorio, principalmente, ma anche in campo aperto, per determinare alcuni comportamenti chiave nei fenomeni di consumi energetici in nodi e reti wireless in base ai quali fosse possibile individuare degli accorgimenti da adottare per ottimizzare i consumi.

Le attività sono partite da un'analisi delle problematiche dei consumi nelle WSN volte a identificare i punti critici in termini di consumi sia a livello di singola scheda che di rete.

In primo luogo, si presentano le caratteristiche dei consumi energetici tipici a bordo di un'unità accelerometrica lungo un intero ciclo di acquisizione in cui è possibile riconoscere le macrofasi di:

- risveglio dalla modalità Wake-on-Radio (WOR)
- acquisizione dati
- download dati
- ritorno alla modalità WOR.

In Figura 18 viene illustrato l'andamento dei consumi a bordo scheda nel caso che la scheda operi in un tipico scenario applicativo in cui passa ciclicamente attraverso le seguenti fasi, ovvero:

1. parta da una condizione di sleeping (wake on radio, WOR) in cui i consumi sono minimi (66.1 μ A)
2. venga svegliata (wakeup con tempi tipici di 1 s) e resti in attesa di ricevere istruzioni (17.7 mA)
3. acquisisca sotto prefissate condizioni (tempo di acquisizione, rate di acquisizione, etc...) (19.7 mA)
4. calcoli il valor medio dei dati acquisiti (>17.7 mA)
5. provveda alla trasmissione dei dati acquisiti e preelaborati (14.6 mA)
6. al termine del complemento della fase precedente (17.7 mA), ritorni nello stato sleeping (66.1 μ A).

I valori del consumo riportati in Figura 18 e nell'elenco sopra per ciascuna delle fasi e la durata di ciascuna delle fasi stesse sopra illustrate vengono determinati sperimentalmente impiegando:

- per la misura di corrente un multimetro evoluto (FLUCK 287) che offre la possibilità di scaricare le acquisizioni eseguite sotto forma di file .csv
- per la misura delle durate temporali un oscilloscopio (Le Croy WaveSurfer 434 - 350 MHz Oscilloscope 2GB/s).

Si osservi che le misure di corrente relative a intervalli di tempo che in condizioni ordinarie sono estremamente brevi tanto da rendere impraticabile la misura di corrente col multimetro vengono eseguite dilatando artificialmente la durata della fase in esame in modo da consentirne una misura significativa.

Alcune osservazioni circa il contenuto informativo di Figura 18:

- I consumi in fase di sleeping sono di tre ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli nelle fasi attive di funzionamento della unità. Ciò rende realizzabile lo schema applicativo in cui si eseguono acquisizioni di prefissata durata a intervalli prefissati anch'essi, in cui si concentrano le fasi a consumi più elevati, mentre tra un'acquisizione e l'altra i consumi vengono drasticamente contenuti.
- La fase di acquisizione è quella a maggiore incidenza; tenuto anche conto che la durata della fase di download, in cui i consumi sono relativamente alti, è proporzionale alla durata della fase di acquisizione, bisogna valutare oculatamente la scelta della durata della fase di acquisizione.
- Inoltre il consumo della fase di download è anche fortemente funzione della potenza trasmessa wireless; in particolare, in corrispondenza del valore massimo di potenza, può raggiungere circa i 35 mA.
- Le fasi di passaggio, ovvero sveglia e waiting e poi di ritorno allo stato WOR e tra la fase di acquisizione e di download presentano i consumi maggiori, ma hanno una durata prefissata dell'ordine, in totale, di circa 7-8 secondi.
- Bisogna, inoltre, tenere conto del fatto che la fase di WOR non è completamente piatta, come schematicamente riportato in Figura 18, ma che è caratterizzata anch'essa da una successione di fasi di differente entità in termini di consumi. La scheda resta in stand-by con un consumo ridotto a 22 μ A per la gran parte del tempo, mentre si preattiva per 1,5 ms, durante i quali i consumi salgono a 8.2 mA, e successivamente per 2 ms, con consumi a 15.7 mA.

Pertanto il valore di consumo della fase WOR di 66.1 μA riportato in Figura 18 è ottenuto come valore medio di consumo sul ciclo di 1 s.

Sono state poi svolte verifiche di possibili miglioramenti su singola scheda SMAMID, attraverso modifiche sul firmware che prevedano:

- La modifica dello stato inattivo dei pin SPI dell'accelerometro.
- L'aumento della frequenza di lavoro del microcontrollore (per ridurre il tempo di funzionamento in modalità attiva e così ridurre il consumo medio).
- L'aumento del tempo di attesa tra una finestra di ricezione e la successiva nella modalità wake-on-radio (WOR).
- L'accensione di alcune periferiche del microcontrollore solo quando necessarie.
- La possibilità opzionale di spegnere l'interfaccia wireless durante l'acquisizione accelerometrica e/o quando si è in wired.

Si è valutato che quest'ultima è probabilmente la modifica che incide di più sul consumo complessivo nella misura approssimativa dell'80% di energia risparmiata durante l'acquisizione. Ciò che è stato sperimentalmente osservato è che era possibile ridurre i consumi durante il ciclo attivo facendo in modo che

- i LED di segnalazione di stato presenti a bordo scheda fossero tenuti spenti;
- durante la fase di acquisizione la comunicazione wireless fosse tenuta spenta.

Nel primo caso si registra una riduzione di 2 mA nel consumo energetico a bordo della unità SMAMID in tutte le fasi attive, senza alcuna perdita di funzionalità dato che i LED di stato forniscono utili indicazioni sullo stato operativo dell'unità in presenza di operatore in loco, ma sono inutili per un sistema che lavora in remoto. Nel secondo si registra una riduzione significativa da 19.7 a 3.03 mA; di nuovo non si rischia alcuna perdita di funzionalità dato che durante la fase di acquisizione nessuna comunicazione deve giungere o partire dalla unità. Complessivamente quindi il ricorso a questi due interventi ha comportato una riduzione significativa dei consumi.

Per il resto, si è constatato che le impostazioni firmware erano già significativamente orientate all'ottimizzazione dei consumi per cui ulteriori sensibili miglioramenti non erano conseguibili per questa via.

Si sono dunque orientate le attività di ricerca sull'ottimizzazione dei consumi lato WSN, tramite modifiche software di gestione della rete e/o di logica di

funzionamento della rete, eseguendo anche allo scopo specifici test di laboratorio.

Si è rilevato che risultano passaggi dagli effetti importanti sui consumi i seguenti:

- accensione delle unità SMAMID da preferirsi localizzata, ovvero le unità vengono tenute in stand-by e accese solo quando strettamente necessario, secondo lo schema: vengono accese tutte, acquisiscono tutte, vengono spente tutte e poi riaccese singolarmente per il tempo necessario a scaricare i dati;
- ottimizzazione dei tempi di acquisizione in base all'applicazione con la considerazione che ogni unità deve rimanere in acquisizione per un tempo minimo per quanto sufficiente a rilevare il fenomeno di interesse;
- limitazione, per quanto possibile, dell'utilizzo delle configurazioni non a stella.

Specificamente, un primo fronte di intervento è la durata dell'acquisizione: poiché i dati acquisiti vanno mediati e il solo dato mediato viene inviato dalla unità slave al master ovvero al PC per le elaborazioni successive per la determinazione delle variazioni di inclinazione, il solo vincolo sulla durata di acquisizione è che permetta di acquisire un numero significativo di dati per eseguire la media. Con una frequenza di 40 Hz, già in un secondo sono rilevabili 40 campioni da mediare che sono un numero sufficiente. Anche la scelta di operare a 40 Hz piuttosto che a frequenze di acquisizione superiori (essendo disponibili le opzioni 160Hz e 640 Hz) è funzionale alla riduzione dei consumi. Infatti riducendo il numero dei campioni da scaricare si riduce il tempo di download e i consumi relativi. D'altronde di nuovo questa scelta non è lesiva circa il contenuto informativo di interesse derivato dai dati, poiché non è da catturare un comportamento dinamico caratterizzato da un contenuto in frequenza.

In merito poi alla configurazione spaziale della rete in termini di consumi sono stati eseguiti numerosi e diversificati test sperimentali in laboratorio ad hoc che hanno consentito di studiare gli andamenti dettagliati dei consumi in funzione dei parametri della configurazione di rete (distanza tra le unità, interposizione di oggetti di disturbo alla comunicazione wireless, etc.). A livello di rete, è stato possibile operare delle ottimizzazioni nei tempi di interrogazione delle unità slave da parte della master per minimizzare i tempi morti.

Per studiare la dipendenza dei consumi, nella fase di comunicazione wireless, dalla distanza tra le unità accelerometriche comunicanti, si sono dunque svolti

esperimenti in cui, a parità delle altre condizioni (potenza di trasmissione wireless, tipologia di dati trasmessi, peso dei dati, condizioni di acquisizione, etc.), si varia la distanza tra le unità comunicanti e il numero di unità sul ramo singolo. Si studia inoltre come influenzi tale dipendenza l'ambiente di sperimentazione, duplicando le prove svolte in laboratorio con prove analoghe in campo aperto in ambiente con presenza di vegetazione, dato il peso che questo elemento ambientale ha sulla trasmissione dei dati in wireless (assorbimento della radiazione su cui viaggia la comunicazione wireless da parte dell'acqua contenuta nei vegetali).

Sono state eseguite misure di consumi sullo stesso insieme di schede con la stessa configurazione dei parametri di acquisizione che alla fase precedente, ma mutando le distanze tra le schede. In particolare si è scelto di disporre le schede secondo una configurazione di rete a stella. La distanza tra la master e le slave è stata variata tra il valore minimo di due metri fino a un valore massimo di 15 m. Analoghe prove sono state svolte all'aperto in presenza di vegetazione.

Per quanto concerne le prove in laboratorio, svolte lungo un corridoio privo di ostacoli, si è registrato un comportamento variabile a seconda del numero di unità poste su uno stesso ramo per topologia ad albero. Infatti, oltre un numero di 3 unità sul ramo, si registrano variazioni sensibili dei consumi, a causa di alterazioni di trasmissione wireless che richiedono un incremento di potenza trasmissiva, al fine di salvaguardare la trasmissione affidabile dei dati, con conseguente impegno energetico superiore.

Poco regolare il quadro nel caso delle prove all'esterno: qui i comportamenti in consumo energetico sono fortemente condizionati dalla eventuale presenza di ostacoli frapposti tra le unità di tipo vegetale (alberi, cespugli,...). Pertanto in presenza di un tal tipo di ostacoli i consumi energetici crescono sensibilmente anche su distanze relativamente basse e anche in assenza di una topologia ad albero. Si è difatti riscontrato che già sotto i 5 m possono crearsi delle difficoltà di trasmissione dati che influenzano il rate dei consumi. Non è risultato però possibile procedere a una qualche quantificazione sistematica dell'influenza di detti fattori sui consumi.

Nel calcolo della durata prevista teoricamente, ovvero in base ai dati di consumi da datasheet delle componenti elettroniche e/o, laddove eseguite, da misure in laboratorio come sopra descritte, si eseguono calcoli comparati tra duty cycle differenti, ovvero ipotizzando distribuzioni nei tempi di durata delle differenti fasi del ciclo attivo come illustrato in Figura 19 e calcolando il prodotto del tempo

di una fase per il relativo consumo e sommando su tutte le fasi (inclusa il WOR). Conoscendo la carica della batteria è possibile stimare il consumo atteso e la durata del funzionamento autonomo del sistema per una data configurazione di acquisizione.

È ragionevole attendersi che cicli con 1 s di acquisizione e 20 minuti tra un'acquisizione e l'altra, a fronte di un tempo di durata delle batterie stimato di tre anni, si possa essere confidenti in un tempo di durata effettivo di due anni, tenuto conto degli effetti peggiorativi della comunicazione wireless indotti da fattori ambientali presenti in campo e non riproducibili fedelmente in laboratorio e sicuramente peggiorativi delle performance di efficienza di comunicazione wireless.

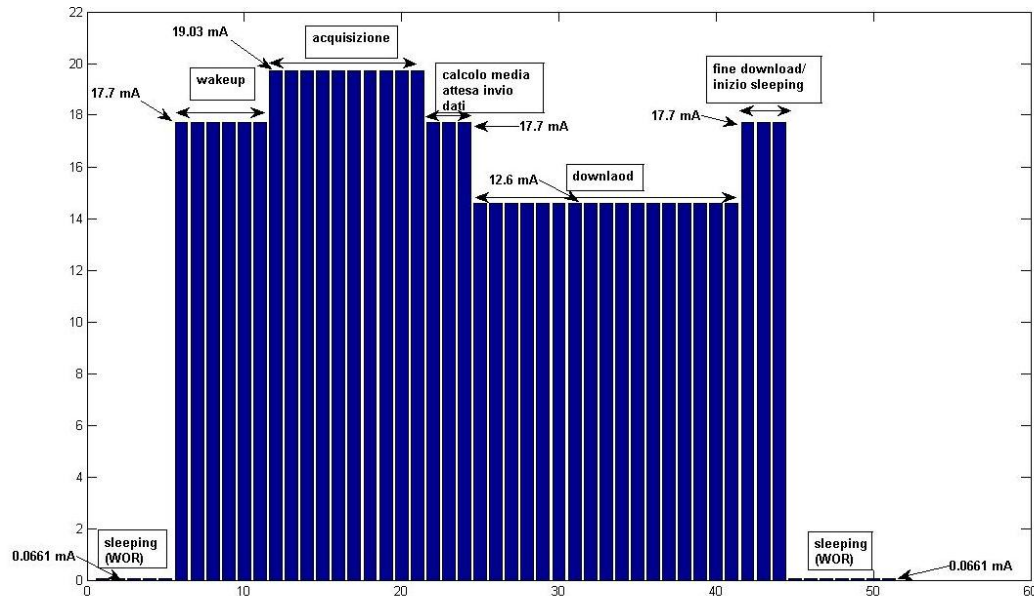


Figura 18. Schema della distribuzione dei consumi durante un ciclo di acquisizione a monte delle modifiche di ottimizzazione dei consumi

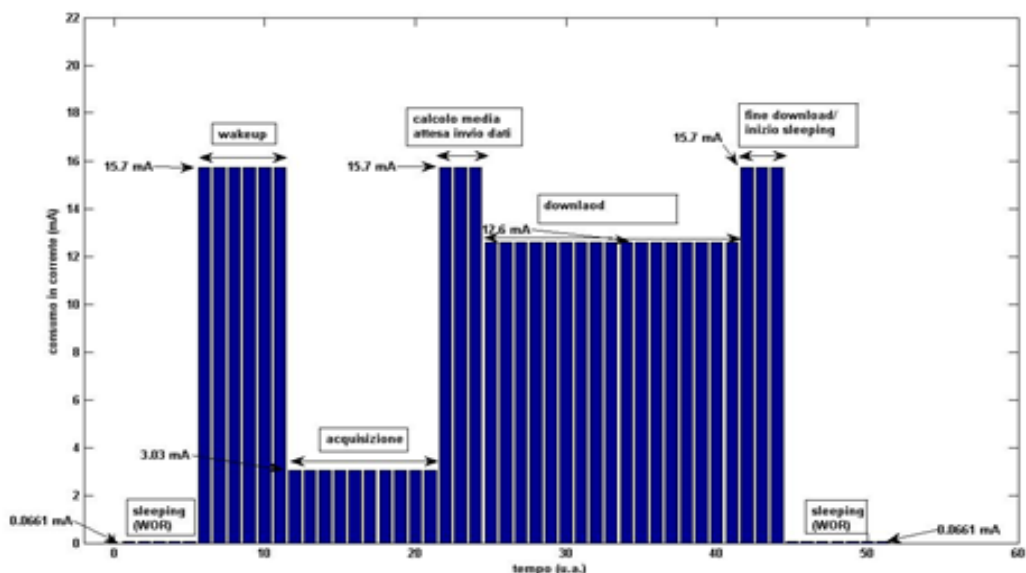


Figura 19. Schema della distribuzione dei consumi durante un ciclo di acquisizione a valle delle modifiche di ottimizzazione dei consumi

5. Sviluppo HW e test di verifica

A valle delle attività di ottimizzazione hardware e firmware del sistema di misura accelerometrica SMAMID, che hanno interessato vari e differenti aspetti funzionali e prestazionali del sistema (sensore accelerometrico, memoria di massa, efficienza energetica a livello hardware, comunicazione di rete, ottimizzazione dei consumi), si è proceduto allo sviluppo di cinque unità SMAMID ottimizzate. Si sono svolti test di verifica di corretto funzionamento globale delle unità sia a livello di singola unità SMAMID che di rete SWAN. A valle degli interventi di ottimizzazione effettuati, erano attesi dei miglioramenti nelle performance dei consumi che incrementassero il livello di autonomia di funzionamento della rete wireless in applicazioni di monitoraggio ambientale in siti impervi, quindi difficilmente raggiungibili da sistemi di monitoraggio cablati.

I test hanno riguardato:

- verifica delle condizioni di comunicazione in funzione delle:
 - variazioni dovute alla rotazione della singola scheda lungo i tre assi;
 - distanza dalla master;

- trasmissione e ricezione di un singolo pacchetto (comando);
- inoltra di un pacchetto in rete (forwarding) ed attesa della relativa risposta;
- testing delle funzionalità di tutti i comandi che contemplano la comunicazione wireless;
- testing ciclico delle funzionalità.

Il test è stato condotto su 50 schede; esse sono state istruite, attraverso il software PC, in modo da eseguire ciclicamente i seguenti comandi:

1. sveglia;
2. cancellazione della memoria RAM;
3. inizializzazione dell'acquisizione;
4. acquisizione per 1 secondo a 40 Hz e calcolo automatico della media;
5. download dei dati mediati;
6. standby in modalità Wake-On-Radio (WOR).

I risultati dei test hanno evidenziato l'affidabilità della comunicazione wireless in ambiente di laboratorio con percentuali di perdita di pacchetti dati molto basse (6%).

Si è inoltre osservato che può talora accadere che, a seguito di invio di un pacchetto con un comando da parte della master alla slave, l'unità slave non restituisca alla master il pacchetto con l'informazione di comando ricevuto. In questo caso, anche se l'unità slave ha correttamente ricevuto ed eseguito il comando inviato dalla master, all'utente risulterà che la unità slave non ha risposto al dato comando. Tuttavia, sarà possibile inferire che in realtà il comando è stato eseguito dalla successione dei processi eseguiti successivamente dalla slave. Ovvero: se a d es risulta che una slave non si è risvegliata, ma successivamente ha acquisito e scaricato i dati, evidentemente si sarà anche svegliata, per cui avrà ricevuto ed eseguito il comando di sveglia inviato dalla master, ma sarà stato perso il pacchetto con l'informazione dell'avvenuta ricezione del comando di sveglia dalla slave alla master.

Per verificare che la risoluzione effettiva dei sensori MEMS sia del centesimo di grado, come teoricamente ricavabile dal fatto che la risoluzione accelerometrica è dell'ordine del mg, si sono effettuati dei confronti sperimentali tra sensori MEMS e sensori inclinometrici tradizionali, che hanno dato riscontri positivi.



Figura 20. Esempio di sistema SWAN (alto sx) come installato presso il laboratorio STRAGO con una unità master (unità sull'armadio a terra, alto dx) e 4 unità SMAMID. Sul PC centrale sono attivi sia il software di controllo e gestione del sistema SWAN che il middleware di comunicazione verso il CAED. Ciascuna unità SMAMID è resa solidale a un supporto metallico (chiodo) da infiggere nel terreno (in basso a dx). Il PC industriale è accompagnato da un modem (dettaglio in basso a sx) tramite cui avviene la trasmissione dati.

6. SVILUPPO SW DI GESTIONE E TEST DI VERIFICA

Si è inoltre effettuata una attività di sviluppo del software di gestione SWAN dedicato esplicitamente al sistema di monitoraggio frane. Sulla base delle specifiche delineate precedentemente, tale software opera secondo le modalità sotto riportate:

- Modalità di acquisizione dati su singolo nodo:
 - ciascun nodo acquisisce ogni T secondi per t secondi in condizioni ordinarie;
 - il PC centrale (o nodo concentratore) può richiedere di modificare i parametri T e t in condizioni di preallarme/allarme.
- Processo di elaborazione dati singolo nodo:
 - ciascun nodo calcola la media di ciascuna componente dell'accelerazione sull'intervallo t e invia il risultato al nodo master che rinvia al PC centrale;
 - il PC centrale calcola l'inclinazione per ogni nodo sensore e le variazioni di inclinazione rispetto all'acquisizione precedente e rispetto a quella di riferimento.
- Confronto dei risultati con soglie di allarme:
 - da PC centrale si esegue il confronto tra dati sperimentali (pattern delle inclinazioni) e valori di soglia definiti su singolo nodo e si identificano condizioni critiche e/o di allarme classificando lo stato del sistema come "normale", "piccole variazioni", "moderate variazioni", "grandi variazioni".
- Modalità di trasmissione dati al nodo concentratore:
 - Vengono inviati al nodo concentratore:
 - i dati grezzi di singola acquisizione;
 - i dati elaborati (pattern di distribuzione delle inclinazioni);
 - allarmi.

Circa l'ultimo punto, ovvero le modalità di trasmissione dati al nodo concentratore (OR5), si rimanda al paragrafo dedicato all'AE 2.2.4 - Comunicazione dati.

Riguardo le caratteristiche di funzionamento del software si può fare riferimento alla Figura 21 in cui è riportato il pannello di controllo principale, osservando che:

- nel riquadro “valori nodo” viene riportato per ogni punto misura o nodo (nel caso in esame quattro nodi) il valore medio della componente dell’accelerazione lungo la direzione x, y, e z oltre che i parametri ambientali temperatura a bordo scheda e valore della tensione di alimentazione
- nel riquadro “percorsi” si distinguono:
 - “file di configurazione” in cui è indicata la posizione del file di configurazione iniziale riguardante il numero e l’indirizzo dei nodi SMAMID;
 - “Dati STRAGO” indicante la posizione del file contenente i dati medi di accelerazione, i parametri ambientali a bordo scheda, i valori calcolati delle inclinazioni, delle variazioni di inclinazione rispetto alla acquisizione iniziale e quella precedente; lo stato del sistema secondo la classificazione sopra riportata;
 - “Dati UNI”, in cui si rimanda al file contenente i dati che verranno resi disponibili al nodo concentratore del sistema Early Warning (OR5).
- Stato processi avvio: viene riportato l’esito dei processi che riguardano l’avvio dell’operatività del sistema secondo lo schema abilitata/errore con una indicazione degli eventuali errori verificatesi.
- Stato processi acquisizione: analogamente al punto precedente si leggono informazioni circa l’esito delle operazioni di acquisizione, dalla sveglia dei nodi alla configurazione della durata dell’acquisizione, dalla attivazione della fase di acquisizione al download dei dati.
- Stato elaborazione e storage: come sopra leggo informazioni sulla riuscita o il verificarsi di eventuali errori nelle operazioni di elaborazione dei dati e del loro immagazzinamento dal salvataggio dei dati grezzi alla loro elaborazione al salvataggio di questi ultimi e al loro storage.
- Stato iniziale slave: è riportato l’elenco delle unità SMAMID attive secondo il singolo indirizzo, lo stato del singolo nodo e la riuscita o meno dell’acquisizione (relativamente all’ultima acquisizione effettuata).
- Stato sistema: si leggono il numero totale di acquisizioni effettuate e quelle riuscite, lo stato generale del sistema (in termini di funzionalità operativa) e l’eventuale presenza di warning attivato da un qualche default in uno dei processi di avvio, acquisizione e elaborazione e storage di un qualsiasi nodo sensore.

- Comandi inviati alle UF (Unità Funzionali): si tratta di informazioni di carattere tecnico destinate a utenti esperti in cui leggono le istruzioni inviate ai nodi progressivamente durante l'intero ciclo di funzionamento.
- Risposta istantanea: si leggono informazioni circa la risposta dei nodi alle istruzioni ricevute; come sopra, si tratta di informazioni dedicate a utente esperto.
- Attesa daq, secondi, durata daq: viene indicata la progressione della durata dell'acquisizione (in Figura 21 settata a 5 s a titolo esemplificativo).
- Master UF: è il nome della porta del PC centrale cui è collegata la unità master.
- Possibilità di settare un nodo e visualizzare le inclinazioni (angoli direttori degli assi x, y e z del riferimento a bordo sensore rispetto alla verticale).
- Stato del sistema rispetto alla misura iniziale e a quella precedente: viene visualizzato lo stato del sistema dal punto di vista del monitoraggio degli spostamenti superficiali secondo la classificazione di cui sopra sia rispetto alla acquisizione iniziale che rispetto a quella precedente.
- Sono inoltre presenti informazioni sull'orario corrente, l'orario di avvio del ciclo di acquisizioni, l'orario dell'ultima acquisizione e della prima, oltre che il nome del PC centrale su cui si opera e l'indirizzo IP di rete.

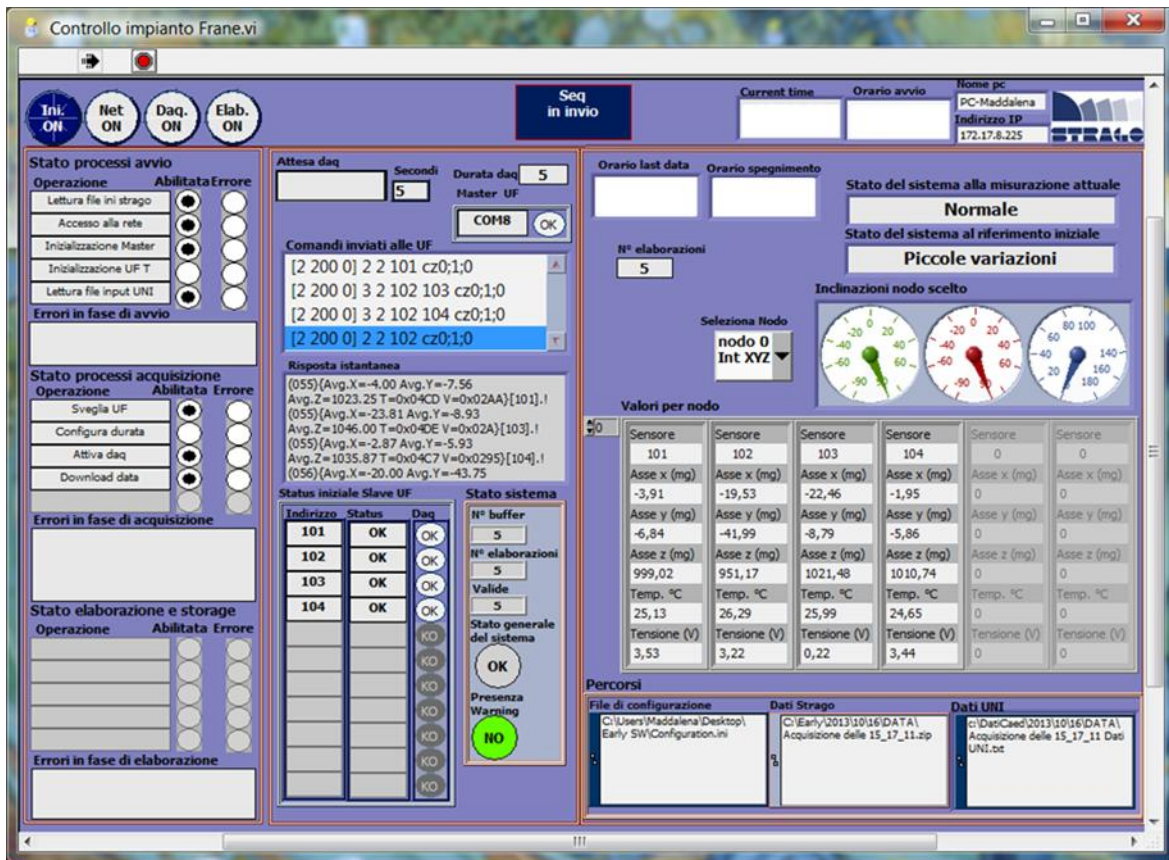


Figura 21. Pannello di controllo del software di gestione del sistema SWAN.

Risulta inoltre possibile modificare la configurazione del sistema SWAN attraverso un software apposito di cui si mostra il pannello di controllo in Figura 22.

Nel riquadro principale viene riportato l'elenco dei nodi SMAMID attivi con l'indicazione dell'indirizzo, dell'unità di misura, del fondo scala, delle direzioni di misura abilitate e del riferimento iniziale in termini di inclinazione. È qui possibile inserire i nodi sensori che si desidera specificando i parametri suddetti. Nel riquadro parametri di acquisizione si specificano la frequenza di acquisizione, la durata, un eventuale tempo di pretrigger, il percorso di salvataggio dati, etc... Nei "parametri tempo" si può settare un orario di spegnimento e uno di accensione del sistema e indicare se il sistema debba essere nel frattempo sempre acceso.

Nei “parametri di comunicazione” si indica la porta per la comunicazione col nodo concentratore e il percorso per i dati destinati al CAED.

> **6.1 Definizione della logica di interpretazione dell’insieme dei dati**

Il riquadro “soglie di riferimento” è di vitale importanza per impostare i criteri quantitativi in base ai quali si procede alla classificazione dello stato del rilievo franoso monitorato: si distinguono, nel particolare caso, tre livelli di soglia i cui valori numerici sono modificabili, e corrispondentemente il numero di sensori relativi a detta soglia. Vengono poi specificati i criteri di classificazione dello stato in base alla combinazione tra valori di soglia di un certo livello e numero di sensori che superano detto livello di soglia. A titolo esemplificativo: se n_1 (prima riga del numero di sensori) sensori superano la soglia 1 (essendo la soglia 2 maggiore della soglia 1) allora lo stato è di “piccole variazioni”; se n_2 sensori superano la soglia 2, minore della soglia 3, allora lo stato è di “moderate variazioni”, se n_3 sensori superano la soglia 3 lo stato è di “grandi variazioni”; sotto la soglia 1 lo stato è “normale”. Naturalmente questi criteri di determinazione dello stato sono suscettibili di modifica, specie in vista delle sperimentazioni in campo che potranno fornire indicazioni utili a definire sia i valori numerici delle soglie che le combinazioni tra soglie e numero di sensori.

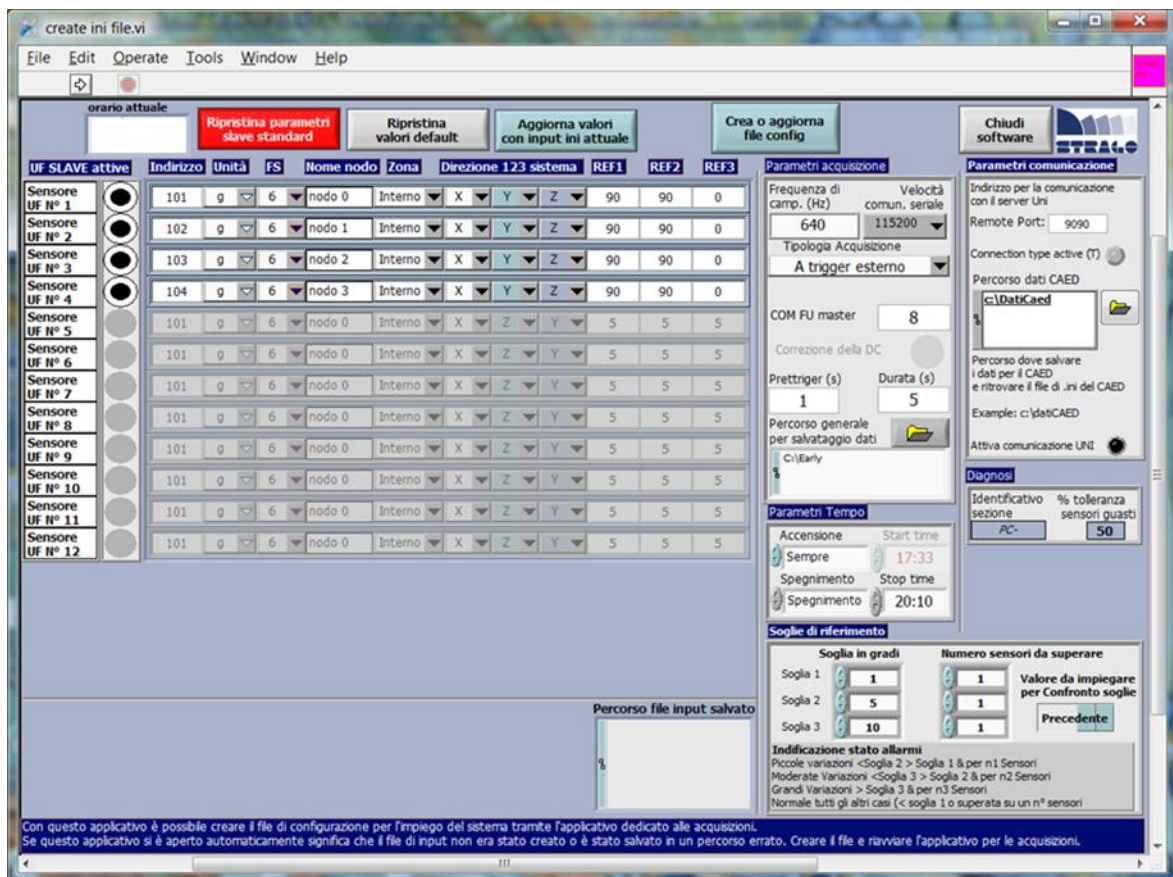


Figura 22. Pannello di controllo per la creazione del file di configurazione.

7. INDAGINI PRELIMINARI PER LE INSTALLAZIONI SUI SITI DIMOSTRATORI

Sono state, infine, avviate attività di conoscenza dei siti dimostratori (OR1) per la gestione della realizzazione dei prototipi da impiegare in campo. In particolare, si è valutato che è importante ai fini della pianificazione delle attività di installazione della rete SWAN appurare se il sito:

- sia impervio al punto tale da richiedere l'impiego di personale specializzato per la installazione;
- offra la possibilità di usufruire di un collegamento alla rete elettrica o non si debba piuttosto prevedere anche un dispositivo di alimentazione quale un pannello solare;
- veda connessi rischi di furto o vandalismo.

Allo stato attuale, comunque, in cui non sono ancora definiti in maniera precisa i siti oggetto di attività dimostrativa, non è possibile ancora definire i suddetti punti.

Sono stati, infine, concordati i sistemi SWAN attivi sui siti dimostratori (OR9):

- relativamente al TAS della A3 tra Cosenza Sud e Altilia, dove sono previste due installazioni su due subunità distinte in località Garcito-Piano d'Infante, una a valle della carreggiata con 4 unità SMAMID e una con 6 unità SMAMID.
- Sulla A18 (Messina-Roccalumera) dove sono previste due unità SMAMID sulla UGM2 al Km 2,8.
- Sulla A16, invece, è in via di definizione la collocazione del sistema SWAN.

Pare ragionevole ipotizzare che sui siti dimostratori non sarà possibile accedere alla rete elettrica per cui si dovrà corredare ciascun sistema SWAN con un sistema di alimentazione autonomo a pannelli solari.

Valutazione dell'applicabilità della metodologia e del sistema di monitoraggio SMAMID per lo studio e il monitoraggio dell'evoluzione dei fenomeni franosi

Si è svolto uno studio di approfondimento dello stato dell'arte dei sistemi di monitoraggio di rilievi franosi orientando l'analisi della documentazione alla finalità del monitoraggio (l'evoluzione del fenomeno franoso oltre che l'individuazione delle condizioni di allerta/allarme). Tale studio prevede le seguenti attività:

- Ricerca bibliografica sulla strumentazione geotecnica per il monitoraggio frane.
- Ricerca bibliografica e analisi critica sulle tecniche di monitoraggio frane con particolare riferimento alle finalità di monitoraggio.
- Ricerca bibliografica e analisi critica su alcune tecnologie di avanguardia nel monitoraggio frane.
 - il laser scanner
 - inclinometri a tecnologia MEMS e il caso del sistema inclinometrico sviluppato dall'Università di Ferrara
 - l'interferometria
- Studio critico di alcuni casi notevoli di monitoraggio frane:
 - gestione delle reti di controllo ARPA Piemonte
 - centro di monitoraggio geotecnico ARPA Lombardia
 - fenomeni franosi nella provincia di Treviso
 - dissesti nella Regione Calabria (Serra di Buda e San Luca).

1. TECNICHE DI MONITORAGGIO FRANE CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLE FINALITÀ DI MONITORAGGIO

> 1.1 Le frane superficiali

Questa tipologia di pericoli naturali si pone in stretta relazione con eventi meteorologici severi caratterizzati da piogge di forte intensità. Le frane si sviluppano con maggior frequenza in ambiente prealpino ed in zone collinari,

coinvolgendo per lo più limitate porzioni di terreni sciolti della copertura superficiale che le acque di infiltrazione hanno portato alla saturazione[1].

La particolare pericolosità di questi fenomeni è da mettere in relazione con la loro velocità e rapidità di sviluppo e con la difficoltà di prevederne l'ubicazione, ma anche con l'elevata densità di distribuzione dei singoli fenomeni, le cui traiettorie di discesa sul versante hanno così una notevole probabilità di interferire con aree antropizzate. Processo naturale tra i più veloci, la frana per mobilitazione delle coltri superficiali si attiva e si esaurisce nello spazio di pochi minuti, a volte qualche decina di secondi.

È interessante osservare come, dove la presenza di un reticolato idrografico minimamente sviluppato lo consenta, il materiale franato, incanalandosi in alveo, assuma le caratteristiche cinematiche di una vera e propria lava torrentizia.

Descrizione del fenomeno

Si tratta di fenomeni che si caratterizzano per:

- spessori (s) e volumi (v) molto modesti; s: da decine di cm fino a 150 cm; v: da qualche metro cubo a qualche centinaio di metri cubi;
- elevato numero di fenomeni in aree relativamente circoscritte che può arrivare sino a qualche migliaia;
- elevata densità di singoli fenomeni per unità di superficie (circa 200 frane/km², Langhe novembre 1994).

Tali fenomeni mostrano una frequente tendenza a:

- coalescenza delle nicchie di distacco e/o degli accumuli (aggregazione anche di diverse decine di singole frane);
- trasferimento degli accumuli nella rete idrografica minore (quindi innesco e/o esaltazione dei fenomeni di trasporto in massa torrentizio);
- elevate velocità di movimento (anche maggiori di 50 km/h) che si traducono in elevata energia di impatto con gli edifici (4 vittime a Serravalle Scrivia (AL), ottobre 1977; 18 vittime a Tresenda (SO), maggio 1983; 11 vittime a Tartano (SO), luglio 1987; 14 vittime a Varallo Sesia (VC), novembre 1994);
- traslazione ed arresto dell'accumulo oltre il piede del versante, su terreno pianeggiante;
- forte condizionamento da parte delle piogge intense;
- mancanza o quasi di indizi premonitori;
- azione morfogenetica scarsamente incisiva sull'assetto originario dei versanti;

- bassissima probabilità di riattivazione nel luogo di precedente innesco, ma alta probabilità di accadimento di nuovi fenomeni in aree immediatamente adiacenti.

La maggior frequenza degli inneschi si osserva su versanti caratterizzati da inclinazione compresa tra 25° e 35°, generalmente privi di copertura arborea o con vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione, di norma utilizzati a prato-pascolo e coltivi (nel caso delle Langhe soprattutto vigneti). Le nicchie si localizzano frequentemente nelle parti alte del pendio in corrispondenza di cambi bruschi di inclinazione (da meno ripido a più ripido) o in prossimità di orli di scarpate naturali o di terrazzamenti antropici. Sebbene siano discretamente diffusi i fenomeni localizzati anche su pendio rettilineo aperto, una distribuzione assai frequente e caratteristica è quella che si osserva all'interno degli impluvi, dove si possono osservare concentrazioni molto elevate di frane disposte tipicamente a raggiera, convergenti verso il centro dell'impluvio (figura 23 e figura 24). Sull'innesco dei fenomeni, e quindi sulla loro localizzazione, non devono essere sottovalutati i condizionamenti antropici, sostanzialmente riconducibili alla mancata o insufficiente regimazione delle acque di ruscellamento e di sgrondo in aree antropizzate o lungo la rete viaria.

I fenomeni franosi coinvolgenti la coltre superficiale sono contraddistinti da movimenti schematizzabili in due fasi principali: innesco della frana e mobilitazione del materiale. La fase di innesco generalmente avviene secondo meccanismi di tipo traslativo o rotazionale. Nella fase di mobilitazione la massa spostata percorre rapidamente il versante, conservandosi più o meno integra oppure destrutturandosi completamente (colamento) a seconda delle caratteristiche mineralogiche, geotecniche ed idrogeologiche dei terreni coinvolti, della loro copertura vegetale e delle condizioni topomorfe del pendio sottostante.

Un tentativo di classificazione delle frane superficiali nel contesto collinare delle Langhe (Regione Piemonte, 1998) ascrive questi fenomeni a cinque categorie, riconoscibili in base alle caratteristiche del movimento iniziale ed al grado di destrutturazione della massa spostata:

- tipo A) porzioni della coltre di alterazione superficiale che, seppur delimitate e scomposte da fratture, non hanno subito movimenti tali da esporre la superficie di rottura. Risulta evidente solo l'incipiente sovrascorrimento del bordo inferiore della massa spostata sul piano campagna – incipient translational soil slide (Varnes, 1978);

- tipo B) porzioni della coltre di alterazione superficiale che hanno subito traslazioni di entità tale da esporre la superficie di rottura. La massa spostata, nella sua parte preservata, è costituita da zolle disunite che hanno mantenuto singolarmente la loro integrità grazie all'effetto coesivo svolto dagli apparati radicali – translational soil slide (Varnes, 1978);
- tipo C) porzioni della coltre di alterazione superficiale che, a seguito del movimento iniziale e della successiva destrutturazione della massa spostata, degenerano in colata. Al movimento della massa spostata è spesso associata un'attività erosiva con conseguente presa in carico di altro materiale. L'accumulo, di norma in forma lobata, è in genere ben identificabile – earth flow (Varnes, 1978);
- tipo D) porzioni della coltre di alterazione superficiale che, a seguito della traslazione iniziale e della destrutturazione della massa spostata, degenerano in colata estremamente fluida, con trasporto del materiale in sospensione. Il flusso si dispone su un'ampia sezione laminare e progredisce con scarso attrito sul piano campagna senza dar luogo a forme erosive. Generalmente non si osserva una zona di accumulo in quanto il materiale viene completamente disperso lungo il percorso – disintegrating soil slip (Kesseli, 1943);
- tipo E) si tratta di frane riferibili ai tipi B, C e D, innescate su scarpate a pendenza elevata o molto elevata (superiore a 30°), direttamente incombenti sugli alvei torrentizi. Durante il movimento la massa spostata, a causa dell'elevata velocità e del contenuto in acqua, viene generalmente destrutturata. L'accumulo non è visibile in quanto asportato e preso in carico dal corso d'acqua.

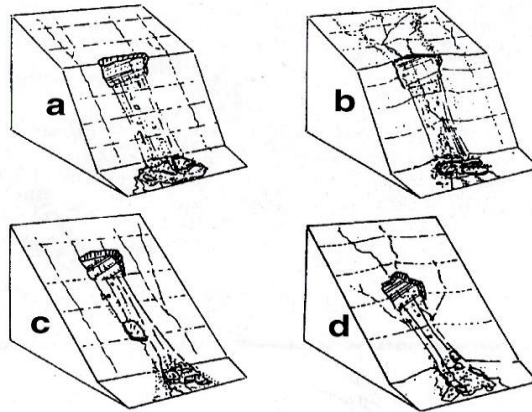


Figura 23. Schema dei differenti contesti geomorfici nella localizzazione delle nicchie di frana (in Regione Piemonte, 1998): a) pendio piano caratterizzato da una significativa variazione di pendenza. La zona di innesco del movimento si colloca immediatamente a valle del tratto meno acclive; b) pendio caratterizzato da una debole concavità generale e da una significativa variazione di pendenza. La zona di innesco del movimento si colloca immediatamente a valle del tratto meno acclive; c) pendio continuo; d) pendio continuo, caratterizzato da una debole concavità generale

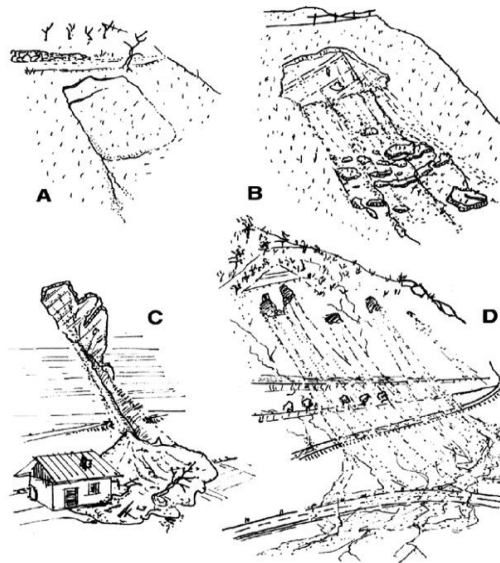


Figura 24. Schema delle tipologie A, B, C, D di frana per saturazione e fluidificazione dei terreni sciolti superficiali (in Regione Piemonte, 1998)

1.1.1 Descrizione del metodo: l'approccio alla valutazione della pericolosità

Ogni valutazione di pericolosità e rischio deve necessariamente partire da studi specifici sul fenomeno franoso che ne individuino le caratteristiche geometriche, fisico-meccaniche, cinematiche e le condizioni al contorno. In letteratura, la modellazione delle frane superficiali viene affrontata seguendo diverse impostazioni (Crosta et al., 2001 con bibliografia):

- con tecniche statistiche multivariate;
- mediante approcci deterministici basati su modelli meccanico-idrologici;
- mediante metodi euristici, attraverso valutazioni empiriche delle soglie di innesco sulla base di dissesti osservati.

Per la valutazione della pericolosità assoluta dei fenomeni franosi della coltre superficiale su aree estese è opportuno il ricorso a modelli che, convenientemente gestiti nell'ambito di un Sistema Informativo Geografico, siano un valido strumento di sintesi fenomenologica e rispondano al requisito di semplicità di implementazione e utilizzo.

Alla base dei modelli c'è il concetto di verosimiglianza: si cerca di ricostruire un fenomeno, un processo o un effetto nella maniera più conforme alla realtà, adottando approcci semplificati. Proprio per la natura intrinsecamente semplificata, i modelli, siano essi fisici, numerici, deterministici, empirici o statistici, riducono il grado di complessità della realtà affinché possa emergere più chiaramente quanto si vuole rappresentare. Nello studio delle frane superficiali e più in generale di tutti i processi naturali, l'impiego di modelli nasce dall'esigenza di rispondere innanzi tutto alle classiche domande perché accadrà? (ad esempio risposta meccanica), come accadrà? (intensità), dove accadrà? (componente spaziale) e quando accadrà? (componente temporale).

Sfortunatamente, la predizione di dove e quando non sempre è possibile. Questo non solo è particolarmente evidente nel caso di frane, ma anche per altri fenomeni naturali, per esempio i terremoti. La ragione del perché è difficile predire dove e quando accadrà un fenomeno naturale è che tali risposte dipendono dalla conoscenza esatta di un numero di parametri e di condizioni al contorno che sono noti molto approssimativamente. La scelta di un modello deve basarsi innanzi tutto sull'obiettivo che si vuole perseguire e sulla difficoltà nel reperire tutti gli ingredienti necessari al suo funzionamento.

Tale requisito condiziona fortemente il modello prescelto poiché anche solo l'estensione della zona di studio non permette di utilizzare modelli meccanici troppo complessi, per i quali sono necessari parametri difficili da determinare,

come quelli idrologici e meccanici. Infatti la loro individuazione richiede un notevole onere in termini di tempo (e quindi di costi) e di affidabilità dei risultati, senza trascurare inoltre l'oggettiva difficoltà di estrapolare conclusioni puntuali ad un dominio di studio molto più ampio.

Esiste comunque anche la possibilità di effettuare una previsione senza una comprensione della natura del fenomeno, come nel caso dei fenomeni ripetitivi. Ad esempio, nel caso di frane ricorrenti dal punto di vista spaziale e temporale, come sono le frane superficiali, se sono disponibili dati storici, è possibile trovare una relazione tra il verificarsi della frana ed alcuni elementi descrittivi del territorio (fisici, meccanici, ambientali, ecc.). In ogni caso, qualunque sia l'approccio seguito, la risposta di un modello è caratterizzata da incertezze non eliminabili. Il grado di incertezza che si è disposti ad accettare è funzione non solo della domanda formulata dall'autorità decisionale, ma anche del tipo di problema e della sua estensione.

Per superare almeno l'incertezza sulla variabilità spaziale sia dei parametri di ingresso sia dei risultati, sono state sviluppate metodologie che prevedono l'integrazione di modelli previsionali in ambiente GIS.

La dipendenza diretta tra piogge e inneschi delle frane superficiali e la disponibilità di un elevato numero di informazioni su tali fenomeni, ha indirizzato la scelta verso metodi deterministici basati su modelli meccanico-idrologici (white box models) in cui i fattori dinamici di innesco delle frane sono esplicitamente presi in considerazione (piogge, uso del suolo). Tali approcci accoppiano generalmente un modello di stabilità all'equilibrio limite e un modello idrologico.

Le cause d'innesco delle frane superficiali vengono ascritte generalmente alle seguenti modalità:

- 1) l'infiltrazione verticale dell'acqua genera una falda temporanea al contatto con il substrato meno permeabile sottostante. Il conseguente aumento della pressione dei pori rende instabile il pendio. Tipico approccio è quello sviluppato da Montgomery & Dietrich (1994) che hanno messo in evidenza che le frane superficiali si originano con maggiore frequenza nelle aree dove si verifica convergenza del deflusso sub-superficiale. Il metodo proposto si basa sulla valutazione della capacità di ogni elemento in cui è discretizzata la zona di studio di smaltire il contributo d'acqua proveniente da monte, in condizioni di stazionarietà del flusso;
- 2) il materiale della coltre è considerato non saturo prima della precipitazione piovosa e quindi avente una coesione apparente dovuta alla suzione;

l'infiltrazione verticale dell'acqua causa la riduzione della suzione e la conseguente riduzione della coesione apparente. Tipico approccio è quello recentemente sviluppato da Iverson (2000) e Baum et al. (2002) che individuano i meccanismi di interazione tra terreno e infiltrazione, valutando gli effetti del comportamento transitorio della pioggia sulle variazioni della pressione dei pori nella coltre e, in ultima analisi, su tempi e localizzazione delle frane superficiali.

L'approccio descritto al punto 1 può essere adottato nel caso di frane superficiali di limitato spessore in cui la superficie di rottura è posta in corrispondenza del contatto tra il suolo e il substrato. Il secondo approccio pur descrivendo con estremo dettaglio, cioè alla scala che è loro propria, i fenomeni in esame, è difficilmente applicabile su ampie aree, proprio per l'intrinseca complessità dei processi che intende modellare. Esso richiede infatti un notevole sforzo nel dettagliare e regionalizzare le numerose variabili dal punto di vista:

- economico e temporale;
- della significatività dei parametri di ingresso;
- della rappresentatività dei risultati.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, pur ritenendo che la risposta fornita dall'approccio non stazionario sia generalmente più rigoroso, si ritiene che una risposta tuttora valida, coerente con i requisiti richiesti per l'applicazione di una metodologia di valutazione della pericolosità su larga scala, sia rappresentata dal metodo proposto da Montgomery & Dietrich che accoppia ad un modello di stabilità all'equilibrio limite del pendio infinito, un modello idrologico stazionario.

1.1.2 Descrizione del metodo: il modello meccanico-idrologico

Il modello di Montgomery & Dietrich combina il classico modello all'equilibrio limite per la stabilità dei versanti ad un modello idrologico. Esso prevede la discretizzazione del dominio di studio in celle elementari per ciascuna delle quali sono note le variabili ed i parametri in ingresso. Le ipotesi alla base della formulazione del modello sono le seguenti:

- pendio infinito;
- superficie di rottura piana parallela al pendio e localizzata al contatto tra coltre detritica alterata superficiale e substrato (roccia o deposito quaternario);

- criterio di resistenza del terreno alla Mohr - Coulomb espresso in termini di tensioni efficaci;
- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di drenaggio profondo e di flusso nel substrato.

Nella formulazione originaria di Montgomery & Dietrich, lo scopo era essenzialmente lo studio dell'influenza della topografia sull'innescò delle frane superficiali. Il modello infatti permette di verificare la stabilità di ogni singola cella in cui è discretizzato il dominio di studio, utilizzando variabili e parametri. Le variabili sono gli attributi che derivano dalla topografia e dalla morfologia: inclinazione del versante, area di drenaggio e larghezza di deflusso e sono, in generale, diverse per ognuna delle celle considerate e derivate automaticamente dal Modello Digitale del Terreno (DTM). I parametri sono le grandezze fisico-meccaniche che devono essere attribuite alla coltre superficiale: spessore, peso di volume, parametri di resistenza al taglio, conducibilità idraulica e altezza di pioggia infiltrata. Il modello determina, per ogni elemento, la quantità d'acqua infiltrata necessaria a rendere unitario il Fattore di Sicurezza, cioè a dire, ad instabilizzare la cella.

Avendo poi a disposizione un modello di infiltrazione, come ad esempio quello di Green & Ampt (1911), sì da determinare la precipitazione a partire dall'acqua infiltrata e un modello regionale delle piogge, è possibile relativizzare il risultato, associando un tempo di ritorno. In questo modo si determina la componente spaziale e temporale della pericolosità, anche se solo per quest'ultima è possibile fornire una probabilità. L'applicazione di tale approccio prevede la partecipazione di molte figure professionali: ingegneri idraulici e geotecnici, geologi, esperti in Sistemi Informativi Geografici e pedologi. Proprio questi ultimi si sono rivelati fondamentali nell'attribuzione di alcune proprietà dei suoli.

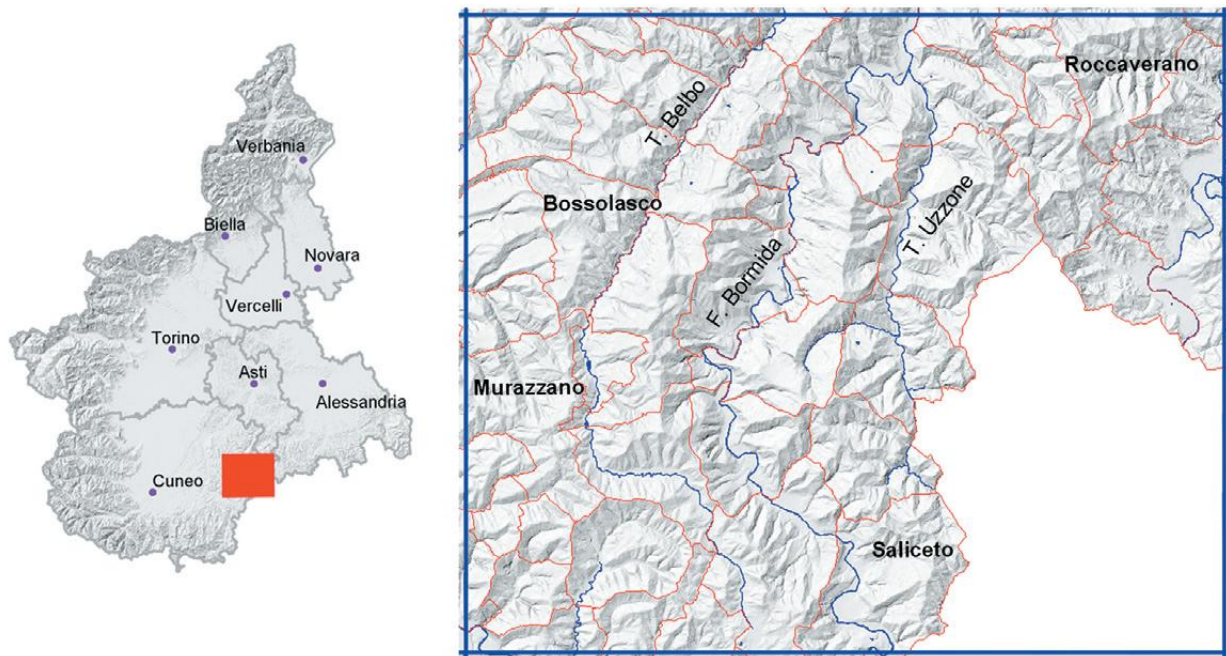


Figura 25. Ubicazione del foglio Dego

Esempio di applicazione: l'esperienza del progetto CARG per la redazione di una cartografia tematica di pericolosità nelle componenti spaziale e temporale

1.1.3 Il progetto

Le carte della pericolosità per instabilità dei versanti Frane per scivolamento planare e Frane per mobilizzazione della coltre superficiale, in scala 1:50.000, sono state realizzate nell'ambito del programma CARG (L. 438/1995) tramite convenzione tra l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT) e Arpa Piemonte.

Le attività inerenti la predisposizione della Carta della Pericolosità, inserite nel contesto di uno specifico Progetto Speciale denominato Eventi Alluvionali in Piemonte, hanno preso in considerazione il territorio piemontese contenuto entro i limiti del Foglio IGM 1:50.000 n. 211 Dego. Il criterio ispiratore dello studio è stato quello di aumentare l'affidabilità delle metodologie volte alla valutazione della pericolosità, riducendo il margine di aleatorietà connesso sia alla scelta dei parametri di ingresso, sia alla variabilità delle misure. La conoscenza approfondita del fenomeno da parte delle diverse discipline coinvolte, ha

permesso di individuare gli elementi che risultavano più significativi nella schematizzazione del processo di instabilità.

1.1.4 Il settore di indagine

Il dominio di studio (470 km² circa) coincide con la porzione di pertinenza piemontese di superficie topografica rappresentata nel campo cartografico del Foglio n. 211 Dego alla scala 1:50.000. La carta è inquadrata nel sistema ED 1950 e rispetta il taglio definito dall'I.G.M. L'area in esame, comprende un settore importante del Bacino Terziario Piemontese (Langhe), caratterizzato generalmente da un paesaggio collinare a valli asimmetriche, aventi i fianchi costituiti da un versante lungo con debole inclinazione conforme alla stratificazione generale disposta secondo la direzione NE-SW ed immersione NW e da uno opposto, spesso molto ripido ed inciso sulla testata degli strati appartenenti a serie litologiche di età tardo-miocenica, nelle quali prevalgono sedimenti marnoso-siltosi ed arenaceo-sabbiosi in successioni ritmiche. Le linee essenziali dell'assetto geomorfologico sono fondamentalmente controllate dalla litologia e dalla struttura tettonica. Le unità litologiche risultano interessate da un sistema di fratture con diffusione regionale e direzione prevalente NW-SE e SW-NE. Lo spartiacque tra i corsi d'acqua padani e tirrenici non coincide esattamente con il limite regionale nel tratto sud-orientale del Foglio. Sui due rispettivi versanti della displuviale, la struttura della rete idrografica assume un'articolazione differenziata. Il versante Tirrenico, la cui pendenza dallo spartiacque alla costa supera spesso il 20%, presenta una rete idrografica con andamento tipico a pettine con brevi corsi d'acqua. Nel tratto del Foglio Dego, il versante Padano evidenzia acclività meno pronunciate, mediamente inferiori al 5%. I principali corsi d'acqua che lo solcano da NW verso SE, Torrente Belbo, Fiume Bormida, Torrente Uzzone, pertinenti il bacino del Fiume Tanaro, hanno orientamenti prevalenti da SW verso NE con fondovalle generalmente piani per gran parte soggetti a processi di modellamento fluviale.

Le quote massime raggiunte dai rilievi sfiorano i 1.000 m, mentre i valori medi più ricorrenti si collocano nell'intervallo 400-600 m.

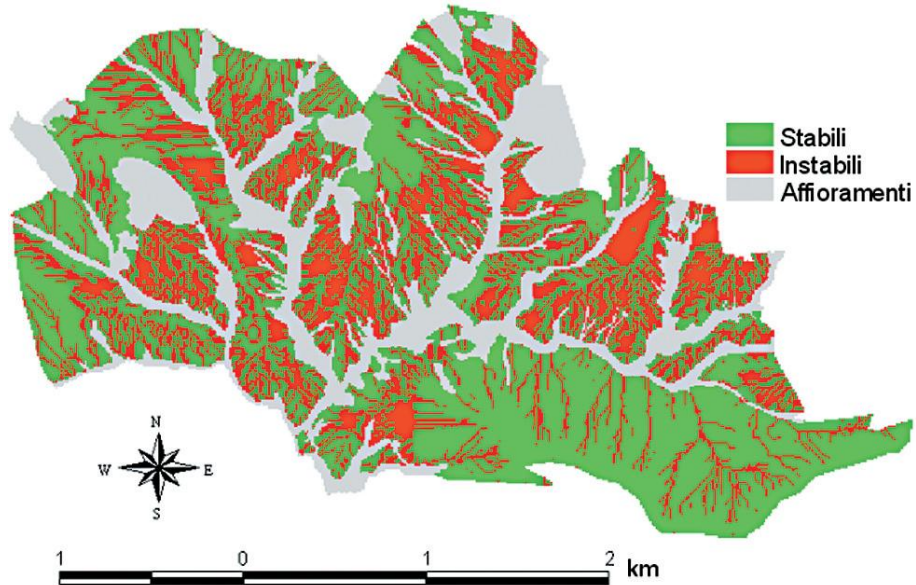


Figura 26. Sperimentazione del modello meccanico-idrologico in contesto alpino: simulazione dell'evento Alluvionale dell'agosto 1978 nel bacino del torrente Melezza Orientale, alta Val Vigizzo (VB)

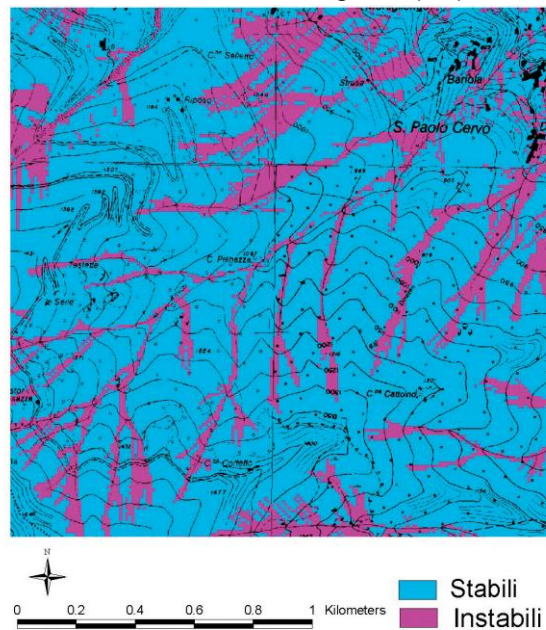


Figura 27. Sperimentazione del modello meccanico-idrologico in contesto alpino: simulazione dell'evento alluvionale del giugno 2002 in Valle Cervo (BI)

1.1.5 Il processo in sintesi: dai dati di base all'allestimento cartografico

Il processo di valutazione della pericolosità è stato interamente governato in ambiente GIS ed è stato ricondotto ad uno schema consolidato già sperimentato con successo per una serie di studi a scala territoriale svolti in precedenza dal Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte (figura 28 e figura 29). Il nucleo dell'intero processo è rappresentato dal modello meccanico-idrologico di stabilità di Montgomery & Dietrich. I dati che alimentano il modello, ciascuno strutturato in un livello informativo indipendente per poter essere processato in ambiente GIS, sono raggruppabili in tre classi:

- parametri fisico-meccanici;
- variabili topografiche;
- parametri idrologici.

Da un punto di vista metodologico il processo si può riassumere nelle seguenti fasi (figura 28):

- 1) raccolta dei dati di base;
- 2) discretizzazione del dominio di studio in celle con maglia avente il passo desiderato (10 m di lato);
- 3) acquisizione e strutturazione dei dati di ingresso, al fine di rendere le informazioni fruibili in un GIS; attribuzione dei dati grezzi alle unità elementari di riferimento (unità pedologiche e di uso del suolo) ed infine alle celle; pre-elaborazione dei dati grezzi per strutturarli nelle informazioni necessarie al modello;
- 4) implementazione modellistica degli algoritmi di calcolo;
- 5) test e taratura del modello;
- 6) filtraggio e riduzione alla scala di rappresentazione prescelta;
- 7) produzione ed allestimento della carta.

Le fasi 1 e 2 riguardano la raccolta e strutturazione dei dati di base grezzi in ambiente GIS, derivanti da diverse tipologie di fonti: dati misurati puntualmente e spazializzati (piogge, precursore meteorologico), dati acquisiti appositamente attraverso sistematiche indagini di terreno (studi pedologici, geologici, geomorfologici e sull'uso del suolo), dati di base acquisiti da altri soggetti (topografia e DTM). Nella fase 3 i dati grezzi vengono preprocessati per strutturarli nelle informazioni necessarie ad alimentare il modello (pioggia infiltrata, variabili topografiche, parametri fisico-meccanici). Contestualmente vengono implementati in ambiente geografico gli algoritmi del modello di

pericolosità (fase 4). Nello specifico l'ambiente di sviluppo scelto è l'Avenue di ESRI© Arc-View 3.x. Nella fase 5 viene ricostruito lo scenario dissestivo dell'evento alluvionale di riferimento e vengono calcolate le altezze di pioggia critica di innesco delle frane superficiali. Se il risultato del confronto tra scenario reale e scenario prodotto dal modello è positivo si arriva alla fase finale di produzione della carta di pericolosità, previa applicazione di opportune tecniche di filtraggio (fase 6) al fine di convertire i risultati dalla scala 1:10.000, corrispondente alla scala di esecuzione della simulazione, alla scala prescelta di rappresentazione della carta (ad esempio 1:50.000); diversamente occorre procedere ad una taratura del modello verificando la correttezza dei dati in ingresso e la plausibilità delle ipotesi assunte.

I risultati: zonazione del territorio indagato in classi a differente connotazione di pericolosità

Conclusioni

L'esperienza maturata negli anni in seno al Centro Regionale per le Ricerche Territoriale Geologiche di Arpa Piemonte in termini di applicazione, per diversi contesti morfologici, di un modello meccanico-idrologico di valutazione della pericolosità, ha consentito di sviscerare limiti e vantaggi di tale approccio metodologico. I limiti più evidenti sono:

- l'accuratezza del DTM, in base al quale vengono derivate le variabili morfometriche del versante; superabile utilizzando un DTM di dettaglio;
- la consistenza numerica e spaziale delle misure di terreno, specialmente quando il dominio di studio è esteso, superabile o con una scelta oculata dell'ubicazione delle prove oppure adottando semplificazioni;
- l'ipotesi di stazionarietà del flusso di infiltrazione, superabile con l'adozione di modelli non stazionari, più completi, ma più complessi.

In ogni caso tale modello risulta vantaggioso a fronte delle seguenti considerazioni:

- si tratta di un metodo studiato, conosciuto e universalmente accettato;
- è di facile implementazione e richiede la conoscenza di relativamente pochi parametri;
- fornisce risultati accettabili in rapporto ai bassi costi di realizzazione della base dati che richiede;
- modella bene processi legati ad eventi meteorologici di lunga durata.

Quanto esposto nel § 2.4 costituisce una sintesi del lavoro d'équipe svolto per la redazione della Carta della Pericolosità per Instabilità dei Versanti in scala 1:50.000 del Foglio 211 Deگو, e delle relative Note Illustrative, attualmente in fase di stampa. Si ringraziano pertanto tutte le persone che, a vario titolo, hanno partecipato al lavoro, senza le quali non sarebbe stato possibile il presente contributo.

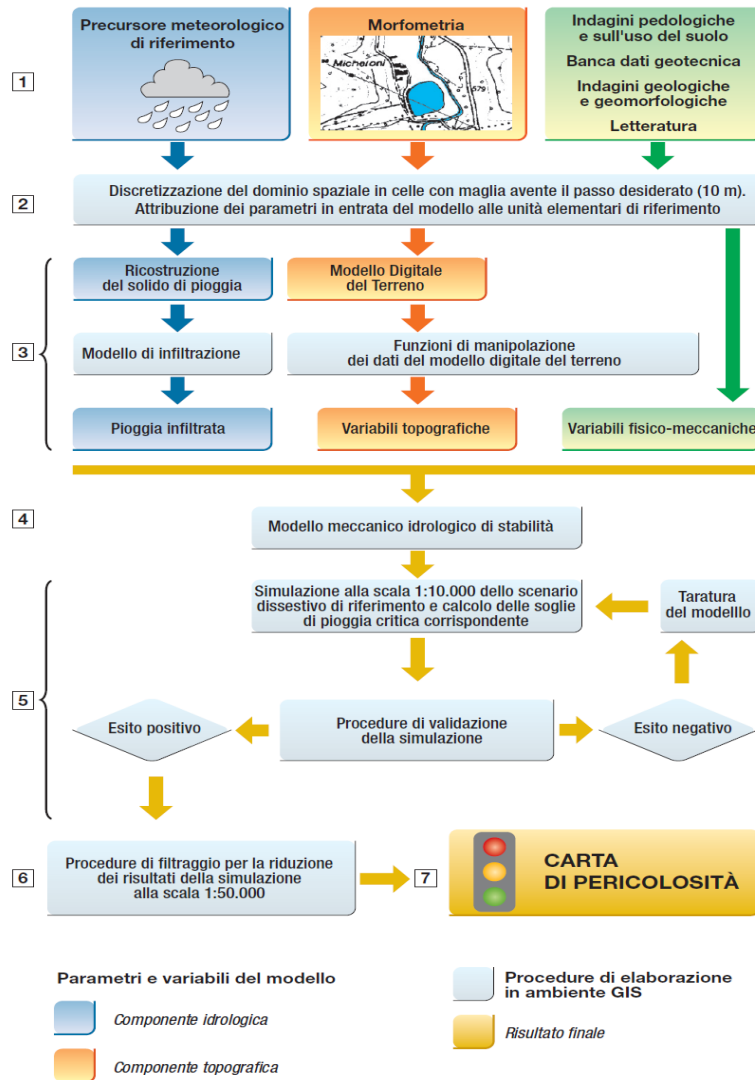


Figura 28. Il processo di generazione della carta di pericolosità delle frane della coltre superficiale

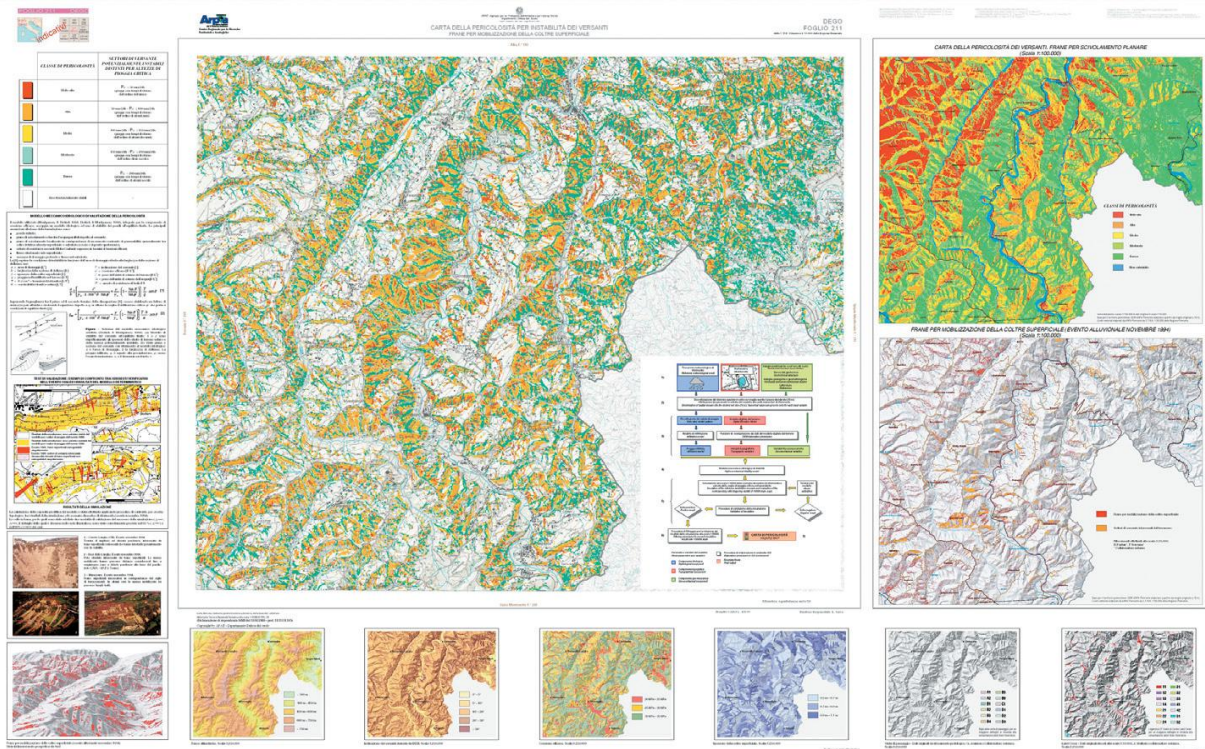


Figura 29. Carta della Pericolosità per Instabilità dei Versanti in scala 1:50.000 frane per mobilizzazione della coltre superficiale, Foglio 211 Degeo







CLASSE DI PERICOLOSITÀ	SETTORI DI VERSANTE POTENZIALMENTE INSTABILI DISTINTI PER ALTEZZE DI PIOGGIA CRITICA
	Molto alta $P_{cr} \leq 30 \text{ mm}/24\text{h}$ (piogge con tempi di ritorno dell'ordine dell'anno)
	Alta $30 \text{ mm}/24\text{h} < P_{cr} \leq 100 \text{ mm}/24\text{h}$ (piogge con tempi di ritorno dell'ordine di alcuni anni)
	Media $100 \text{ mm}/24\text{h} < P_{cr} \leq 150 \text{ mm}/24\text{h}$ (piogge con tempi di ritorno di alcuni decenni)
	Moderata $150 \text{ mm}/24\text{h} < P_{cr} \leq 200 \text{ mm}/24\text{h}$ (piogge con tempi di ritorno dell'ordine di un secolo)
	Bassa $P_{cr} > 200 \text{ mm}/24\text{h}$ (piogge con tempi di ritorno dell'ordine di alcuni secoli)
	Aree tendenzialmente stabili

Figura 30. Legenda della carta di pericolosità relativa alle frane per mobilizzazione della coltre superficiale

> 1.2 Il sistema SIA

Sommario

Il rapido sviluppo della tecnologia ha consentito notevoli progressi nelle tecniche di monitoraggio. Nel controllo dei fenomeni naturali, i ricercatori hanno rivolto la loro attenzione allo sviluppo di sistemi di monitoraggio innovativi che consentano di ottenere parametri sempre più precisi e affidabili per una migliore interpretazione di tali fenomeni.

La sezione di Torino dell'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica da tempo opera nella messa a punto di sistemi di controllo e misure in aree interessate da dissesti naturali.

Recentemente è stata sviluppata una nuova apparecchiatura nel campo delle misure inclinometriche, progettata per funzionare in automatico e con controllo a distanza di fenomeni franosi che coinvolgono centri abitati, infrastrutture stradali e ferroviarie, siti di interesse storico.

Il Sistema Inclinometrico Automatizzato, brevettato all'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica di Torino, è concepito per il rilevamento remoto e in continuo dei movimenti profondi di versante, al posto delle tradizionali "colonne inclinometriche fisse".[2]

Questa strumentazione è già stata installata in aree con differenti caratteristiche geolo-giche per il controllo di importanti frane nelle Alpi e negli Appennini.

Il controllo delle frane di Corniglio (PR), di Casoletta (RE) e di Cabella Ligure (AL), ha permesso di sperimentare il sistema e di verificarne le notevoli potenzialità, quali la determinazione della velocità ed accelerazione dei movimenti profondi, nonché la cor-relazione tra questi e gli eventi meteorici.

A seguito di un contratto con la Provincia di Torino, teso alla realizzazione di una ban-ca dati informatizzata e georeferenziata (ArcView GIS) dei fenomeni di dissesto naturali che hanno interessate infrastrutture viarie del territorio provinciale, sono stati individuati alcuni siti particolarmente a rischio su cui installare reti di monitoraggio.

In Val Germanasca (TO), è stata installata una stazione totale robotizzata e una rete di estensimetri a filo di superficie, per il controllo in continuo e remoto di un movimento franoso che interessa un tratto di viabilità provinciale, anche in questo caso sono state individuate delle importanti correlazioni fra gli eventi meteorici e i movimenti di superficie.

Il controllo dei movimenti di superficie, viene inoltre indagato con periodici rilievi GPS di alta precisione, nonché con reti GPS fisse con controllo a distanza e in continuo ove il fenomeno franoso interessa aree di difficile accessibilità.

Le stesse misure vengono inoltre utilizzate per tarare dati provenienti da piattaforma satellitare SAR.

Il Sistema Inclinometrico Automatizzato (SIA)

Il Sistema Inclinometrico Automatizzato è stato concepito per superare i limiti delle tradizionali “colonne inclinometriche fisse” che presentano lo svantaggio di monitorare soltanto alcuni punti della verticale inclinometrica, spesso inadeguati, sia come numero che come posizione. Il SIA indagando con continuità per tutta la lunghezza del tubo (passo delle misure 0,5 m) permette invece di restituire una deformata inclinometrica pressoché continua, con valori di movimento molto più realistici e correlabili con i dati pluviometrici e piezometrici anch’essi acquisiti in continuo.

La grande frana di Corniglio (PR)

Localizzata nell’Alta Val Parma, la frana di Corniglio costituisce il maggiore movimento gravitativo verificatosi in questi anni in Italia. Il dissesto rappresenta, in realtà, la riattivazione periodica di una grande frana storica nota da almeno 500 anni: segnalata in un estimo catastale del 1559, risulta poi ben documentata nel 1612, 1740 e 1902.

La rimobilizzazione più recente si è registrata nel novembre 1994 a seguito di intense e prolungate piogge: nei 30 giorni precedenti sono caduti 859 mm (valore pari alla pioggia media di un anno a Torino) e ben 3158 mm nei 360 giorni prima. Per tutto il periodo 1994-2000 la frana alterna movimenti repentini e periodi di stasi. Il bilancio dei danni risulta impressionante: sono stati completamente distrutti 70 edifici per lo più di recente costruzione, ivi compresi la totalità degli stabilimenti per la stagionatura del famoso prosciutto di Parma.

I movimenti hanno provocato lesioni nei fabbricati e minacciano tuttora il borgo medioevale del capoluogo; l’avanzamento del piede della frana determina un restringimento di 40 m dell’alveo del T. Parma, il suo eventuale sbarramento formerebbe un in-vaso con capacità di oltre 1 milione di m³, in grado di minacciare un esteso tratto del fondovalle.

Il SIA installato in codesta zona ha rappresentato un’avanguardia molto importante per lo sviluppo di questa moderna tecnologia, infatti lo strumento qui installato non era dotato del meccanismo di lettura in posizione coniugata (sonda ruotata di 180°) che permette di annullare alcuni degli errori sistematici (effetti termici, deriva strumentale). Per ovviare a tale limite sono state utilizzate tecniche

statistiche di filtraggio e validazione delle misure, che hanno fornito dati pienamente congruenti con quelli ricavati da rilievi tradizionali. La frana in questione ha rappresentato un vero e proprio campo di controllo, taratura e collaudo della validità del SIA che attualmente integra un meccanismo di lettura in posizione coniugata per eliminare gli errori strumentali.

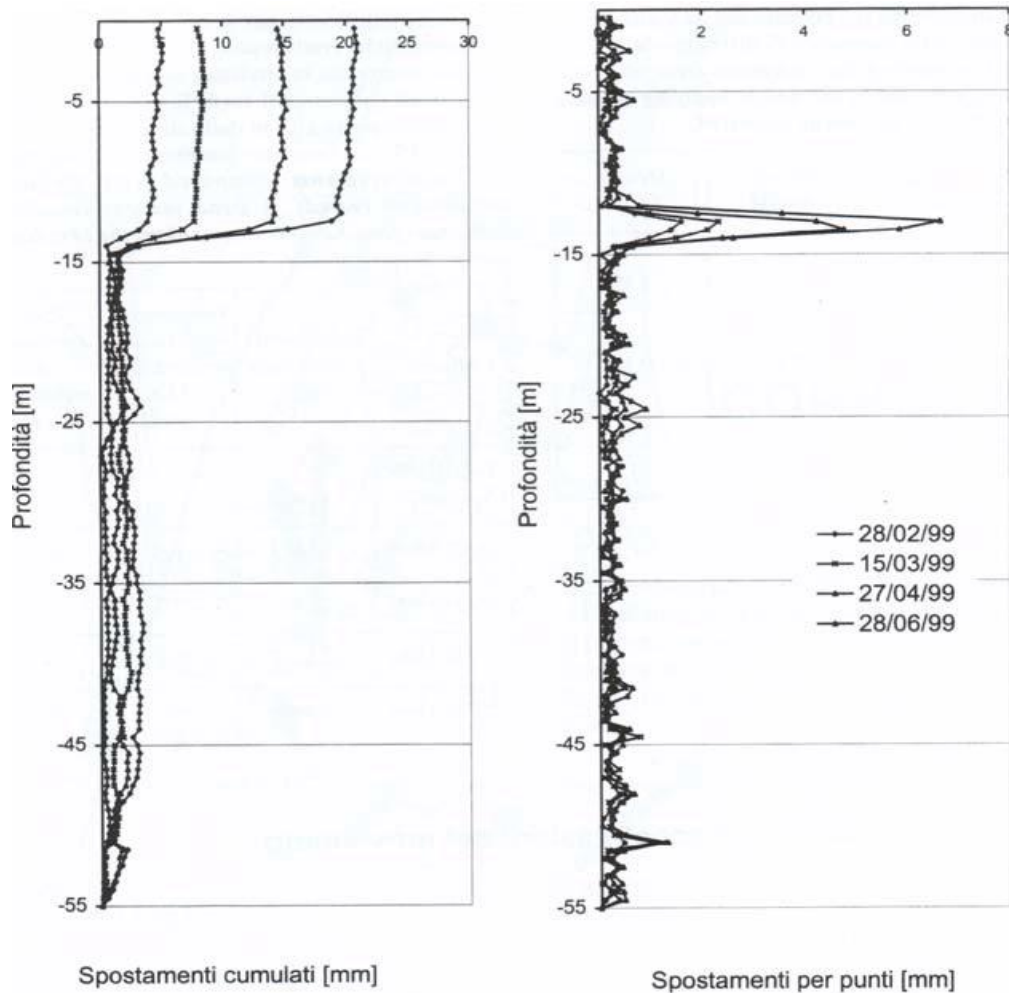


Figura 31. Deformate inclinometriche corrette, elaborate per punti ed in termini di spostamenti integrali, effettuate dal SIA nel tubo A5-2. Una superficie di scorrimento ben definita si individua alla profondità di 14 m, con movimenti che perdurano per l'intero periodo esaminato (gennaio-giugno 1999)

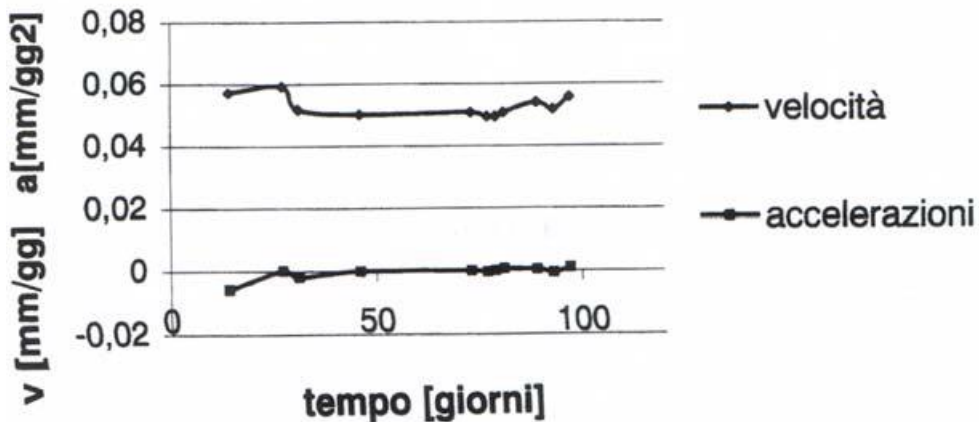


Figura 32. Velocità ed accelerazioni dei movimenti rilevati con il SIA nel periodo 27/04/1999 - 29/01 nel foro A5-2. Gli spostamenti giornalieri evidenziano un andamento regolare ed abbastanza costante, con velocità di 0,04 – 0,06 mm/giorno, e i valori di accelerazione pressoché costanti

La frana di Casoletta (RE): La frana di Casoletta, situata presso il margine più ad est del gruppo appenninico settentrionale, è una tipica paleo-frana riattivatasi nell'ottobre 1995, causando situazioni di forte rischio idrogeologico. L'abitato di Casoletta è infatti situato al piede di tale frana ed è interessato, insieme al collegamento stradale principale ed alla linea elettrica ad alta tensione, da questo fenomeno di dissesto. Anche in questo caso, il Sistema Inclino-metrico Automatizzato, posto nella parte bassa dell'area in frana, controlla in continuo l'evolversi del fenomeno. Il grafico mostra come si siano individuate due distinte superfici di scivolamento, poste a differenti profondità. Infatti, la posizione del tubo inclino-metrico alla confluenza di due fenomeni franosi, uno principale più profondo e complesso con approfondimento della superficie di scorrimento a circa 12 m e l'altro laterale più superficiale assimilabile ad una colata (4÷5 m di spessore), ha permesso di osservare come la velocità di spostamento dell'ammasso laterale sia maggiore e come esso risenta più direttamente delle condizioni meteo-climatiche.

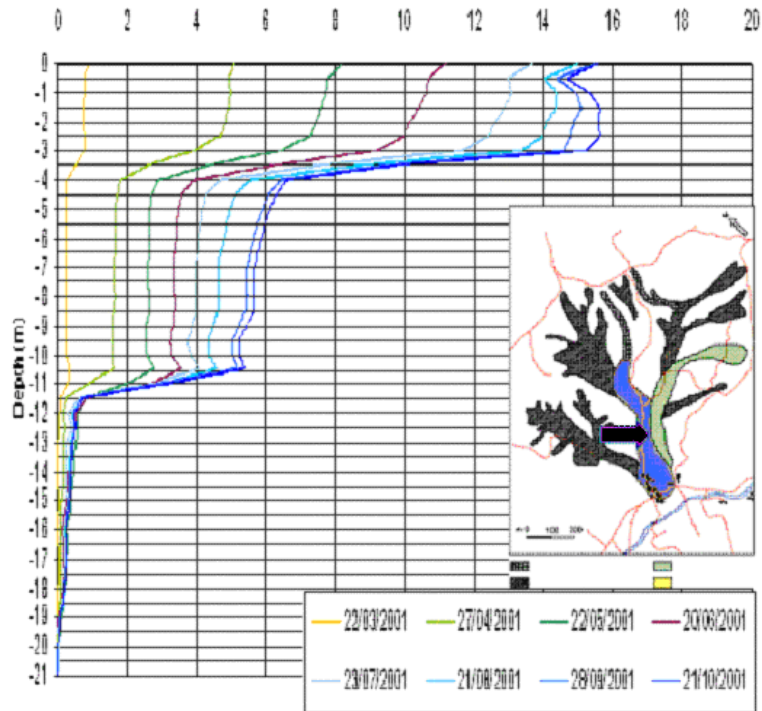


Figura 33. Risultati SIA: Spostamenti integrali a partire dal 16/03/2001

I dati rilevati dal Sistema Inclinometrico si sono rivelati di eccellente qualità e grazie al meccanismo di rotazione automatica della sonda, privi di errori sistematici. I risultati ottenuti rappresentano una notevole applicazione della tecnologia inclinometrica sia in termini qualitativi che quantitativi. Il grande numero di misure non affette da errori grossolani e sistematici, ha consentito di definire un campo di moto continuo sia in termini temporali che di profondità. I risultati ottenuti sul campo sono assolutamente congruenti con quelli universalmente riconosciuti dalla bibliografia specializzata.

La frana di Cabella Ligure (AL): in località Montaldo di Cosola (Comune di Cabella Ligure, Provincia di Alessandria), a seguito degli eventi alluvionali dell'autunno 1993, vi fu la riattivazione di un movimento franoso che si sviluppò su un accumulo detritico, di spessore variabile tra i 20 ed i 35 m attribuibile ad un antico episodio franoso, localizzato sopra un substrato di alterazione calcareo-marnoso. La frana, innescata dall'incisione del Rio Montaldo, ha una geometria probabilmente rotazionale e si esplica attraverso lenti ma continui movimenti. In funzione di quanto riscontrato, nell'ambito di un contratto di ricerca con la

Regione Piemonte-Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione, il CNR-IRPI Sezione di Torino ha installato un Sistema InclinoMetrico Automatizzato (SIA).

In seguito agli eccezionali eventi meteorici verificatisi nell'ottobre 2000, il SIA ha registrato degli spostamenti puntuali significativi a circa 13,5 metri di profondità, in corrispondenza di uno strato argilloso intercalato tra due strati di limo-sabbioso. Nei mesi seguenti a tale movimento, sono state eseguite delle analisi statistiche sui valori delle piogge giornaliere, al fine di individuare una possibile relazione esistente fra dati pluviometrici e movimenti della frana. I risultati di tali studi hanno evidenziato un so-stanziale ritardo fra picchi di eventi pluviometrici e massimi di spostamenti rilevati, quantificabile mediamente in 8-10 giorni ed a questo intervallo di tempo, la correlazione lineare positiva fra le variabili esaminate ha raggiunto i massimi valori di significatività.

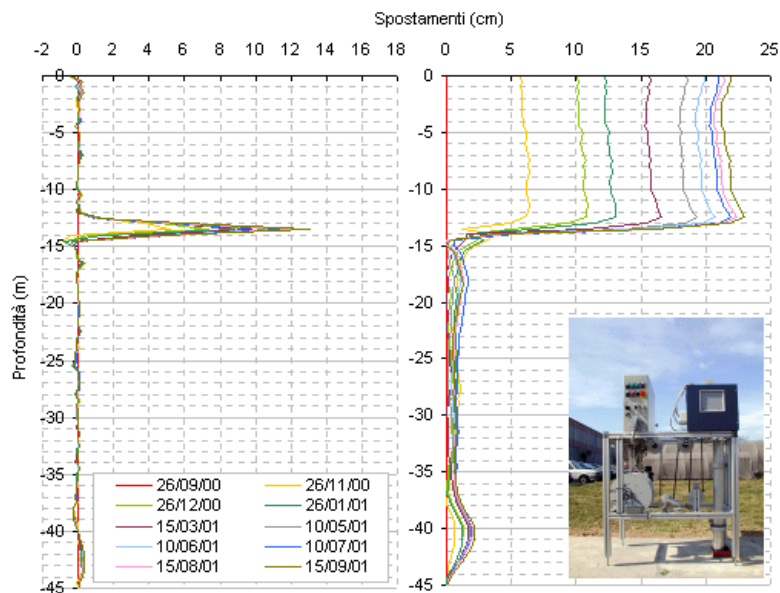
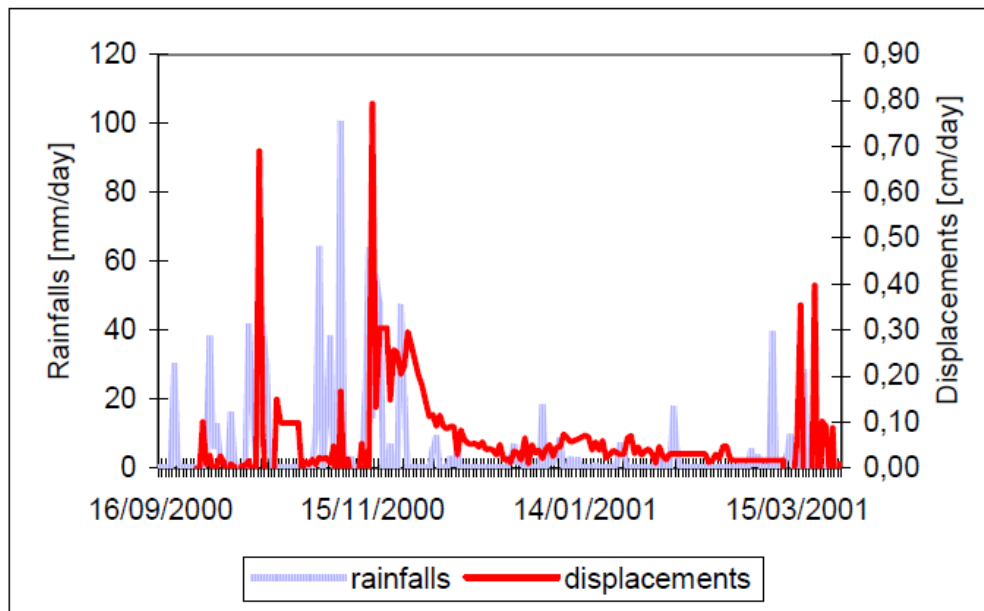


Figura 34. Deformata inclinometrica elaborata per punti, spostamenti integrali e profilo stratigrafico; indicativamente si possono individuare uno strato superficiale di materiale fine (1), ed uno più profondo di matrice rocciosa (2). La superficie di scorrimento è individuabile in uno strato argilloso compatto intercalato tra due strati di limo sabbioso.



*Figura 35. Correlazione tra precipitazioni e spostamenti
Il sistema di monitoraggio sperimentale di gardiola (comune di salza di pinerolo)
Inquadramento ambientale*

A seguito delle intense precipitazioni e delle particolari condizioni meteorologiche verificatesi tra il 13 e il 16 ottobre 2000, i bacini del Piemonte nord-occidentale sono stati interessati da fenomeni diffusi di piena fluviale, torrentizia e di frana. In particolare, tale evento alluvionale ha provocato l'attivazione di un fenomeno franoso lungo il versante sinistro della Val Germanasca, nel territorio comunale di Salza di Pinerolo, tra le progressive Km 14+800 e Km 15+000 (Piemonte occidentale).

Il rilievo sull'area instabile, metteva in risalto l'esistenza di un'ampia area di frana coinvolgente sia il tratto di strada citato sia i settori di versante immediatamente più a ovest e più ad est. La morfologia e le dimensioni dell'area instabile potevano inoltre portare, in caso di collasso, allo sbarramento del fondovalle. Si manifestava quindi, l'urgenza di controllare in continuo l'evoluzione del fenomeno per individuare le possibili azioni per la mitigazione del rischio.

La stazione totale robotizzata

Ai fini di monitorare l'andamento del fenomeno di dissesto, sul versante opposto a quello oggetto di studio è installata una stazione totale servoassistita di precisione con sistema automatico di collimazione, il tutto alloggiato in un abitacolo di protezione.



Figura 36. Alloggiamento della stazione totale robotizzata

Il sistema è programmato per eseguire le misure (cicli) ad intervalli di tre ore, tali dati vengono inviati tramite modem GSM alla stazione remota di controllo del C.N.R. – IRPI Sez. di Torino per l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati.

Elaborazione e compensazione dei dati

I grafici sotto riportati, mostrano lo storico dei movimenti del versante franoso a partire dal momento in cui è diventato operativo il sistema di monitoraggio topografico.

E' possibile notare come esista una forte correlazione tra piogge giornaliere e movimenti di versante.

In particolar modo:

l'area delimitata dal primo cerchio mostra gli spostamenti conseguenti alle forti precipitazioni verificatesi durante l'alluvione del 16 ottobre 2000;

l'area delimitata dal secondo cerchio mostra l'incremento dovuto alla fusione del manto nevoso;

L'area delimitata dall'ultimo cerchio, infine, mostra il leggero incremento nei movimenti rilevato dopo le precipitazioni del maggio 2001

010203040506070809010020/4/0124/4/0128/4/012/5/016/5/0110/5/0114/5/01
18/5/0122/5/0126/5/0130/5/013/6/017/6/0111/6/0115/6/0119/6/0123/6/01Pioggia
[mm]012345678910Movimenti Prisma 10 [cm]

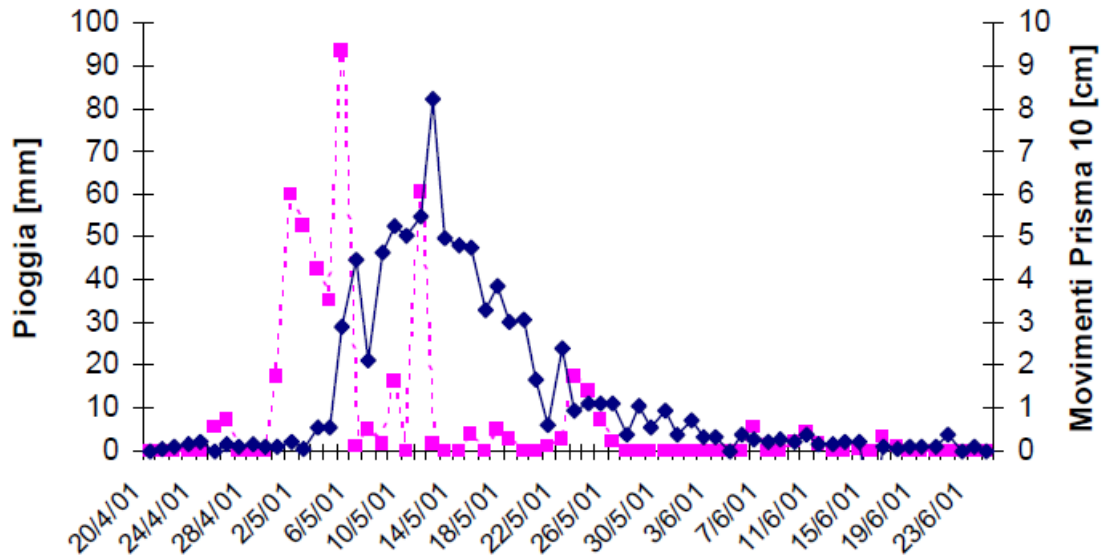


Figura 37. Relazione tra piogge giornaliere (tratteggio) e spostamenti (Prisma N°10) nel periodo 20/04/01 – 23/06/01

Pluviogramma delle piogge giornaliere a partire dal 1/10/2000

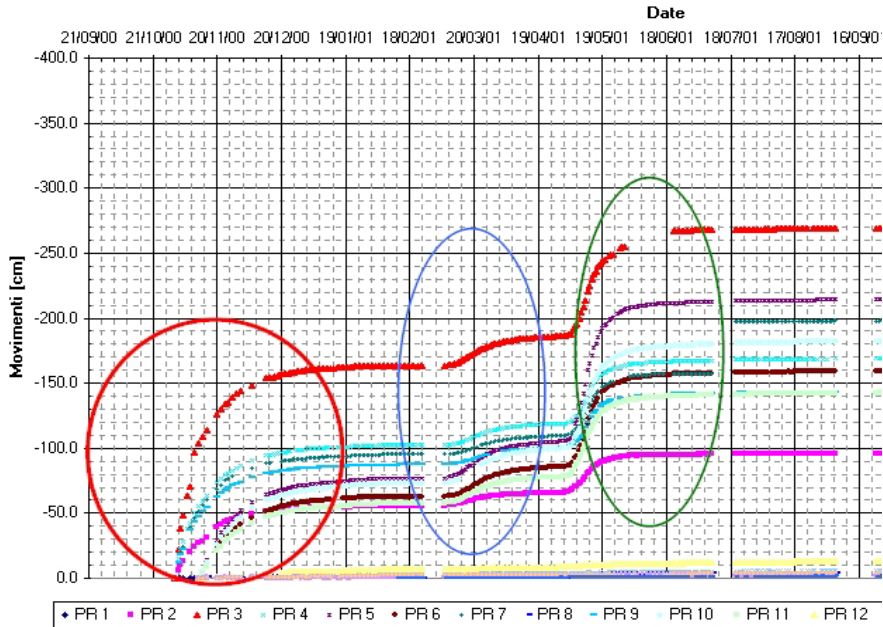
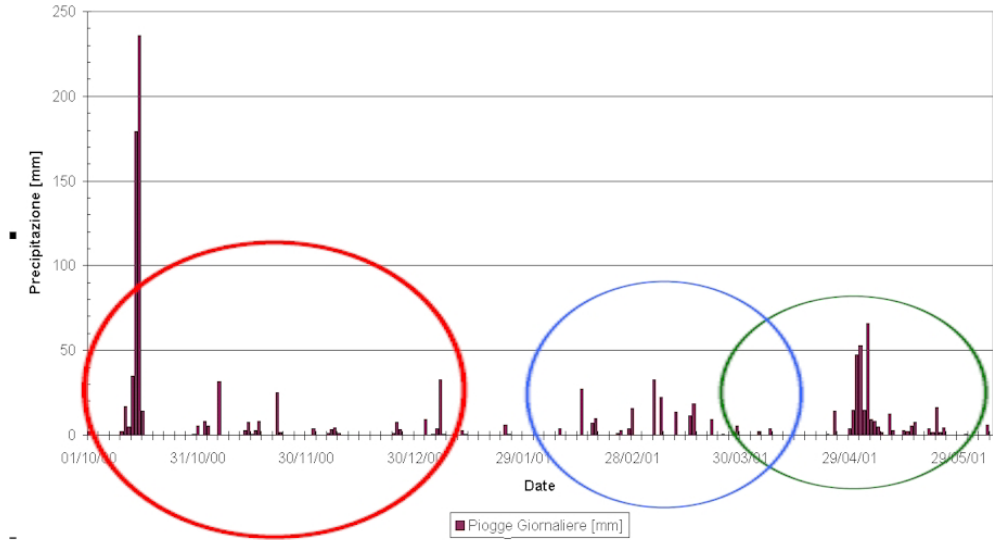


Figura 38. Relazioni osservate tra precipitazioni e riattivazione del fenomeno franoso

Rete estensimetrica

La necessità di integrare e/o disporre di un'alternativa in caso di guasto della stazione robotizzata, ha suggerito di installare sul coronamento della frana 3 estensimetri potenziometrici a filo, costituenti una rete di controllo indipendente e il cui funzionamento non risente di condizioni meteorologiche avverse. Anche in questo caso il controllo è in continuo con trasmissione dati via modem GSM.



Figura 39,40. Centralina di acquisizione dati ed estensimetro a filo posto a cavallo della fessura da rilevare

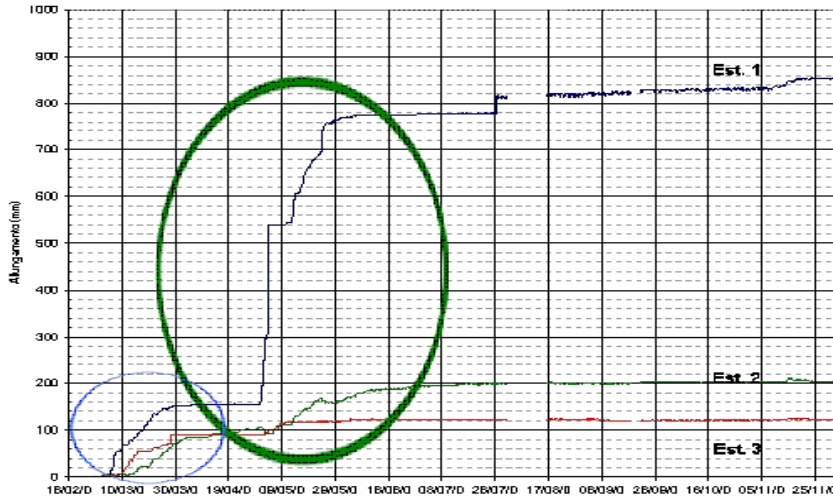


Figura 41. Frana di Gardiola: Estensimetri a filo – spostamenti cumulati (a partire dal 23/02/2001)

010203040506070809010020/4/0124/4/0128/4/012/5/016/5/0110/5/0114/5/0118/5/0122/5/0126/5/0130/5/013/6/017/6/0111/6/0115/6/0119/6/0123/6/01
 Pioggia [mm] - ore 9.00
 050100150200250
 Movimenti [mm]
 Lettura ore 6.00

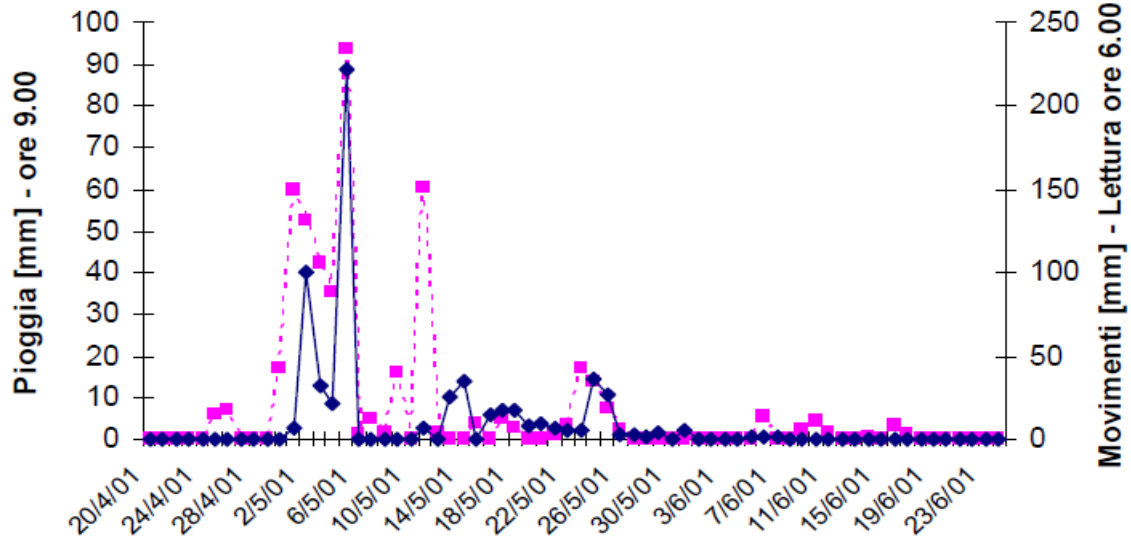


Figura 42. Estensimetri a filo, relazione tra piogge giornaliere (tratteggio) e spostamenti (Est. N°1) nel periodo 20/04/01 – 23/06/01

Come evidenziato dalla Fig. 42, l'andamento dei movimenti misurati con questa strumentazione risulta in perfetta sintonia con quello rilevato, nella medesima frana, dal teodolite robotizzato.

Rilievi GPS di alta precisione finalizzati al controllo della frana di Corniglio (PR):

Il miglioramento della precisione delle misure GPS, dovuto all'implementazione della costellazione satellitare; all'uscita di nuovi ricevitori con caratteristiche tecnologiche sempre più avanzate ed all'affinamento delle tecniche di elaborazione e compensazione dei dati grezzi, ha reso sempre più appetibili tali tecnologie nel campo del rilevamento topografico e geodetico. L'uso di tecnologie di rilievo satellitare permette infatti il raggiungimento di soglie di incertezza nella stima delle misure contenute, a seconda della tipologia ed esigenza di rilievo, in pochi millimetri, a fronte di una maggior versatilità del rilievo stesso e di semplicità di esecuzione. L'impiego di tecnologie di rilievo convenzionali, infatti, se da un lato consentono nella migliore delle ipotesi ellissi d'errore di qualche centimetro, dall'altro appesantiscono in maniera esasperata le procedure e le modalità d'esecuzione. In quest'ottica, il gruppo di lavoro sul geomonitoraggio della sezione di Torino del CNR - IRPI, ha istituito numerose reti GPS (attualmente 15) per il controllo dei movimenti di versante.

Delle numerose reti che il gruppo di monitoraggio rileva con periodicità, si riporta un esempio dei risultati ottenuti sul posizionamento assoluto, con i relativi indici di qualità, dei capisaldi presenti sulla frana di Corniglio (PR). A fianco degli identificativi dei punti, (Station), sono presenti i parametri che definiscono l'incertezza sul posizionamento planimetrico (A-B) e altimetrico (sd hgt) dei singoli punti, mentre la figura 43 mostra lo schema geometrico con orientamento N-E della rete GPS di controllo.

Station	A	B	A/B	Sd Hgt
1	0.0014	0.0008 m	1.09	0.0023 m
10	0.0011	0.0010 m	1.01	0.0026 m
11	0.0026	0.0015 m	1.07	0.0051 m
12	0.0014	0.0010 m	1.04	0.0032 m
2	0.0010	0.0006 m	1.07	0.0017 m
3	0.0008	0.0008 m	1.01	0.0021 m
4	0.0015	0.0007 m	2.01	0.0018 m
5	0.0012	0.0008 m	1.05	0.0023 m
7	0.0016	0.0010 m	1.07	0.0026 m
8	0.0009	0.0007 m	1.02	0.0024 m
9	0.0013	0.0010 m	1.03	0.0019 m

Tabella 2. Caratteristiche qualitative sul posizionamento plano-altimetrico dei punti in frana. A e B identificano i semiassi dell'ellisse d'errore planimetrico, A/B lo schiacciamento, mentre Sd Hgt è la deviazione standard sul dato altimetrico.

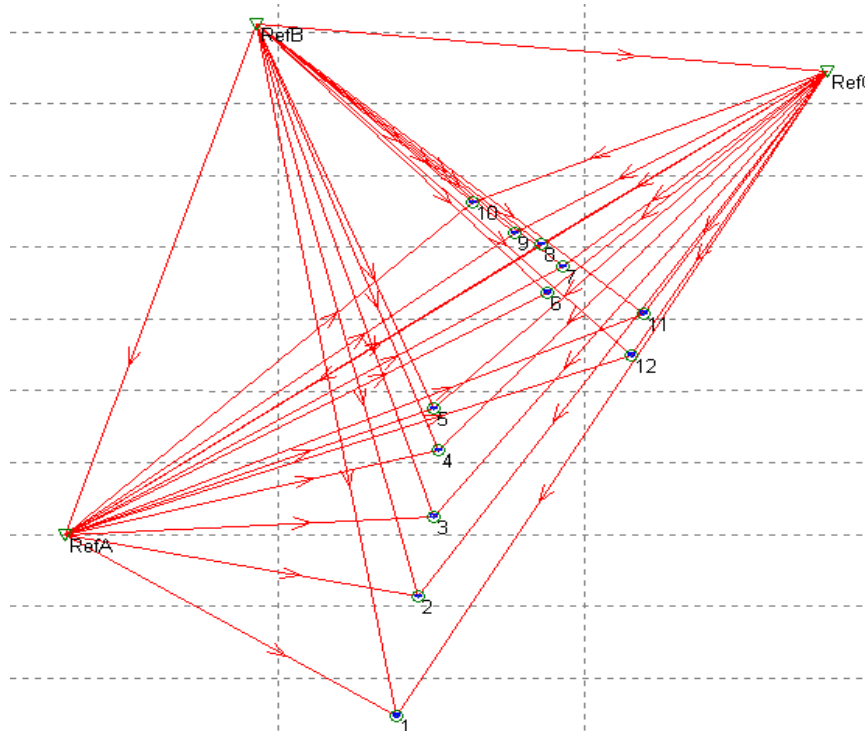


Figura 43. Schema geometrico della rete GPS di Corniglio

Per il monitoraggio superficiale di alcuni importanti fenomeni franosi (Corniglio (PR), Serre La Voute (TO), Caramanico (CH)), la metodologia del rilievo geodetico satellitare GPS, verrà utilizzata come taratura dei risultati delle elaborazioni interferometriche delle immagini provenienti da piattaforma satellitare SAR (Sintetic Aperture Radar).

Attualmente, è in fase di ultimazione una rete costituita da sensori GPS di basso costo per il controllo in remoto ed in continuo (Fig. 44) della frana di crollo di Les Ayas situata in Val di Susa (TO). Questo monitoraggio completamente automatizzato e funzionante in continuo, ben si adatta al monitoraggio di zone particolarmente impervie, o con accessibilità ridotta durante l'anno. Il sistema è costituito da due sensori posti esternamente al corpo di frana e che definiscono la geometria di compensazione delle misure, più un set di ricevitori consolidati al corpo franoso, che acquisiscono in continuo informazioni dalla costellazione satellitare GPS, trasmettendo i dati al centro di monitoraggio del CNR- IRPI sezione di Torino, per le necessarie elaborazioni.

STAZIONI REMOTE STAZIONE BASE CNR - IRPI di TORINO .. GESTIONE DEL SISTEMA .. PROCESSAMENTO DATI .. GESTIONE DATI .. GESTIONE ALLARMI

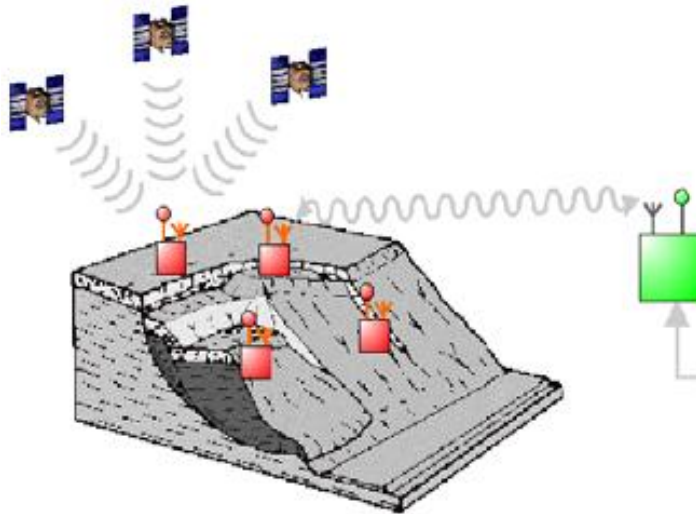


Figura 44. Sistema di monitoraggio GPS continuo

Conclusioni

L'applicazione di tecnologia avanzata al monitoraggio dei movimenti franosi ha migliorato notevolmente le metodologie di analisi e modellazione di fenomeni di dissesto complessi. Tali migliorie consentono di prevedere con buona attendibilità l'evoluzione del fenomeno e di definire possibili scenari di rischio. Le grandi quantità di dati, la loro precisione e affidabilità sono alla base di tale evoluzione; grazie a strumentazioni avanzate che forniscono misure in automatico ed in continuo è possibile descrivere in modo più completo le condizioni e le leggi che governano questi eventi. Con tali premesse, gli studi si stanno orientando verso la ricerca di eventuali soglie di innesco, elementi molto importanti per la mitigazione dei rischi idrogeologici. Queste operazioni richiedono periodi di osservazioni sufficientemente lunghi e i dati rilevati devono essere il più possibile continui, affidabili e precisi. La consistenza, la continuità e la ricerca di metodologie innovative sono le peculiarità che caratterizzano i siti monitorati dal CNR-IRPI Sez. Torino, che ha così ottenuto buoni risultati nella previsione e nella definizione di scenari di rischio. Torino, che ha così ottenuto buoni risultati nella previsione e nella definizione di scenari di rischio.

> 1.3 Cenni sull'analisi del rischio frane

Premettiamo la seguente terminologia di base:

Suscettibilità da frana: stima quali-quantitativa della classe, del volume e della distribuzione spaziale delle frane che interessano una data area, anche potenzialmente.

Rischio accettabile: rischio che la società è disposta ad accettare tal quale senza ritenere giustificati ulteriori investimenti per un'eventuale mitigazione dello stesso.

Vulnerabilità: grado di perdita su un elemento o serie di elementi esposti al rischio che si verifichi un evento franoso di una data intensità. E' un parametro variabile tra 0 (nessuna perdita) ed 1 (perdita totale).

Pericolosità: probabilità di occorrenza di un fenomeno franoso in una determinata area ed in un determinato periodo di tempo.

Rischio: misura della probabilità ed entità di un evento dannoso per la salute umana, per l'assetto socioeconomico di un territorio o per l'ambiente.

La pericolosità si definisce come la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato tempo ed

in una data area. Si esprime in termini di probabilità annuale o tempo di ritorno di un evento di frana.[3]

Per come è definita, la pericolosità è pertanto funzione di una data intensità dell'evento franoso.

$$H = H(I)$$

Ma cosa intendiamo per intensità?

Con questi termini viene intesa la severità di un fenomeno franoso; alcuni autori sottolineano la differenza concettuale tra le due definizioni indicando con "magnitudo" la scala di un evento franoso, solitamente intesa come volume totale del materiale rimosso da un singolo evento franoso.

Intensità o magnitudo

L'intensità invece racchiude diversi parametri al suo interno, atti a descrivere qualitativamente e quantitativamente l'impatto dell'evento in siti differenti.

Alcuni parametri per descrivere l'intensità di una frana possono essere la velocità, l'altezza del fronte, la profondità dell'erosione; come è ovvio, questi parametri non sono costanti nello spazio e nel tempo, ma variano all'interno del percorso e dell'area di propagazione del fenomeno.

N.B. In alcuni casi la determinazione dell'intensità del fenomeno è associata a livelli di danneggiamento che dal punto di vista concettuale sono riconducibili all'analisi del rischio.

Cruden e Varnes (1996) hanno modificato una scala di intensità delle frane basata sulle velocità introdotta da Hungr nel 1981 rifacendosi concettualmente alla scala Mercalli utilizzata per l'intensità dei terremoti.

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità	(m/s)
7	Estremamente rapido	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	5 m/s	5
6	Molto rapido	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3m/min	5×10^{-2}
5	Rapido	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	1.8 m/h	5×10^{-4}
4	Moderato	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	13m/mese	5×10^{-6}
3	Lento	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	1.6 m/anno	5×10^{-8}
2	Molto lento	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16 mm/anno	5×10^{-10}
1	Estremamente lento	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni		

Canuti e Casagli (1996) introducono una stima approssimativa della classe di velocità di un fenomeno basandosi sulla tipologia e sul suo stato di attività.

La relazione fra tipo di movimento e velocità è abbastanza evidente: una colata di detrito a rapida evoluzione o un crollo di roccia in genere sono molto rapidi o estremamente rapidi, mentre una colata di terra è di solito lenta o molto lenta. Tranne alcune eccezioni discusse da Hutchinson (1987), rispetto allo stato di attività, un movimento di neoformazione (frana di prima generazione) in genere è più veloce della riattivazione di uno scivolamento preesistente, in quanto nel primo caso siamo in presenza di un materiale a rottura fragile mentre nel secondo a comportamento duttile, in quanto la resistenza al taglio è prossima o corrispondente ai valori residui. Tale differenza è tanto più marcata quanto più elevata è la fragilità del materiale.

Tipologia	Crollo	Scivolamento					Colamento		
Materiale	Roccia	Roccia		Detrito	Terra		Roccia	Detrito	Terra
Stato di attività	-	N	R	-	N	R	-	-	-
Classe di velocità	6-7	5-6	1-5	1-6	5-6	1-5	1-2	1-7	1-4

N = neoformazione ; R = riattivata

Fell (1994) propone un approccio per la valutazione dell'intensità di una frana basato sulle dimensioni della massa mobilitata da un evento franoso.

Intensità (I)	Descrizione	Volume (m ³)
7	Estremamente grande	$> 5 \times 10^6$
6	Molto grande	1×10^6 , 5×10^6
5	Mediamente grande	2.5×10^5 , 1×10^6
4	Media	5×10^4 , 2.5×10^5
3	Piccola	5×10^3 , 5×10^4
2.5	Molto piccola	5×10^2 , 5×10^3
2	Estremamente piccola	$< 5 \times 10^2$

Un approccio migliore è quello del DRM (1990) che associa le volumetrie di materiale spostato a diverse tipologie di frana ai livelli di intensità calcolati rispetto alle conseguenze sull'uomo e sulle perdite economiche.

N.B. Le due scale di intensità tengono implicitamente conto anche della velocità del fenomeno: sono infatti uguali per i fenomeni a cinematismo veloce, mentre per gli scivolamenti, solitamente lenti, l'intensità per l'uomo è nulla indipendentemente dal volume mobilitato dalla frana.

CROLLI E RIBALTAMENTI			
		Volume (m ³)	Descrizione
H ₁	E ₁	< 10 ²	Caduta di blocchi isolati
H ₂	E ₂	10 ² - 10 ⁴	Crollo, ribaltamento o scivolamento di blocchi
H ₃	E ₃	10 ⁴ - 10 ⁶	Crollo in massa
H ₃	E ₄	> 10 ⁶	Crollo o scivolamento di roccia catastrofico
COLATE			
		Volume (m ³)	Descrizione
H ₁	E ₁	< 5 x 10 ²	Colata o scivolamento di fango
H ₂	E ₂	5 x 10 ² - 10 ⁴	Colata di fango o detrito
H ₃	E ₃	10 ⁴ - 10 ⁶	Colata rapida di detrito
H ₃	E ₄	> 10 ⁶	Trasporto in massa eccezionale
SCIVOLAMENTI			
		Profondità (m)	Descrizione
H ₀	E ₁	< 2	Scivolamento superficiale o soliflusso
H ₀	E ₂	2 - 10	Scivolamento localizzato
H ₀	E ₃	10 - 50	Scivolamento di un versante
H ₀	E ₄	> 50	Scivolamento eccezionale

La sola dimensione di una frana difficilmente può essere in grado di definire l'intensità del fenomeno in quanto frane di piccole dimensioni, ma che si sviluppano con elevate velocità (es. crolli, colate rapide di terra o di detrito) hanno un contenuto di pericolosità e rischio potenziali, molto più elevato rispetto a fenomeni dimensionalmente maggiori, ma che si sviluppano con cinematismi lenti o estremamente lenti.

Approccio energetico

L'intensità della frana viene considerata proporzionale all'energia cinetica sviluppata dall'evento, variabile nel tempo: nulla all'inizio, crescente dopo l'innesco del fenomeno fino ad un valore massimo e poi decrescente fino all'annullamento che avviene con l'arresto del cinematismo.

Viene utilizzata indifferentemente la massima energia cinetica istantanea oppure l'energia cinetica media.

Modello a slitta (Sassa, 1988)

L'ipotesi è che tutta l'energia persa nel movimento viene dissipata per attrito:

$$\Delta U = \Delta K + W$$

con:

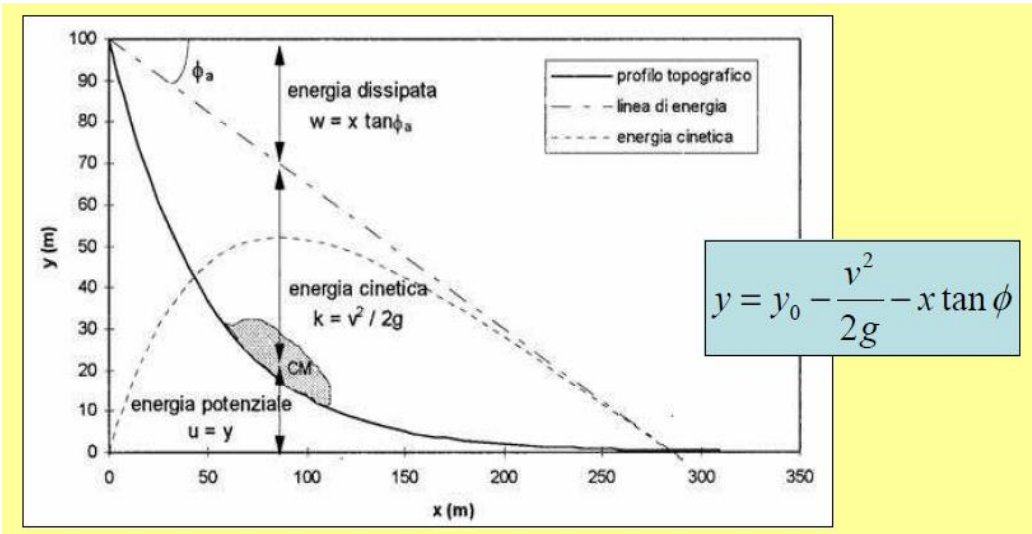
$$U \text{ (energia potenziale)} = m g y$$

$$K \text{ (energia cinetica)} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$W \text{ (lavoro forze attrito)} = m g x \tan \phi$$

L'angolo di attrito apparente ϕ è funzione dell'attrito dinamico del materiale e della pressione dell'acqua interstiziale durante il moto.

La linea di energia tracciata permette di stimare la distanza di arrivo della frana e la sua velocità in qualunque punto della traiettoria e, di conseguenza, anche l'energia cinetica massima (proporzionale alla massima distanza tra profilo del terreno e linea di energia) e quella media (proporzionale all'area compresa tra profilo del terreno e linea di energia)



Metodi ibridi

Alcuni autori hanno applicato metodi per la valutazione dell'intensità facendo riferimento a differenti parametri come ad esempio nel caso di un' applicazione svizzera (Raetzo, 2002) dove la scelta dei parametri e funzione della tipologia di frana.

Per le frane di crollo, ad esempio, il criterio significativo è l'energia di impatto nelle zone esposte (energia di traslazione e rotazione); il limite di 300 kJ corrisponde all'energia di impatto a cui può resistere un muro cemento armato correttamente eseguito. Il limite di 30 kJ corrisponde alla massima energia di resistenza di barriere rigide di legno di quercia (es. traversine ferroviarie).

Fenomeni	Bassa intensità	Media intensità	Alta intensità
Frane di crollo	$E < 30 \text{ kJ}$	$30 < E < 300 \text{ kJ}$	$E > 300 \text{ kJ}$
Valanghe di roccia			$E > 300 \text{ kJ}$
Scivolamenti	$v \leq 2 \text{ cm/anno}$	$v: \text{ dm/anno } (> 2 \text{ cm/anno})$	Grandi movimenti differenziali: $v > 0.1 \text{ m/giorno}$ per scivolamenti superficiali; deformazioni $> 1 \text{ m}$ per evento
Colate di terra e colate di detrito			
Potenziali	$e < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < e < 2 \text{ m}$	$e > 2 \text{ m}$
Reali	-	$h < 1 \text{ m}$	$h > 1 \text{ m}$

I criteri più comunemente adottati per la ricostruzione dei tempi di ritorno sono i seguenti:

- criteri geomorfologici o analisi qualitative
- analisi di serie temporali relative agli effetti: l'analisi di serie temporali di movimenti permette di stabilire direttamente i tempi di ritorno dei fenomeni franosi
- analisi di serie temporali relative alle cause: la correlazione tra frane ed elementi innescanti (precipitazioni, eventi sismici, ecc.) per i quali si disponga di misure sistematiche nel tempo, permette la stima dei tempi di ritorno dei movimenti
- monitoraggio: l'osservazione strumentale dei livelli piezometrici o delle deformazioni in singoli fenomeni franosi consente la previsione dei movimenti mediante il confronto con soglie o modelli di comportamento predefiniti.

La ricorrenza dei fenomeni franosi può essere stimata soggettivamente in base ad informazioni di carattere generale e qualitativo provenienti da analisi storiche, geomorfologiche e geotecniche della franosità in una determinata zona.

L'analisi diretta, attraverso indagini di tipo geomorfologico e geotecnico, in mancanza di dati storici sulle frane, può fornire una stima di tipo probabilistico sull'occorrenza degli eventi. Tale approccio, pur rimanendo abbastanza soggettivo, costituisce un valido mezzo di assegnazione delle probabilità, sia pur relative, dei tempi di ritorno all'interno di una data area. Ad esempio, possono assegnarsi probabilità più basse ad aree che mostrano scarpate di frana arrotondate, a basso angolo e rivegetate rispetto ad aree in cui affiorano scarpate con elevato angolo di pendenza e terreni esposti. Per una valutazione quantitativa del periodo di ritorno, utile ad una analisi più rigorosa della pericolosità e del rischio, è opportuno sempre tentare di trasformare in termini probabilistici le informazioni disponibili sull'incidenza dei fenomeni, sia pur in presenza di dati frammentari ed incompleti.

Analisi serie temporali relative agli effetti

L'analisi storica costituisce la fonte di informazione principale per la stima dei tempi di ritorno degli eventi di frana. Per alcune frane è possibile infatti datare esattamente gli eventi di riattivazione in base ai documenti o alle testimonianze della popolazione.

Gli strumenti a disposizione per la raccolta dei dati relativi agli eventi franosi dipendono ovviamente dall'età della frana e dalla frequenza delle riattivazioni. Per quanto riguarda gli eventi verificatisi nell'ultimo secolo le principali fonti sono le seguenti:

- a) confronto fra documenti cartografici di anni diversi
- b) confronto fra foto aeree o immagini tele rilevate di anni diversi
- c) quotidiani locali, riviste, notiziari
- d) testimonianze orali
- e) pubblicazioni scientifiche
- f) relazioni tecniche.

Per eventi remoti è possibile ottenere informazioni dall'esame di carte e documenti storici. Per l'analisi di eventi con tempo di ritorno molto lungo possono essere impiegati i metodi di datazione comunemente impiegati nelle Scienze della Terra, come ad esempio il metodo del radiocarbonio, la lichenometria e la dendrocronologia (Starkel, 1966; Schoeneich, 1991; Corominas et al., 1994).

Se si definisce P come la probabilità di occorrenza annua di un evento franoso, il tempo di ritorno T dell'evento è dato da $1/P$.

La probabilità di occorrenza di m eventi in un periodo di N anni è data dall'espressione della seguente distribuzione:

$$P(m, N) = \frac{N!}{m!(N-m)!} P^m (1-P)^{N-m}$$

che per eventi rari ($P < 0,02$) e periodi di tempo abbastanza lunghi può essere approssimata con la distribuzione di Poisson:

$$P(m, N) = \frac{(NP)^m e^{-NP}}{m!}$$

La pericolosità H è definita come la probabilità di accadimento di ALMENO un evento franoso in N anni ovvero:

$$H(N) = 1 - P(m = 0, N)$$

e quindi:

$$H(N) = 1 - (1-P)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$$

mentre nel caso della distribuzione di Poisson:

$$H(N) = 1 - e^{-NP} = 1 - e^{-\frac{N}{T}}$$

Per eventi ancora più rari può valere l'1ª approssimazione:

$$H(N) \cong NP = \frac{N}{T}$$

Accanto ad una valutazione puramente quantitativa della pericolosità (tempi di ritorno) è possibile tentare delle associazioni di tipo qualitativo-nominale in base ad opportune discretizzazioni in ranges. Le notevoli differenze sono dovute essenzialmente alle differenti finalità e ai diversi contesti in cui sono maturati i due studi (più generale per Fell, specifico per cinematiche lente e frequenti per Del Prete).

Definizione dei tempi di ritorno

Quando non sono disponibili informazioni sulla cronologia dei movimenti in quantità tale da permettere una stima diretta dei tempi di ritorno, si ricorre all'analisi di fenomeni naturali per i quali si disponga di misure sistematiche nel tempo e che siano in qualche modo correlabili all'insorgere di movimenti franosi.

Le cause innescanti più comuni sono riconducibili alle precipitazioni, all'attività antropica ed, in subordine, all'erosione ed alla sismicità.

N.B. Per gli eventi sismici e le piogge le probabilità di ricorrenza degli eventi critici possono essere ricavate attraverso la disponibilità di reti di rilevamento.

L'erosione costituisce un fattore innescante solo in particolari condizioni, laddove essa è particolarmente intensa, e in questi casi la previsione temporale della pericolosità può essere effettuata in termini di tempi di ritorno sulla base dei dati disponibili sugli agenti stessi dell'erosione.

I problemi relativi alla valutazione della pericolosità associata all'attività antropica non riguardano la fase di previsione, bensì quella di prevenzione, e devono essere analizzati in fase di pianificazione del territorio e gestione del rischio.

Monitoraggio

La previsione degli eventi franosi basata sul monitoraggio fornisce sicuramente le informazioni più dettagliate ed attendibili, soprattutto in un'analisi della pericolosità e del rischio condotti a scala di sito. L'impiego del monitoraggio è una soluzione complessa e tecnicamente onerosa ed applicabile in situazioni associate a rischio elevato ed in quei casi in cui un'analisi costo/beneficio ne giustifichi l'adozione.

Monitoraggio meccanico

La previsione dei movimenti di un versante viene effettuata sulla base dell'osservazione di alcuni parametri-causa tra i quali le pressioni interstiziali, la morfologia del versante, i carichi applicati, etc.

Nella maggior parte dei casi si cercano le correlazioni tra precipitazioni e oscillazioni piezometriche (monitorate) in modo da legare la pericolosità direttamente alle misure di pioggia.

L'analisi probabilistica permette poi di passare alla definizione dei tempi di ritorno consentendo la valutazione della pericolosità.

Monitoraggio cinematico

E' un approccio più diretto basato sull'osservazione delle deformazioni attraverso misure topografiche, estensimetriche, inclinometriche.

Solitamente si utilizzano modelli empirici per legare i parametri monitorati al time of failure (istante di rottura).

Questi modelli empirici non tengono però conto della variazione delle condizioni al contorno che potrebbero essere causate da eventi estremi.

Per la valutazione e la zonazione della pericolosità, qualunque metodologia dovrebbe fondarsi su quattro principi di base:

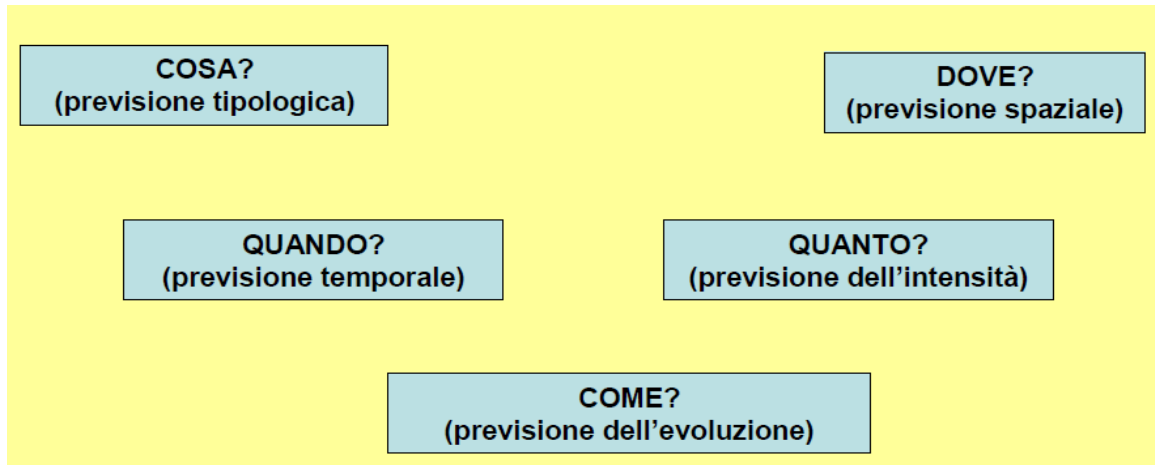
§ Le frane lasciano caratteri morfologici evidenti; la maggior parte di questi possono essere riconosciuti, classificati e cartografati sia in campagna sia attraverso tecniche di investigazione remota, prevalentemente foto aeree

§ I meccanismi che determinano le frane sono controllati da leggi fisiche che possono essere determinate empiricamente, statisticamente o in modo deterministico. Le condizioni che causano le frane (fattori d'instabilità) direttamente o indirettamente collegati all'evento, possono essere raccolti ed utilizzati per definire modelli predittivi di occorrenza di frana.

§ Il passato ed il presente sono la chiave per il futuro. Da ciò deriva che la comprensione della franosità storica risulta essenziale nella definizione della pericolosità da frana.

§ L'occorrenza delle frane, nello spazio e nel tempo, può essere dedotta da investigazioni di tipo euristico, elaborate attraverso l'analisi di informazioni ambientali, o dedotte da modelli fisici. Per tale motivo, un territorio può essere zonato secondo classi di pericolosità distinte a seconda della diversa probabilità di occorrenza.

Valutazione della pericolosità



L'oggettiva difficoltà di ricavare informazioni per queste previsioni rende tutta l'operazione di valutazione della pericolosità estremamente difficile. Lo stesso fatto che alcuni fattori predisponenti (ambientali, economici) possano variare rapidamente nel tempo, fa sì che anche le informazioni storiche possano indurre in errore.

Per questo motivo, molte carte della "pericolosità" dovrebbero invece essere definite come carte della "susceptibilità".

E' una previsione fondamentale per tutte le fasi successive di analisi di pericolosità e rischio. Tuttavia, se si dispone di un'accurata carta inventario dei fenomeni franosi, questo tipo di previsione non è difficoltoso.

In zone già interessate da fenomeni franosi è da tenere in considerazione la possibile evoluzione in fenomeni di tipo complesso (ad es. riattivazione di uno scivolamento di roccia come colata di detrito).

Anche questa previsione dipende dalla quantità e qualità dei dati raccolti durante la fase di inventario dei fenomeni franosi.

La previsione spaziale consiste nella valutazione della pericolosità relativa di un versante rispetto all'altro, senza esprimere la probabilità assoluta di accadimento di un fenomeno franoso.

Metodi qualitativi

Metodi soggettivi e sostanzialmente descrittivi.

Metodi quantitativi

Producono stime numeriche in termini di probabilità di accadimento di un fenomeno franoso.

Metodi diretti

Consistono in una rappresentazione cartografica della pericolosità da frana.

Metodi indiretti

Dopo l'osservazione e archiviazione dei fenomeni franosi si procede alla stima del contributo relativo dei fattori fisici correlati con l'instabilità di versante e alla zonazione della pericolosità sulla base dei valori dei suddetti fattori.

La cartografia geomorfologia della pericolosità da frana si fonda sull'abilità dell'esperto nella stima della franosità attuale e potenziale. Tale metodo permette una rapida valutazione, a basso costo, della stabilità in una data area, prendendo in considerazione un numero molto ampio di fattori, partendo dalla carta inventario delle frane. Questa, infatti, fornisce la base per una previsione spaziale e tipologica e fornisce indicazioni per l'identificazione dei fenomeni potenzialmente riattivabili. Il passo successivo è la zonazione dei versanti, attualmente non interessati da fenomeni franosi, in modo da prevedere anche le frane di prima generazione, caratterizzate da rottura fragile e potenzialmente più distruttive. Questo approccio può essere adottato a qualsiasi scala ed adattato a problematiche di sito; non richiede, inoltre, l'utilizzo di un Sistema Informativo Geografico il quale, in tal caso, diventa un semplice strumento di disegno e rappresentazione.

Molto utilizzato negli anni '70-'80 ha come principali controindicazioni la soggettività insita in tutta la procedura che comporta la difficoltà di confronto tra distinte analisi condotte nello stesso luogo da persone differenti. Necessita ovviamente di approfondite indagini di campagna.

I passi della procedura, generalmente, sono i seguenti:

- a) suddivisione di ciascun parametro predisponente in un numero rappresentativo di classi

- b) attribuzione di un valore pesato a ciascuna classe
- c) attribuzione di un valore pesato a ciascun parametro predisponente
- d) sovrapposizione delle carte dei pesi rappresentative di ciascun parametro
- e) definizione della carta finale della pericolosità suddivisa in classi distinte.

Lo sviluppo dei Sistemi Informativi Geografici permette di realizzare operazioni di sovrapposizione dei dati in modo totalmente automatico permettendo, inoltre, la standardizzazione delle tecniche di gestione dati. Questo approccio, inoltre, può essere applicato a qualsiasi scala.

In Italia questo metodo è stato proposto da Amadesi & Vianello (1978), partendo da una carta di suscettibilità iniziale ottenuta dalla sovrapposizione della carta litologica con quella delle pendenze e delle caratteristiche strutturali dei terreni. Successivamente la carta è stata rifinita considerando dapprima la distribuzione delle classi di uso del suolo e successivamente l'assetto geomorfologico. L'aspetto più interessante risiede nell'ultima fase, in cui non vengono assegnati pesi ai dati geomorfologici, ma, attraverso l'esperienza dell'operatore, viene quantificata la loro influenza sulla stabilità, analogamente a quanto avviene con l'approccio geomorfologico.

L'analisi degli inventari di frana cerca di prevedere i futuri scenari di instabilità dalla distribuzione attuale e passata dei depositi di frana. Infatti, soprattutto in terreni prevalentemente argillosi, gran parte degli eventi franosi rappresentano riattivazioni di fenomeni preesistenti, mentre rari sono gli eventi di neoformazione.

La zonazione della pericolosità può essere, pertanto, ricavata, anziché da un'interpretazione soggettiva della carta inventario, dalla determinazione, per ogni unità o sotto-unità geologica, della percentuale di area interessata da frane (INDICE DI FRANOSITA'). La metodologia è pertanto oggettiva e riproducibile da diversi operatori. (PAI – ABTevere).

Controindicazioni: l'identificazione e la mappatura delle aree di deposito-erosione, primo passo in ogni valutazione della pericolosità da frana, sono operazioni complesse, soggette ad errore ed a incertezze ampiamente non controllate. Ciò risulta particolarmente accertato per movimenti di versante antichi o inattivi, per frane che lasciano deboli tracce morfologiche, per eventi avvenuti in aree boscate, su versanti in cui viene attuata un'aratura intensiva ed in aree a recente urbanizzazione.

Gli inventari di frana forniscono inoltre una copertura spaziale quasi oggettiva, ma, in linea generale, con scarse o nulle informazioni sul tempo di ritorno degli eventi.

In ultimo, le mappe si basano sull'ipotesi errata che la presenza/assenza di frana sia una variabile continua nello spazio il che può indurre in grossi errori (aree stabili come le pianure possono ad esempio avere IF molto elevati).

L'adozione di un approccio di tipo statistico può contribuire a definire una maggiore oggettività nella valutazione critica del contributo dei numerosi fattori che governano la stabilità di versante, sostanzialmente attraverso il confronto della distribuzione spaziale delle frane con i parametri predisponenti. I risultati di tale operazione possono generalizzarsi ad aree attualmente non interessate da fenomeni di frana, ma suscettibili a futura instabilità. La difficoltà maggiore consiste nel definire i meccanismi di frana e nell'identificare e valutare sistematicamente i diversi fattori che concorrono all'instabilità di pendio. Un importante vantaggio deriva dalla possibilità di convalidare l'importanza di ciascun fattore e, dunque, discriminare i dati di entrata nel processo di analisi della pericolosità, in modo interattivo. L'uso del G.I.S. rende queste operazioni relativamente facili ed attuabili anche su aree vaste.

Tra i principali svantaggi di queste metodologie vi sono la gravosa attività di raccolta dati necessaria per la corretta valutazione dei fattori predisponenti da correlare con gli eventi franosi, nonché la necessità di specifiche competenze statistiche per la gestione ed elaborazione di questi dati.

Inoltre, l'approccio statistico può perdere di vista il contatto con la realtà fisica sottovalutando ad esempio i fenomeni in cui alcune grandezze, statisticamente poco significative, giocano invece un ruolo importante per l'instabilità potenziale.

Sono finalizzati alla determinazione delle condizioni di stabilità/instabilità (fattore di sicurezza) e sono ampiamente utilizzati nella valutazione della pericolosità locale.

I modelli deterministici si basano sulla comprensione delle leggi fisiche che controllano la stabilità del pendio e utilizzano i parametri da cui le leggi dipendono (pressioni, spessore terreno, caratteristiche geotecniche, etc.).

I modelli probabilistici by-passano il problema legato all'incertezza nell'attribuzione di certi parametri geotecnici ai terreni e permettono di introdurre il concetto di tempo di ritorno nei fattori di innesco del fenomeno franoso.

Un altro approccio geotecnico rientra sotto l'analisi di tipo cinematico, ovvero finalizzata allo studio delle condizioni che possono determinare il movimento dei

blocchi senza fare riferimento alle forze che lo producono (es. analisi di stabilità di versante).

La previsione temporale della pericolosità consiste essenzialmente nella definizione della probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi. A differenza della previsione spaziale, che fornisce indicazioni sulla pericolosità relativa dei diversi versanti, la previsione temporale fornisce una pericolosità assoluta.

La previsione dell'evoluzione consente di individuare l'area che può essere interessata, direttamente o indirettamente, da una frana. Tale concetto è analogo a quello di "bacino di pericolosità (DRM, 1990), definito dalla zona in cui sono riunite le condizioni che stanno alla base del meccanismo di instabilità.

Nel caso di frane di scivolamento il "bacino di pericolosità è generalmente limitato all'estensione del versante o a una sua porzione; nel caso di colate di detrito, che interessano spesso impluvi o aste fluviali montane, esso coincide spesso con un bacino in senso idrografico.

Analisi della vulnerabilità

La vulnerabilità è definita come il grado di perdita su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità (Varnes et al., 1984).

E' espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è una funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio.

$V = V(I, E)$.

In pratica la vulnerabilità esprime il raccordo che lega l'intensità del fenomeno alle sue possibili conseguenze.

Oltre all'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio, nella definizione della vulnerabilità entrano in gioco fattori, di difficile parametrizzazione, legati all'organizzazione sociale dell'area in esame. A parità di altre condizioni infatti la vulnerabilità è minore laddove sono attivati i programmi di prevenzione e di emergenza.

La valutazione della vulnerabilità si può basare su criteri statistici, nel caso di fenomeni ripetibili e frequenti. Per esempio, nel caso di crolli si può stimare su base statistica la probabilità che il distacco di un masso produca un determinato danno su un edificio.

In generale, tuttavia, la stima della vulnerabilità si basa su criteri essenzialmente soggettivi.

Valutazione della vulnerabilità

La stima della vulnerabilità di un elemento esposto, data una certa tipologia di fenomeno, avviene attraverso la constatazione del danno subito da un altro elemento, costituito da analoghe caratteristiche strutturali, sottoposto ad un analogo fenomeno della stessa intensità. Quindi il processo metodologico necessario alla stima della vulnerabilità dovrebbe considerare i seguenti passaggi:

- definizione dell'ubicazione dell'elemento a rischio (a monte, nel corpo di frana, a valle)
- analisi storica e/o diretta del danneggiamento dell'elemento a rischio in relazione a tipologie di fenomeni distinte e di diversa intensità
- analisi intensità/danno di classi di elementi a rischio caratterizzati da stessa tipologia costruttiva/strutturale rispetto a quello in esame
- determinazione della funzione di vulnerabilità ed utilizzo dell'interpolazione così ottenuta per estrapolare la vulnerabilità di ciascuna classe di elementi esposti rispetto ad un intervallo di valori di intensità minime e massime attese.

Influenza dell'ubicazione sulla vulnerabilità

Per i beni posizionati a monte dell'area in frana, il parametro che governa la vulnerabilità di un bene è la distanza di questo dall'area di corona della frana.

Il bene posto a monte dell'area in frana risente del detensionamento dell'ammasso, attraverso la ripercussione delle fratture di tensione, prima nelle fondazioni e quindi nelle tamponature.

Per i beni posizionati all'interno dell'area in frana l'elemento che governa la vulnerabilità è la velocità del materiale che costituisce il corpo di frana. I movimenti da lenti a veloci hanno ripercussioni sulle strutture che vanno dal lesionamento alla perdita della funzionalità sino all'inagibilità. Grande importanza assume il piano di posa delle fondazioni rispetto alla profondità della superficie di scorrimento.

Per i beni posizionati a valle, la vulnerabilità dipende essenzialmente dalla forza d'impatto con cui la massa del corpo di frana investe la struttura. In questo caso un ruolo importante viene giocato dalla capacità di assorbire l'energia rilasciata durante l'impatto da parte della struttura e da come questa è orientata rispetto alla direzione del flusso del materiale mobilizzato.

La determinazione del rischio prevede la parametrizzazione e la combinazione di una serie di fattori di natura socio-economica e geologico-ambientale, la cui valutazione richiede spesso l'interazione di diverse professionalità e competenze (geologi, ingegneri, archeologici, storici dell'arte, architetti, etc.).

Le tre diverse componenti del rischio (pericolosità, vulnerabilità e indice di esposizione degli elementi a rischio) possono pertanto essere determinate con un diverso grado di dettaglio a seconda delle competenze degli operatori e delle informazioni ottenibili sul territorio.

Nell'ambito della valutazione del rischio è di fondamentale importanza la definizione delle soglie di "rischio accettabile", in quanto queste permettono l'interpretazione critica dei risultati finali delle attività di previsione (calcolo del rischio, zonazione) e, inoltre, consente di individuare le priorità di intervento e di scegliere le misure di prevenzione.

In base all'obiettivo perseguito ed al tipo di dati disponibili le soglie accettabili possono essere definite in termini di rischio totale oppure di rischio specifico. Inoltre, nel campo della progettazione di opere di ingegneria, è diffuso un tipo di approccio più semplice in base al quale vengono definite delle soglie accettabili in termini di "probabilità di rottura", prescindendo dal quadro formale di analisi del rischio.

N.B. Data la difficoltà oggettiva di condurre un'analisi esaustiva e quantitativa sul rischio da frana, la quasi totalità degli esempi in letteratura possono essere ricondotti in realtà all'analisi della "susceptibilità" o "propensione" al danno più che ad un'analisi di rischio vera e propria.

Es. La sovrapposizione degli elementi a rischio su un inventario di frana o su una carta di suscettibilità franosa è un'analisi di propensione al danno e non di rischio.

Il rischio specifico è il grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità. E' espresso in termini di probabilità annua. Per una determinata tipologia di elementi a rischio E e per una data intensità I il rischio specifico è dato da:

$$Rs(I,E) = H(I) V(I,E).$$

Il rischio specifico è un parametro basato principalmente sul fenomeno e la sua determinazione è pertanto comune fra i tecnici specialisti nel campo della stabilità di versante.

Dal rischio specifico può essere stimato il rischio totale in base alla relazione:

$R(I,E) = R_s(I,E) W(E)$ con $W(E)$ pari al valore economico-sociale degli elementi a rischio.

La determinazione del rischio specifico è particolarmente importante in quanto permette di stimare le conseguenze dei fenomeni franosi indipendentemente dal numero e dal valore economico degli elementi a rischio.

Il rischio specifico può, in certi casi, essere impiegato più agevolmente del rischio totale, per la definizione di soglie di rischio accettabile.

Analisi del rischio

Il danno potenziale corrisponde alla entità potenziale delle perdite dovute ad un evento con intensità prefissata. Può essere espresso in termini monetari o di numero o quantità di unità esposte. Per una determinata tipologia di elemento a rischio E e per una data intensità I , il danno potenziale è dato da:

$$WL(I,E) = W(E) V(I;E)$$

Il danno potenziale WL tiene conto del valore degli elementi a rischio nel caso di beni monetarizzabili e del loro potenziale grado di perdita o di danneggiamento, funzione delle caratteristiche degli elementi stessi e dell'intensità del fenomeno. La valutazione del danno potenziale richiede quindi soltanto sommarie indicazioni sull'intensità della frana (che influenza la vulnerabilità) ed è in gran parte basata sulle caratteristiche degli elementi a rischio, prescindendo da una valutazione della pericolosità dell'evento franoso.

Il rischio può infatti essere stimato dal danno potenziale facendo delle ipotesi sulla ricorrenza dei fenomeni (pericolosità H) in base alla relazione:

$$R(I,E) = WL(I,E) H(I)$$

Il rischio totale è il valore atteso delle perdite in termini di danni alla salute umana o alla proprietà e alle strutture e delle perturbazioni alle attività economiche ad essi collegati, dovuti all'occorrenza di un fenomeno franoso. Si esprime in termini di percentuale, numero o quantità di unità perse per anno.

Esso è funzione degli elementi a rischio E e di una data intensità I del fenomeno di frana:

$$R(I,E) = H(I) V(I,E) W(E)$$

Un esempio di applicazione della zonazione da rischio è fornito dalle indicazioni del DPCM 29.09.1998 che definisce le 4 classi di rischio totale cui deve rifarsi la pianificazione di bacino in materia di difesa del suolo.

Rischio		Descrizione
moderato	R1	per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali;
medio	R2	per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumita' del personale, l'agibilita' degli edifici e la
elevato	R3	per il quale sono possibili problemi per l'incolumita' delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilita' degli stessi, la interruzione di funzionalita' delle attivita' socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
molto elevato	R4	per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attivita' socioeconomiche.

> 1.4 La suscettività di frana, un approccio statistico basato su reti neurali

Lo scopo di questo lavoro [4] è quello di valutare la suscettibilità di frana in alcune aree campione della media valle del fiume Serchio e dell'alta Versilia utilizzando approcci diversificati in relazione alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e climatiche dell'area di studio, alla tipologia dei movimenti franosi investigati ed alla disponibilità di dati di tipo geotecnico ed idrogeologico. Questo studio trae spunto da un più ampio progetto promosso dalla Regione Toscana e dall'APAT, Servizio Geologico Nazionale con lo scopo di definire la pericolosità di frana all'interno dell'area del foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana (scala 1:50.000). La metodologia di zonazione dei versanti sulla base del grado di propensione al dissesto è stata sviluppata per passi successivi. Nella media valle del Serchio è stata applicata una metodologia di tipo statistico che ha previsto la selezione di un certo numero di fattori predisponenti legati all'instabilità dei versanti, l'analisi condizionale e multivariata e la suddivisione del territorio in aree con gradi di suscettibilità di frana diversificati. Nell'area di Cardoso (alta Versilia), ben nota a causa dell'evento meteorologico disastroso del 1996, è stato invece adottato un modello sperimentale di tipo meccanico-idrologico, fisicamente basato, finalizzato alla previsione spaziale delle aree instabili. I risultati ottenuti dall'elaborazione di tutte le informazioni attraverso le differenti metodologie ed il supporto di software GIS sono stati infine confrontati

con la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all'instabilità dei versanti, mostrando un buon grado di correlazione, sebbene la ricerca sia tuttora in fase sperimentale e necessiti di approfondimenti utili alla comprensione dei vantaggi e delle limitazioni di tale approccio metodologico.

Il presente studio sperimentale è stato effettuato nell'ambito della Scuola di Dottorato in Scienze della Terra dell'Università di Pisa ed è finalizzato alla valutazione della suscettibilità di frana attraverso un approccio di tipo multidisciplinare che comprende studi di tipo geologico, geomorfologico, litologico-tecnico e geotecnico, idrogeologico, statistico e l'applicazione di tecniche GIS.

La valle del fiume Serchio e l'alta Versilia, cui le applicazioni di questo lavoro si riferiscono, presentano complesse problematiche connesse con l'instabilità dei versanti. Infatti, le particolari caratteristiche geologico-strutturali, geomorfologiche, sismiche e climatiche causano un'alta densità di dissesto cui sono soggetti numerosi centri abitati, infrastrutture, aree produttive e agricole, con gravi danni economici e sociali.

Il lavoro si è articolato in buona parte in campagna per quanto concerne il rilevamento geomorfologico e geomeccanico, ma anche in laboratorio, dove sono state effettuate prove di compressione uniassiale (Point Load Test) su blocchi di roccia irregolari, analisi granulometriche per setacciatura e sedimentazione su campioni di terra disturbati e la determinazione dei limiti di Atterberg. A questa fase preliminare del lavoro ne è seguita una di elaborazione in ambiente GIS delle carte tematiche relative alle caratteristiche geomeccaniche delle formazioni geologiche, all'acclività dei versanti, dell'uso del suolo, ecc., nonché, ove possibile, la parametrizzazione geotecnica ed idrogeologica dei materiali costituenti le coltri detritiche superficiali (coesione, angolo di attrito, permeabilità, trasmissività). La fase finale del lavoro ha visto l'elaborazione dei dati rilevati direttamente in campagna o determinati in laboratorio e integrati con quelli già esistenti, mediante l'utilizzo di tecniche statistiche diversificate e di metodi deterministici, fisicamente basati.

Il risultato finale è, per i primi, una zonazione del territorio in gradi diversi di suscettibilità, per il secondo tipo di approccio, l'individuazione delle celle instabili sotto certe condizioni al contorno.

Il risultato dell'una e dell'altra applicazione è un documento cartografico di grande utilità in fase di studio preliminare che tuttavia non esime l'utilizzatore dalla conoscenza dei criteri e delle assunzioni adottate e dei limiti della

metodologia statistica, o deterministica, utilizzata e che non può prescindere da una verifica di campagna dei risultati ottenuti.

Inquadramento geologico e geomorfologico

Nel territorio studiato affiorano molte unità tettoniche dell'Appennino Settentrionale: le unità metamorfiche delle Alpi Apuane, la Falda Toscana e le Unità Subliguri e Liguri (Unità Canetolo, Unità Ottone, Unità Gottero).

Le suddette unità tettoniche devono il loro attuale assetto strutturale al processo legato al riavvicinamento tra paleo-Africa e paleo-Europa iniziato al Cretaceo superiore e sviluppatosi in due fasi distinte: la prima, «fase ligure» e la successiva, denominata «fase toscana», descritta da Carmignani & Kligfield (1990): dal Cretaceo sup. al Miocene sup. si ha uno stile eminentemente compressivo, responsabile dell'impilamento e della messa in posto delle unità tettoniche, mentre dal Miocene sup. al Pliocene inf. la tettonica di tipo distensivo dà luogo alla formazione di depressioni tettoniche, nelle quali sedimentano potenti successioni fluvio-lacustri villafranchiane.

La Successione Toscana non metamorfica affiora in gran parte in Garfagnana a partire dalla Formazione del Calcere Selcifero di Limano fino al Macigno, al di sopra del quale giacciono in discordanza angolare e assetto sub-orizzontale i depositi fluvio-lacustri del bacino di Barga-Castelnuovo di Garfagnana. Si tratta prevalentemente di sabbie e sabbie argillose, ghiaie, conglomerati e di ghiaie e conglomerati a prevalenti elementi di Macigno; la zona è interessata da sistemi di faglie dirette con direzione NW-SE, responsabili della formazione della depressione in cui si è impostata la valle del Serchio.

Nell'area di Cardoso affiorano le formazioni del Complesso Metamorfico Aprano (Copertura mesozoica e terziaria con metamorfismo alpino in facies di scisti verdi) tra cui prevale lo Pseudomacigno. Si tratta generalmente di alternanze di metarenarie quarzoso-feldspatiche grigie, in banchi potenti fino a 2 m, e filladi ardesiache e siltitiche, di colore generalmente grigio o nero.

L'alta Versilia si distingue per alcune caratteristiche geomorfologiche peculiari: elevata energia del rilievo, versanti ben sviluppati in lunghezza con acclività mediamente superiore ai 35° ed estesi affioramenti di roccia nuda, soprattutto in prossimità delle vette.

Differenti sono invece le caratteristiche morfologiche della Garfagnana, caratterizzata da rilievi collinari e montani con versanti moderatamente acclivi e ampie superfici sub-pianeggianti, ben sviluppate lungo il fondovalle del fiume

Serchio e nell'area di Barga, dove rappresentano lembi di antichi conoidi alluvionali.

Queste ultime risultano reincise dai corsi d'acqua che scendono verso il fiume Serchio, dando origine a valli strette, con versanti scarsamente sviluppati in lunghezza ed acclivi, dove si concentrano gran parte dei fenomeni franosi.

In questa configurazione morfologica fondamentale del territorio, risulta spesso evidente sul paesaggio l'influenza delle caratteristiche litologiche delle formazioni affioranti. Forme aspre e versanti acclivi, localmente sub-verticali, si trovano in corrispondenza delle litologie calcaree o calcareo-metamorfiche. In aree tettonicamente ribassate, dove affiorano i complessi tettonici superiori, rappresentati in prevalenza da complessi argillitici basali e da successioni torbiditiche, si hanno le forme ad energia del rilievo più blanda. I sedimenti fluviolacustri villafranchiani, affioranti nelle zone più ribassate della depressione tettonica della Garfagnana, sono spesso sormontati da depositi alluvionali terrazzati che, distribuiti a varie quote, interrompono il profili dei versanti e testimoniano le modificazioni recenti del reticolo idrografico.

Le due zone studiate presentano caratteristiche molto differenti anche in relazione alla tipologia prevalente dei movimenti franosi. Infatti, se nell'area della media valle del Serchio i movimenti franosi sono costituiti in prevalenza da scorrimenti e frane complesse che coinvolgono le coltri detritiche di spessore variabile (1-5 metri) con una densità areale di 30 frane/km², l'area dell'alta Versilia è interessata da fenomeni franosi riconducibili a colate rapide di terra e detrito che coinvolgono coperture di esiguo spessore (< 2 m) e che, come in seguito all'evento catastrofico del giugno 1996, possono raggiungere densità areali di 80-100 frane/km².

Valutazione della suscettibilità di frana

Il lavoro di costruzione di mappe di suscettibilità di frana è proceduto per passi successivi, adottando tecniche statistiche diversificate ed un approccio deterministico, fisicamente basato.

L'approccio statistico prevede l'applicazione delle tecniche dell'analisi condizionale, successivamente quelle della statistica multivariata (regressione logistica, analisi discriminante) ed infine l'applicazione delle reti neurali artificiali.

Tutte queste tecniche rappresentano metodi indiretti di tipo quantitativo che, pur diversificandosi dal punto di vista concettuale, sono accomunate dal fatto che i risultati sono espressi in termini di probabilità futura di frana, caratteristica che le

contraddistingue ulteriormente dai modelli deterministici. L'analisi condizionale risulta un metodo concettualmente semplice e di facile applicazione attraverso cui l'importanza, o peso statistico, dei fattori dell'instabilità è stata valutata per ciascuno in modo indipendente dagli altri, attraverso il confronto con la distribuzione dei dissesti (Reichenbach *et al.*, 2002). Tale applicazione costituisce un primo passo verso l'analisi multivariata vera e propria (Clerici *et al.*, 2002). Le tecniche della regressione logistica e dell'analisi discriminante permettono una valutazione quantitativa, affidabile ed oggettiva dell'importanza, o peso statistico, dei fattori predisponenti al dissesto e delle loro reciproche strutture di relazione, giungendo alla definizione di un modello di cui è possibile quantificare l'attendibilità. Per quanto riguarda l'applicazione delle reti neurali artificiali, a differenza delle metodologie finora descritte, non è possibile conoscere il criterio di valutazione delle relazioni tra le variabili introdotte nel modello.

Conditio sine qua non per l'applicazione dei modelli statistici è la realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi, derivabile dal rilevamento geomorfologico sul terreno e dall'analisi di foto aeree, nonché la selezione di un numero opportuno di fattori predisponenti al dissesto, rappresentabili attraverso carte tematiche, o *layer*, tra loro sovrapponibili e successivamente oggetto dell'elaborazione spaziale in ambiente GIS. Risulta inoltre di fondamentale importanza la scelta di una unità di mappa (*mapping unit*, o dominio omogeneo) definita come quella porzione di territorio che contiene un set di parametri tale da poterla differenziare attraverso confini ben definiti dalle unità adiacenti. Le unità di mappa devono essere ricavate per l'intera area secondo una metodologia il più possibile oggettiva. Ciò effettuato, ogni analisi successiva si riferirà e tratterà le unità di mappa come domini spaziali omogenei sia dal punto di vista del set di parametri che le caratterizza, sia dal punto di vista del grado di propensione al dissesto.

Inoltre la scelta dell'unità di mappa è necessaria alla generazione di un database dei dati relativi alla descrizione di un certo fenomeno e per la costruzione di un modello predittivo della distribuzione spazio-temporale di quel dato fenomeno.

L'approccio deterministico, che a differenza dei metodi statistici, basati sui dati di *input*, è in grado di modellizzare il processo alla base dell'instabilità (approccio *process driven*), richiede una conoscenza approfondita delle caratteristiche

geotecniche e idrogeologiche delle coperture detritiche interessate dei movimenti franosi.

In questo studio è stato utilizzato un modello meccanico-idrologico ampiamente conosciuto e testato, sviluppato in ambiente GIS: si tratta del modello di Montgomery e Dietrich che si compone di un modello di instabilità all'equilibrio limite e di un modello idrologico: tale modello è stato opportunamente modificato da Campus *et al.* (2005) per tener conto della coesione del materiale. Inoltre, al fine di ricavare correttamente le variabili topografiche e idrologiche necessarie al funzionamento del modello sono state utilizzate specifiche tecniche GIS e un'applicazione sviluppata da Tarboton (2002) in ambiente ArcGIS, dedicata all'analisi dei modelli digitali del terreno (TauDEM: *Terrain analysis using Digital elevation Models*).

Analisi condizionale

Nella prima fase di questo lavoro, è stata applicata l'analisi statistica condizionale alle unità di condizioni uniche (UCU). La scelta delle Unità di Condizioni Uniche implica la classificazione dei fattori predisponenti in un numero limitato di classi. Per ciascun fattore predisponente si ottiene così una carta tematica, o *layer*. La sovrapposizione dei diversi *layers*, ottenuta in ambiente GIS, applicando tecniche di analisi spaziale unitamente all'algebra di mappa, porta alla definizione dei domini omogenei (UCU), caratterizzati da combinazioni uniche delle classi in cui i fattori sono stati suddivisi. Il numero e la dimensione delle unità ricavabili dipende essenzialmente dal criterio utilizzato nella riduzione in classi dei diversi fattori.

Infine, calcolando l'indice di frana in ciascuna UCU (rapporto percentuale tra l'area in frana in ciascuna UCU e l'area della UCU) è stato possibile effettuare un primo tentativo di valutazione del grado di propensione al dissesto del territorio, secondo quanto espresso nell'assunto di Bayes. Infatti dal punto di vista formale, la probabilità condizionata è data da:

$$P(f | UCU) = \text{area in frana} / \text{area UCU},$$

dove $P(f | UCU)$ rappresenta la probabilità (P) di frana (f) data una certa combinazione dei fattori predisponenti (UCU).

Infine, la distribuzione di frequenza dell'indice di frana in ciascuna UCU è stata analizzata attraverso un algoritmo di calcolo computerizzato, algoritmo di Jenks, al fine di rendere più oggettiva possibile l'individuazione dei valori soglia delle classi di suscettibilità di frana in cui suddividere il territorio.

Analisi discriminante stepwise

L'analisi discriminante è una tecnica che si basa sull'individuazione di variabili di gruppo (*grouping variables*) cui associare ciascuna le unità di mappa del dominio d'indagine. Significa attribuire ciascuna unità in cui il territorio è stato suddiviso ad uno dei gruppi scelti come base per la classificazione: nel nostro caso il gruppo delle unità stabili ed il gruppo delle unità instabili. L'appartenenza a tali gruppi è stabilita a priori sulla base di una soglia di cut-off, determinata dal valore di densità di dissesto medio sull'intera area di indagine (rapporto percentuale tra area in frana ed area totale). L'analisi discriminante definisce per ciascuna UCU la probabilità di appartenenza a ciascuno dei due gruppi (unità stabili ed unità instabili). Da ricordare che nell'analisi discriminante la probabilità di appartenenza di un'unità a un gruppo è la stessa per tutti i gruppi, dunque indipendente dalla numerosità dei gruppi stessi.

L'analisi stepwise adotta un procedimento alla fine del quale vengono introdotte nel modello esclusivamente quelle variabili quantitativamente più efficaci per una corretta classificazione dei casi nei due gruppi. Il termine stepwise sottolinea il fatto che il processo avviene passo-passo per immissione ed eliminazione di variabili, valutando per ciascun passo il contributo, in termini di capacità predittiva del modello, relativo all'immissione o eliminazione di una variabile.

Il metodo di selezione delle variabili si basa sulla valutazione della «Lambda di Wilks» calcolata per ciascuno step. Viene infatti introdotta nel modello quella variabile che rende minima la lambda complessiva. Inoltre, esiste una soglia di significatività statistica per ciascuna variabile (valore F), una misura dell'attendibilità del contributo relativo alla discriminazione tra i gruppi, che concorre a determinarne l'inserimento o la rimozione.

Per ciascun gruppo viene calcolato un insieme di coefficienti definiti come coefficienti delle funzioni di classificazione di Fisher e necessari a calcolare l'appartenenza dei casi a ciascun gruppo. Infine è possibile effettuare una analisi di cross-validazione che mira a verificare la bontà del modello. Infatti l'attribuzione di ciascun caso ad uno dei gruppi avviene attraverso la stima dei coefficienti delle funzioni di classificazione ottenuta utilizzando tutti i casi tranne quello in oggetto. La funzione di riclassificazione viene pertanto calcolata tante volte quante sono le osservazioni.

Regressione logistica

L'analisi di regressione logistica è un caso speciale dell'analisi di regressione lineare allorquando la variabile dipendente non è quantitativa, bensì dicotomica, ovvero può assumere la modalità «1» quando possiede un certo attributo o la modalità «zero» nel caso contrario.

Il problema di una variabile risposta qualitativa può essere trasformato con l'utilizzo di variabili dicotomiche zero-1, vero/falso, presenza/assenza. In tutti questi casi il modello di riferimento è la regressione logistica, uno dei più importanti metodi predittivi nell'analisi esplorativa dei dati.

Il modello di regressione logistica applicato in questo studio appartenente ai Modelli Lineari Generalizzati. Un GLM consiste di tre componenti: una componente casuale: Y_i , con $i = 1, \dots, n$ variabili casuali indipendenti, ognuna con distribuzione appartenente alla famiglia esponenziale; una funzione lineare chiamata, predittore lineare:

$\eta_i = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik}$ da cui dipendono i valori attesi μ_i di Y_i ; una funzione legame $g(\mu_i) = \eta_i$, che trasforma il valore atteso della variabile risposta nel predittore lineare.

Il modello di regressione logistica è definito sulla base dei valori stimati in termini di probabilità che un evento si verifichi in un campione. Ciò che si ottiene è π_i , la probabilità che si verifichi un successo, ovvero la probabilità che la variabile risposta Y assuma una modalità piuttosto che un'altra data una certa combinazione delle variabili esplicative, ovvero $\pi_i = \Pr(Y = 1 | X = x)$ oppure $\pi_i = \Pr(Y = 0 | X = x)$.

Più specificatamente, in un modello di regressione logistica, è possibile definire una funzione della probabilità stimata di un evento, funzione dei valori osservati delle n variabili esplicative introdotte nel modello, secondo quanto segue:

$$\ln \frac{(\pi_i)}{(1-\pi_i)} = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik}$$

Il membro sinistro definisce la funzione *logit* come logaritmo del rapporto tra la probabilità di successo (π_i) e quella di insuccesso ($1 - \pi_i$), definito *Odds* dell'evento:

$$\text{logit}(\pi_i) = \ln \frac{(\pi_i)}{(1-\pi_i)}$$

Reti neurali artificiali

Le reti neurali rappresentano una tecnica statistica sviluppatasi agli inizi degli anni '80, ma che solo recentemente ha riscontrato notevole interesse da parte degli statistici, ma non solo. Nelle Scienze della Terra, ad esempio, sono numerosi gli studi che presentano un approccio di questo tipo allo studio di fenomeni inerenti il dissesto idrogeologico, la pericolosità di frana, l'analisi dei dati geologici e geomorfologici.

Il principale vantaggio delle reti neurali è quello di dimostrare una notevole capacità di adattamento ai dati osservati, in modo particolare in presenza di database voluminosi anche caratterizzati da informazioni lacunose o imprecise.

Una rete neurale è composta da un insieme di elementi di calcolo elementari, *processing elements* (PEs), detti neuroni, collegati tra loro per mezzo di connessioni pesate ed organizzati in livelli differenziati, o *layers*. Ciascun PE costituisce un'unità autonoma in contatto con i neuroni presenti negli strati vicini da cui riceve una serie di informazioni (segnali in input) che ne determinano l'attivazione. Ciascun segnale è corredato da un'informazione relativa al peso di tale connessione che ne determina l'importanza. I pesi sono coefficienti adattivi, modificabili in base ai segnali che viaggiano sulla rete secondo un algoritmo di apprendimento.

Una rete neurale si compone in strati con funzionalità diverse: strato di input, di output e strati nascosti (*hidden layer*). Per quanto riguarda la direzione di flusso delle informazioni e delle elaborazioni, nelle reti denominate *feedforward* l'informazione viaggia in una sola direzione passando da un livello a quello successivo senza mai effettuare cicli di ritorno. Al contrario, in quelle *feedback* l'informazione può compiere il percorso inverso. Inoltre, le reti possono essere definite interconnesse se ciascuna unità di uno strato è connessa con tutte le unità del solo strato successivo, mentre si parla di reti totalmente connesse se la connessione avviene tra ogni singola unità e tutte le unità di ciascuno strato. Infine è possibile distinguere ulteriormente le reti neurali in merito alla modalità con cui vengono stabiliti i pesi delle connessioni: reti a pesi fissati, reti supervisionate e non supervisionate. Se nel primo caso la rete viene depauperata della fase di apprendimento ed analisi esplorativa dei dati, nel caso di apprendimento supervisionato è possibile utilizzare le informazioni relative al valore assunto dalle variabili dipendenti in corrispondenza dei valori delle variabili esplicative.

La rete la cui tipologia si adatta con migliori risultati all'analisi esplorativa dei dati (*data-mining*) è quella che presenta più di uno strato di pesi, detta *Multi-Layer Perceptron* (MLP).

Il percettore multistrato è una rete con tipologia di flusso di *tipo feedforward*, totalmente interconnessa, che può essere assimilabile a una generalizzazione del modello di regressione logistica. La gestione di una rete neurale di questo tipo impone un'attenta valutazione delle variabili esplicative e dipendenti, sia di tipo quantitativo che qualitativo.

> 1.5 Approccio deterministico

Nel caso di frane che interessano la coltre superficiale di ridotto spessore, la valutazione delle condizioni di instabilità può essere effettuata facendo ricorso a metodi deterministici basati su modelli di tipo meccanicoidrologici.

Le cause scatenanti i fenomeni franosi superficiali possono essere di seguito sintetizzate (Enoki, 2001):

- l'infiltrazione verticale dell'acqua, conseguente ad eventi piovosi, genera una falda temporanea in corrispondenza dell'interfaccia tra la copertura detritica ed il livello meno permeabile sottostante con aumento delle pressioni dei pori che rende instabile il pendio;
- l'infiltrazione verticale dell'acqua causa un decremento della suzione e conseguente riduzione della coesione apparente.

Il modello di Montgomery e Dietrich, rappresenta un modello conosciuto, studiato e di facile applicazione che si adatta piuttosto bene al caso di studio di frane superficiali di limitato spessore caratterizzate da una superficie di movimento posta in prossimità del contatto tra la coltre mobilizzabile ed il livello sottostante. Inoltre, la mobilizzazione delle coperture avviene in modo preferenziale in quelle aree dove si verifica la convergenza del deflusso sub-superficiale. Infatti, una delle assunzioni fondamentali sulle quali si basa l'applicazione del modello è la valutazione della capacità di ciascun elemento di calcolo, in cui viene discretizzata l'area in esame, di smaltire il contributo di pioggia drenata e infiltrata in condizioni di stazionarietà del flusso.

In questo studio il modello di instabilità dei versanti di Montgomery e Dietrich è stato modificato da Campus et al. (2005) per tener conto della coesione ed è stata utilizzata inoltre un' applicazione GIS (TauDEM) per il calcolo delle variabili topografiche ed idrologiche.

Le assunzioni di base sono le seguenti:

- pendio infinito;
- superficie di rottura a geometria piana, parallela al pendio, situata in corrispondenza dell'interfaccia tra la copertura detritica superficiale e il livello sottostante (substrato alterato, deposito quaternario);
- criterio di resistenza del terreno espresso secondo Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci:

$$\tau = C + (\sigma - u) \tan \varphi$$

dove τ = resistenza al taglio, C = coesione, σ = componente normale della forza peso, φ = angolo di resistenza al taglio del materiale in corrispondenza del piano di rottura, u = pressione interstiziale;

- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di drenaggio profondo e flusso nel substrato.

Il modello in oggetto rappresenta un primo approccio sperimentale alla valutazione dell'instabilità delle coltri detritiche superficiali nell'alta Versilia. Le ricerche sono tutt'ora in fase di sviluppo e necessitano di ulteriori sforzi per meglio comprendere i processi alla base dell'instabilità e la risposta dei modelli previsionali.

Conclusioni

La realizzazione di carte della pericolosità geologica legata all'instabilità dei versanti risulta un processo complesso che coinvolge un vasto campo di conoscenze relative alle caratteristiche dei movimenti franosi, ai fattori geologici, geomorfologici, climatici, alle cause scatenanti, all'applicazione di modelli predittivi e tecniche di analisi dei dati e che deve far fronte spesso non solo a difficoltà operative, ma anche concettuali.

L'operazione di rilevamento e mappatura dei dissesti, finalizzato alla costruzione di una carta inventario dei fenomeni franosi, punto di partenza di ogni tentativo di valutazione della pericolosità di frana, risulta spesso difficoltosa, soggetta ad errori legati all'interpretazione soggettiva del rilevatore e ad un certo grado di incertezza insito nella mappatura stessa.

Per quanto riguarda la selezione di un certo numero di fattori predisponenti, che si ritiene siano in correlazione con i fenomeni franosi, è indispensabile una conoscenza a priori delle cause dell'instabilità. Inoltre, quando l'operazione di raccolta dati viene effettuata manualmente da operatori diversi, le discrepanze tra

le diverse interpretazioni aumentano notevolmente. Pertanto, la qualità di queste informazioni, come del resto quella delle carte inventario dei fenomeni franosi, rimane del tutto non definita.

I metodi di valutazione dell'instabilità dei versanti sono riconducibili a un numero ristretto di categorie: metodi diretti di tipo geomorfologico, metodi euristici, metodi statistici, metodi deterministici.

L'analisi geomorfologica risulta strettamente legata all'abilità del geologo di valutare le condizioni di instabilità del territorio e di saperne trarre logiche conseguenze. I principali vantaggi consistono nella capacità di adattamento della metodologia a condizioni di instabilità locali e peculiari, mentre il più grande svantaggio è dovuto principalmente all'elevato grado di soggettività intrinseco. I metodi euristici traducono l'abilità del geologo di tradurre in regole specifiche le relazioni tra i fattori geologici e geomorfologici e l'occorrenza delle frane all'interno del territorio. I fattori predisponenti sono così valutati e pesati a priori sulla base della loro presunta importanza.

I metodi statistici risolvono il problema incontrato finora, relativo alla soggettività insita nella valutazione dell'importanza dei singoli fattori predisponenti. Dal momento in cui la valutazione dell'importanza relativa dei fattori predisponenti viene effettuata su base statistica, in base al confronto con la distribuzione spaziale dei dissesti, allora la valutazione dell'instabilità dei versanti avviene in modo quanto più oggettivo possibile.

Dal confronto tra le diverse applicazioni eseguite in questo lavoro è possibile notare come il metodo dell'analisi condizionale tenda a sottostimare le condizioni di instabilità dell'area studiata, dando maggior risalto alle aree ad instabilità intermedia e bassa. I risultati ottenuti attraverso l'analisi multivariata rendono invece maggiormente evidenti e continue dal punto di vista della distribuzione spaziale, le aree dove si concentrano i movimenti franosi e dove vi è maggiore probabilità che si verifichino i dissesti in futuro, incrementando il grado di dettaglio in aree complesse. Inoltre è da sottolineare il fatto che i risultati del modello di regressione multivariata sono il risultato di un processo statistico in cui i fattori predisponenti sono stati valutati sulla base delle loro reciproche strutture di relazione, pesati quantitativamente sulla base delle relazioni stabilite dal modello, con la possibilità di valutare, attraverso i test di significatività, la bontà di tali valutazioni. In alternativa, possono essere presi in considerazione i modelli deterministici, che a differenza di quelli statistici – di tipo data-driven – sono basati sulla parametrizzazione dei processi che generano l'instabilità e vengono

definiti modelli process-driven. Un tale approccio consente di valutare l'influenza dei fattori fisici legati all'instabilità dei pendii in maniera quantitativa e oggettiva.

La limitazione più evidente risulta la necessità di reperire una grande quantità di dati di tipo geologico-tecnico ed idrogeologico, necessari alla definizione dei parametri fondamentali dei terreni, operazione che, per la valutazione dell'instabilità su vaste aree, può avere costi elevati. Inoltre i risultati ottenibili attraverso l'applicazione di un tale approccio, costituiscono una verifica delle condizioni di stabilità dei versanti piuttosto che un vero e proprio processo inferenziale.

In conclusione, i risultati scaturiti dall'applicazione delle tecniche di analisi multivariata hanno mostrato una valutazione completa delle possibili relazioni tra i diversi fattori predisponenti, incrementando il livello di dettaglio in aree complesse. L'applicazione delle Reti Neurali ha reso possibile ottenere risultati ottimali, riducendo ulteriormente la percentuale di errore nella classificazione dei casi statistici.

Con i metodi deterministici è stato possibile approfondire il livello di conoscenza dei parametri geotecnici delle coperture detritiche e considerare le relazioni tra le condizioni di piovosità e la risposta, in termini di stabilità, dei terreni superficiali.

2. TECNOLOGIE DI AVANGUARDIA NEL MONITORAGGIO FRANE

> 2.1 Laser scanner. Cenni tecnici

Abstract

Il monitoraggio multitemporale degli eventi franosi in roccia da parte del servizio geologico svizzero finora è stato affidato a tecniche geomeccaniche, topografiche e fotogrammetriche classiche.

In particolare, per le pareti in frana che presentano situazioni di rischio per le infrastrutture viarie e ferroviarie, si dispongono apparecchiature sul corpo frana quali estensimetri ed altri elementi che materializzino i punti d'appoggio per le reti topografiche. I primi funzionano in rete per il monitoraggio dei microspostamenti, sub-centrimetrici, degli ammassi rocciosi, ed in genere sono inseriti in una rete che controlla un certo numero di lanterne semaforiche a dovuta distanza dalla frana, segnalando il pericolo ed interrompendo la viabilità in caso di evento anomalo. I secondi permettono la ripetibilità nel tempo del rilievo della rete di

monitoraggio topografica, utile sia in fase di appoggio del modello fotogrammetrico, sia per le misure stesse da essa deducibili. Infine rilievi fotogrammetrici terrestri classici permettono di fornire un modello 3D della parete per le analisi geomeccaniche.

Tali tecniche, utilizzate in integrazione, sono impiegate a vario titolo dalle diverse figure professionali coinvolte; in particolar modo i geologi, geotecnici, traggono utili informazioni riguardo alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso roccioso, al grado di stabilità della parete, alle variazioni di volume dell'ammasso stesso, ed agli eventuali spostamenti. Scopo del seguente lavoro è di illustrare l'avanzamento di una collaborazione in atto con il Canton du Valais per l'introduzione di tecniche laser scanner per il rilievo di pareti rocciose in frana. In particolar modo si esamina il caso studio di una parete denominata Falaise des Trappistes, situata allo sbocco della galleria de la Monnaie, nel comune di Sembrancher. La parete in questione ha dimensioni di circa 100 metri di larghezza per 35 di altezza. La frana è attraversata da una galleria ferroviaria, e al piede vi è situata una galleria stradale. Proprio tale galleria è stata danneggiata nell'inverno del 2003 dalla frana di una porzione di parete.

Tale collaborazione è volta a valutare l'idoneità tecnica di un rilievo con tecniche laser-scanner in tale circostanza, e a svolgere un'analisi tecnico-economica comparativa con le tecniche classiche già descritte. Scopo del rilievo laser scanner è di ottenere un modello tridimensionale della parete, con una precisione paragonabile alle tecniche predette. Il rilievo, a causa della morfologia complessa dell'oggetto, è stato condotto da tre punti differenti per avere la copertura completa della parete, utilizzando quattro prismi riflettenti posizionati in corrispondenza di una rete di inquadramento locale per la registrazione delle acquisizioni. Ciò elimina la necessità di utilizzare gli elementi riflettenti presenti sul corpo frana, che possono essere comunque impiegati come ausilio.

I dati acquisiti vengono successivamente trattati in laboratorio in due fasi successive: una fase preliminare comprende i trattamenti di filtrazione, registrazione dei modelli 3D, texturizzazione dei modelli e creazione dell'immagine solida. Una seconda parte prevedrà analisi di tipo complesso sui modelli ottenuti, volte all'identificazione dei parametri geotecnici e geomeccanici in precedenza elencati, in funzione delle esigenze delle varie professionalità coinvolte.

Introduzione

Il lavoro descritto nasce dall'attuale collaborazione tra il Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino e il CREALP (Centre de Recherche sur l'Environnement ALPin), un organismo pubblico svizzero preposto ad effettuare ricerca in ambito alpino. Il CREALP da anni si occupa di monitoraggio multitemporale di eventi critici che interessano ammassi rocciosi, in particolar modo pareti rocciose in frana. Le tecnologie che il CREALP attualmente utilizza sono le tecniche di rilievo classiche: fotogrammetria e rilievo celerimetrico, rilievi geostrutturali.

Per il monitoraggio in tempo reale dello stato di fatturazione sono utilizzati generalmente estensimetri, applicati alle principali linee di fatturazione dell'ammasso roccioso. Questa strumentazione permette di monitorare in tempo reale gli spostamenti sub-millimetrici dei singoli blocchi rocciosi. I dati raccolti sono inviati a centrali di controllo che sono in grado di inviare ai responsabili messaggi di allertamento tramite rete telefonica gsm e, nel caso in cui la parete rocciosa interessi una via di comunicazione, gestire un impianto semaforico a monte e a valle del sito, che, in caso di pericolo imminente, interrompe la viabilità.

Monitoraggio di eventi franosi in roccia con tecniche laser-scanner

Inoltre in parete sono solitamente installate mire di tipo topografico, attraverso la misurazione delle quali è possibile verificare gli spostamenti globali dell'ammasso roccioso. Scopo della collaborazione è di applicare, ai casi studio in esame, le moderne tecnologie di rilievo laser scanner. I vantaggi derivanti da tale metodologia di rilievo possono essere sia di carattere pratico, sia relativi alla sicurezza degli operatori coinvolti:

- I classici rilievi geostrutturali con le relative misure manuali effettuate con bussola da geologo comportano l'impiego di personale specializzato, con esperienza alpinistica, che si sottoponga a rischi connessi al contesto operativo;
- La produttività di un laser scanner è di gran lunga più elevata di un qualsiasi strumento tradizionale (può acquisire milioni di punti in intervalli di tempo brevi), nell'arco di un'intera giornata (possibilità di acquisizioni notturne);
- In casi estremi si può prestare ad acquisizioni multitemporali installando uno strumento in acquisizione continua;

Permette, effettuato il rilievo in un tempo medio . breve, di effettuare tutte le elaborazioni necessarie in laboratorio, quindi in condizioni operative agevoli.

- Inoltre proprio la natura del dato laser scanner (nuvole di milioni di punti) consente di fornire una descrizione dell'oggetto rilevato che si avvicina maggiormente alla natura continua della realtà di quanto non consentano i tradizionali rilievi topografici e\o fotogrammetrici, permettendo di apprezzare per esempio anche spostamenti di natura locale (in relazione al caso in esame).

L'attenzione del CREALP si è in particolar modo concentrata su un falesia denominata "Falaise des Trappistes" situata in Svizzera, nel Canton du Vallais, nel comune di Sembrancher. Tale falesia ha subito un parziale crollo nell'inverno del 2003.

La parete presenta uno sviluppo orizzontale di circa 100 m, per un'altezza media di circa 35 m ed è caratterizzata dal passaggio di una linea ferroviaria in galleria scavata all'interno dell'ammasso roccioso, e dalla presenza di un paravalanghe stradale al piede. Quest'ultimo è stato parzialmente danneggiato dal crollo che ha causato anche il decesso di un automobilista.

Le finalità del rilievo laser effettuato sono principalmente tre:

- L'integrazione del DEM denso generato dal laser scanner con i software di modellazione geomeccanica sviluppati dal CREALP;
- La verifica della capacità di monitoraggio multitemporale degli eventi franosi in roccia con le attuali tecnologie laser scanner;
- L'utilizzo dell'immagine solida per la determinazione dei parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso (dip e dip direction).

Il rilievo

Il rilievo è stato condotto in due momenti distinti, per poter valutare gli eventuali movimenti residui presenti nel periodo successivo al crollo. Il primo è stato effettuato il 3 febbraio 2004, il secondo il 27 maggio 2004. Il laser scanner impiegato è prodotto dalla RIEGL, modello LMS-Z420, che presenta le seguenti caratteristiche:

- Laser classe 1 (non comporta nessun rischio biologico alle persone) e laser classe 3R (potenza più elevata);
- Distanza massima d'acquisizione: 250 m (classe 1), 1000 m (classe 3R);
- Precisione nella misura della distanza: 5 mm (classe 1), 5 mm (classe 3R);

- Velocità d'acquisizione: 6600 . 10000 punti/sec.;
 - Finestra d'acquisizione: 360" < (orizzontale) x 80" < (verticale);
- Risoluzione angolare: 10 mgon.

Durante le fasi di rilevamento è stato impiegato il solo laser classe 1 per le sue caratteristiche di sicurezza e di maggior precisione. I parametri geomeccanici solitamente impiegati per la descrizione di un ammasso roccioso sono forniti con un orientamento verso il nord. Per questa ragione è indispensabile conoscere il reale orientamento della parete, georeferenziando le scansioni laser. Per ottenere lo scopo si è ricorsi all' acquisizione delle coordinate tramite ricevitori GPS di quattro punti segnalizzati su cui sono stati posizionati i marker ad una altezza nota. I ricevitori GPS impiegati sono prodotti dalla Trimble, modello 4000 Ssi, a doppia frequenza, in abbinamento alle antenne Compact L1/ L2 fornite di Ground Plane per l'eliminazione del fenomeno del multipath.

Il rilievo è stato condotto dal versante opposto della vallata, condizione resa possibile grazie all'orografia particolarmente stretta della valle in corrispondenza dell'area in esame. Le scansioni laser sono state effettuate da tre punti distinti, per evitare zone d'ombra e particolari defilati, e descrivere in modo completo la geometria della parete.

Sugli stessi punti si è provveduto a posizionare i marker indispensabili alla successiva fase di georeferenziazione del modello digitalizzato della parete. È importante quindi che tali punti siano esterni alla porzione di ammasso roccioso in movimento. Infine in verde sono visualizzati i marker corrispondenti alle mire topografiche installati in parete, da noi impiegati come ulteriori punti di legame per l'allineamento automatico delle 3 scansioni e per il controllo locale degli spostamenti durante l'analisi del movimento dei due rilievi multitemporali.

Trattamento dei dati laser

Il trattamento dei dati laser è classicamente divisibile in due parti:

1. Trattamento preliminare dei dati, che comprendono le operazioni seguenti:
 - La filtratura dei dati per l'eliminazione di outliers e gross errors;
 - L'eliminazione assistita dei punti inutili (in particolare vegetazione);
 - L'allineamento e la georeferenziazione dei dati provenienti da diverse scansioni.
2. Creazione del prodotto finale, che nel caso in esame ha riguardato:
 - Modellizzazione, ovvero la creazione del modello a superfici dell'oggetto;
 - L'immagine solida.

Trattamento preliminare dei dati

Per tutte queste fasi è stato impiegato il software LSR 2004, un software sviluppato dagli autori in ambiente universitario per la gestione dei dati laser scanner.

Il risultato del trattamento è una nuvola di punti corretta e completa dell'oggetto, che può essere impiegata:

- All'interno del software di modellazione geomeccanica;
- Per la seconda fase del trattamento dei dati laser per la modellizzazione e la creazione dell'immagine solida.

Modellazione solida

La superficie tridimensionale (multitemporale) ottenuta è stata impiegata per:

- Valutare le variazioni di volume dell'ammasso roccioso;
- Estrarre informazioni riguardo l'esposizione e l'orientamento dei versanti e delle famiglie principali di fratture; tracciare sul modello ed estrarre informazioni legate alla natura tridimensionale del modello, in particolare: curve di livello, sezioni, profili.

Analisi dei risultati (Precisioni ottenibili dal confronto)

La misura di ogni punto da parte del laser scanner consiste nella misurazione di due angoli, zenitale e azimutale, e di una distanza. Tali valori sono misurati nel sistema di coordinate locale della scansione (di tipo sferico), che, per sua natura, non è di facile gestione, sia per il trattamento dei dati, sia per i processi di modellazione e di rappresentazione dei punti. Pertanto è preferibile utilizzare un sistema di coordinate cartesiane. Le coordinate cartesiane X, Y, Z di un punto possono quindi essere considerate come misure indirette non condizionate ed omogenee. Le grandezze X, Y e Z sono funzioni delle grandezze sferiche direttamente misurabili. La determinazione degli angoli è affidata a motori che funzionano in modo indipendente per gestire le rotazioni del corpo dello strumento e le rotazioni del raggio laser. La determinazione della distanza avviene mediante la misura del tempo di volo del raggio stesso. Si può quindi considerare con buona approssimazione che le tre grandezze coinvolte nella determinazione delle coordinate cartesiane siano variabili indipendenti. Per il calcolo della precisione delle misure indirette X, Y e Z e quindi possibile utilizzare la legge di propagazione delle varianze.

Il dato laser scanner per quanto dimostrato in diverse pubblicazioni necessita di essere trattato in modo da eliminare gli outliers e gross errors residui sempre presenti nella nuvola di punti e modellato in modo da ottenere una superficie continua dell'oggetto (nella modellazione sono considerate tutte le operazioni di smooting, filling holes, etc).

Le numerose esperienze maturate dagli autori ci porta a considerare empiricamente che l'insieme di queste procedure provoca una diminuzione della precisione.

Risultati ottenuti e Interpretazione dei risultati

Sulle superfici solide modellate è possibile calcolare, utilizzando il software di modellazione solida Rapid form2004, la deviazione presente tra le due.

Dall'elaborazione sono risultati i seguenti valori:

- Distanza media -19 mm
- Deviazione standard 40 mm

Alla luce dei risultati ottenuti (media ridotta e deviazione standard elevata) la prima ipotesi che è possibile effettuare è che la parete potrebbe aver subito uno spostamento globale con rotazione attorno all'asse baricentrico e spostamenti proporzionali alla distanza tra punto oggetto ed asse baricentrico. Per controllare se tale situazione si sia effettivamente realizzata è necessario effettuare un'analisi locale dei risultati. Il controllo locale su un campione significativo di punti del modello ha fugato tale ipotesi.

Una ulteriore analisi che mette in evidenza gli spostamenti locali presenti tra le due superfici mette in evidenza in effetti in evidenza come la deviazione standard alta ottenuta può essere imputata all'elevata presenza localizzata di vegetazione non a fusto (arbusti e cespugli) presenti sulla parete che difficilmente, con la tecnologia informatica attuale, può essere discriminata e quindi eliminata dal modello laser.

Creazione dell'immagine solida

L'immagine solida è un prodotto che integra il dato laser scanner relativo al DDSM (Dense Digital Surface Model) di una superficie con il dato radiometrico proveniente da un'immagine digitale. L'immagine solida è dunque un'immagine digitale ad alta risoluzione, dall'interno della quale, per ogni pixel dell'immagine, sono state opportunamente inserite le informazioni tridimensionali relative all'oggetto fotografato. Utilizzando l'insieme di queste informazioni è possibile

ottenere, in tempo reale, la posizione nelle coordinate tridimensionali X, Y e Z dei punti rappresentati sull'immagine. Questo avviene semplicemente muovendo il puntatore video nella finestra dell'immagine solida. Per ogni pixel dell'immagine sul quale si trova il cursore il software legge i parametri di orientamento e calibrazione dell'immagine ed i valori contenuti nell'immagine solida ed utilizzando questi valori, calcola le coordinate X,Y e Z del punto. Questi valori, calcolati utilizzando le ben note equazioni di collinearità, sono resi visibili all'operatore in tempo reale in un'apposita finestra di visualizzazione.

L'immagine solida, permette quindi, oltre a poter visualizzare le coordinate tridimensionali di un oggetto semplicemente muovendo il cursore video su un'immagine di effettuare misure di tipo tridimensionale (distanze, angoli, piani,...). La precisione con la quale sono effettuate le misurazioni sull'immagine solida e inoltre priva degli errori computabili alla modellazione solida.

La misurazione sicuramente più utile ed interessante ai fini delle applicazioni geotecniche come quella in esame, e utile poter estrarre informazioni sulle famiglie di fratturazione dell'ammasso roccioso (analisi geostrutturale). I parametri geomeccanici per l'estrazione dei quali è stato dagli autori implementato un modulo interno al software LSR 2004 sono dip e dip direction (massima pendenza del piano medio passante per la faccia di fratturazione e suo orientamento rispetto al nord).

Utilizzando l'immagine solida è stato possibile estrarre le informazioni riguardo le famiglie sono visualizzate attraverso appositi diagrammi di visualizzazione (stereogrammi di fratturazione).

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli rilevati per via classica fornendo ottima corrispondenza tra i valori.

Conclusioni

Riferendosi agli obiettivi che si intendevano perseguire con il presente lavoro e possibile affermare che esiste piena compatibilità, affermata dagli operatori del CREALP, tra il dato proveniente da un rilievo laser scanner e i software di modellazione geomeccanica in loro possesso.

È invece da rilevare che la strumentazione laser scanner in nostro possesso non permette di apprezzare e valutare con assoluta certezza movimenti dell'ammasso roccioso di entità inferiore alle precisioni del metodo di rilievo e di trattamento dati. Tale limite può essere non trascurabile in condizioni in cui piccoli movimenti significano fenomeni geologici importanti ed irreversibili, tipico

degli ammassi rocciosi in frana. Infine è da valutare positivamente la capacità di integrazione del prodotto Immagine Solida con le indagini geomeccaniche sugli ammassi rocciosi, in quanto permette la misurazione rapida e in condizioni di assoluta sicurezza di un numero elevato di parametri in tempi ridotti. Inoltre le informazioni metriche estraibili dall'immagine solida (misure di angoli, distanze, superfici) sono accessibili anche ad utenti non esperti di topografia e fotogrammetria.

> 2.2 Inclinometri MEMS dell'Università di Ferrara

Il monitoraggio delle frane con un sistema inclinometrico stabile permette di avere informazioni in continuo e non a campagna di misure e quindi tenere sotto controllo situazioni che possono diventare di estrema pericolosità con conseguenti danni alle persone. Sistemi fissi di monitoraggio "low cost" permetteranno di avviare una rete capillare per il monitoraggio continuo sul territorio. Nell'articolo viene fatto il confronto del nuovo sistema fisso "low cost" con quelli manuali, attualmente in uso, per evidenziarne la qualità ed affidabilità.[6]

Il concetto di rischio idrogeologico, introdotto per rispondere ai compiti istituzionali di mitigazione dei danni causati dalle catastrofi naturali, intende l'entità del danno atteso in una data area e in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso. In termini analitici, il rischio da frana si può riassumere nella seguente espressione, detta equazione del rischio:

$$(1) R = P \times V \times E$$

dove: P (pericolosità, hazard) e la probabilità percentuale di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo e in una determinata area; V (vulnerabilità) rappresenta il grado di perdita su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio, conseguente al verificarsi dell'evento temuto, e viene rappresentata con una scala da 0 "nessun danno" a 1 perdita totale h; E (valore degli elementi a rischio) e il valore di popolazione, proprietà ed attività economiche, inclusi i servizi pubblici, a rischio in una data area, espresso in termini monetari o di numero/quantità di unità esposte.

Il prodotto dei tre fattori può essere nullo se almeno uno di questi è pari a zero; però, realisticamente, non è possibile eliminare completamente il rischio, ma soltanto ottenerne una mitigazione o attenuazione.

Gli studi effettuati dimostrano che il fattore R è molto cresciuto; quindi occorre introdurre soglie di rischio accettabile, perché l'odierna età non può più tollerare perdite causate da eventi naturali.

La tabella I riporta la descrizione dei livelli di rischio idrogeologico, secondo quattro gradi crescenti: le azioni più urgenti di mitigazione devono necessariamente iniziare dalle classi di rischio maggiori (R3-R4).

La previsione della possibile evoluzione dei fenomeni franosi esistenti e di quelli che potrebbero manifestarsi per la prima volta è possibile solo sulla base di una profonda conoscenza storica ed attuale del territorio.

Il sistema sviluppato è stato oggetto di un servizio TV di RaiNews24 che appare nella pagina web unifetv -

<http://www.youtube.com/watch?v=wA1i6NjrheQ&feature=channel>

<http://www.provincia.re.it/page.asp?IDCategoria=701&IDSezione=4063&ID=87116>.

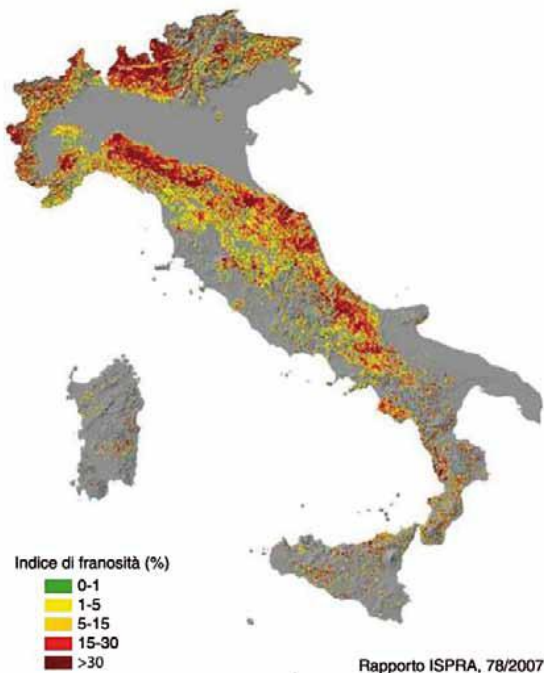


Figura 45. Indice di franosità, derivato dall'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia.
(Fonte: Rapporto ISPRA, 78/2007.)

Allo scopo di fornire un quadro sulla distribuzione dei fenomeni franosi, nel 2007 è stato presentato il progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), il quale ha censito circa 485.000 frane, che interessano un'area di 20 721 km², pari al 6,9% del territorio italiano (fig. 45).

Dato che circa il 69% dei comuni italiani è interessato da problemi di instabilità dei versanti, e più della metà di questi presenta livelli di rischio da elevato a molto elevato, si devono necessariamente intraprendere azioni di mitigazione, quali interventi strutturali (opere di bonifica, consolidamento e sistemazione idrogeologica del territorio) e non strutturali (corretta pianificazione territoriale, adeguati piani di protezione civile e monitoraggio strumentale). A tal proposito, il monitoraggio dei fenomeni franosi non limita la pericolosità, però rappresenta la base per la realizzazione di piani che si propongono come obiettivo la prevenzione dei rischi connessi all'instabilità dei versanti.

Un monitoraggio strumentale presenta i seguenti obiettivi:

- individuazione della superficie di scorrimento della frana e sua relativa profondità per la valutazione dei volumi,
- eventuale esistenza di movimenti in atto e loro collocazione spazio-temporale,
- controllo dei principali parametri idrogeologici della frana,
- controllo di efficienza delle opere di stabilizzazione e di consolidamento realizzate.

Quindi un monitoraggio attento e continuo può essere molto proficuo dal punto di vista della gestione del rischio nell'ambito della protezione civile.

I sistemi più diffusi per il monitoraggio dell'evoluzione degli eventi franosi sono: sonde inclinometriche (manuali o automatiche) basate su singolo sensore, sonde inclinometriche fisse, di solito ottenute dal montaggio di più sonde del tipo precedente;

- sistemi laser scan e satellitari;
- metodi TDR (Time Domain Reflectometry).

La scelta del tipo di approccio dipende dalla tipologia di frana e dallo scopo del monitoraggio: i metodi basati su campagne di misura, che non consentono un'elevata frequenza dei rilevamenti, sono adatti a misure di lungo periodo, mentre i sistemi fissi consentono di eseguire monitoraggi continui e quindi si prestano anche alla realizzazione di sistemi di allerta, con fini di protezione civile.

La necessità di porre sotto attento controllo i territori maggiormente esposti al rischio frane si scontra con la limitata disponibilità di fondi a disposizione degli

enti preposti alla tutela idrogeologica del territorio e con i costi, spesso proibitivi, dei sistemi di monitoraggio fissi.

La tecnologia MEMS

Con MEMS (acronimo di *Micro Electro Mechanical System*), o microsistemi, sono indicati una serie di dispositivi costituiti da elementi di dimensioni micrometriche. Tale definizione non implica la presenza di particolari funzionalità e non è in alcun modo restrittiva riguardo alle caratteristiche costruttive. In linea di principio, si tratta di sistemi che al loro interno racchiudono sia componenti meccanici che elettronici. Questi, assemblati opportunamente, costituiscono trasduttori e/o attuatori direttamente interfacciati con l'elettronica di condizionamento e acquisizione del segnale, che è parte integrante del sistema.

L'invenzione del primo transistor, avvenuta nei Laboratori Bell nel 1947, diede inizio allo sviluppo della microelettronica, che portò ad un altro traguardo storico nel 1958, quando la Texas Instruments realizzò il primo circuito integrato.

I primi passi nell'ambito dei microsistemi furono mossi nel 1954 con la realizzazione di un sensore di pressione al silicio, poi commercializzato nel 1958. Da allora, lo sviluppo dei microsensori si è rivolto alla realizzazione di strutture sempre più complesse, stimolando in tal modo la ricerca e focalizzandola sul miglioramento dei processi costruttivi. La crescita di questa tecnologia ha portato anche a coniare nuovi termini specifici: per esempio, all'inizio degli anni '80, si diffuse il termine "micromachining" per indicare la fabbricazione delle parti meccaniche dei microsistemi. L'affinamento delle procedure impiegate nel micromachining ha condotto per la prima volta, nel 1987, alla realizzazione di veri e propri micromeccanismi, costituiti da parti in movimento fra loro. In precedenza, ciò non era possibile: si potevano sfruttare solamente le proprietà elastiche dei materiali per ottenere la flessione dei componenti e quindi un loro spostamento relativo. Questo traguardo fondamentale consentì di aumentare considerevolmente la versatilità dei microsistemi, aprendo la strada a nuovi campi applicativi. La produzione di MEMS coinvolge principalmente tecniche di fotoincisione, che consentono la lavorazione planare dei materiali utilizzati e tecniche di deposizione e/o accrescimento cristallino per creare strutture nella terza dimensione.

Il fatto che queste tecniche prevedano processi in comune con le normali metodologie di produzione dei circuiti integrati rende conveniente l'integrazione fra componenti meccaniche ed elettroniche che possono essere sviluppate

parallelamente durante la lavorazione, favorendo in questo modo la riduzione delle dimensioni e, di conseguenza, l'abbattimento dei costi. L'evoluzione tecnologica dei microsistemi li ha portati a diffondersi in svariati ambiti, sostituendo gradualmente i dispositivi tradizionali. Inoltre, la presenza d'investimenti sempre maggiori fa capire che in futuro, questo passaggio alla tecnologia MEMS sarà sempre più rilevante. Attualmente, i principali campi d'impiego sono:

- automotive, controllo industriale e meccanica: sono realizzati sensori di pressione, sensori inerziali (giroscopi, accelerometri) trovano applicazione nei sistemi di navigazione, nei dispositivi di sicurezza, nel controllo delle vibrazioni, ecc.;
- chimica e biotecnologie: sono impiegati per controlli di flusso, come micropompe da vuoto, per applicazioni sul DNA , ecc.;
- ottica: micro ottica IR , array di micro lenti, diffusori, ecc.;
- dispositivi RF (Radio Frequenza).

La natura low cost dei microsistemi è una delle loro caratteristiche più importanti, soprattutto considerando che le prestazioni raggiunte sono paragonabili e, spesso, migliori di quelle dei dispositivi tradizionali cui si contrappongono. I principali vantaggi offerti dai microsensori sono:

- costo molto inferiore rispetto alla strumentazione tradizionale;
- elevata sensibilità, grazie alla precisione sub-micrometrica dei processi di produzione;
- dimensioni ridotte (inferiori a $5 \times 5 \text{ mm}^2$), che agevolano la realizzazione di configurazioni multi sensore;
- elevata integrazione fra trasduttore ed elettronica (condizionamento del segnale e conversione A/D), che permette un rapporto segnale/rumore più elevato dei sensori tradizionali;
- bassi consumi, inferiori a 1 mA, principalmente dovuti alle due precedenti caratteristiche;
- robustezza e affidabilità tipiche dei circuiti integrati.

Il sistema di monitoraggio che sarà descritto in seguito sfrutta accelerometri MEMS triassiali, prodotti da ST -Microelectronics. Questo tipo di sensore si basa sulla misura del movimento di una massa inerziale sottoposta all'azione di forze esterne.

Tale massa costituisce una delle armature di un condensatore, realizzato tramite processi di microlavorazione, che ha l'altra armatura solidale con lo

chassis del sensore. L'azione di una forza esterna è in questo modo convertita in una variazione capacitiva, dovuta al cambiamento della posizione reciproca delle due armature. Date le dimensioni micrometriche, il condensatore è realizzato con una struttura a pettine (figura 46), che consente di massimizzare l'area delle armature, con variazioni capacitive misurate dell'ordine di 0,1 pF.

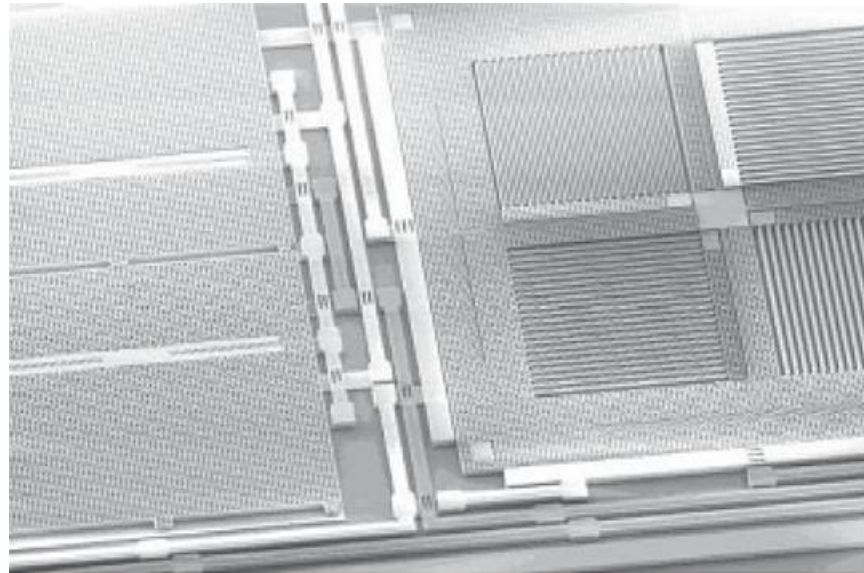


Figura 46. Esempio di struttura all'interno di un accelerometro MEMS.

(Fonte: <http://www.stmicroelectronics.com>, Vigna B., 12 breakout mems smart-sensors, 2009.)

Questi accelerometri possono essere utilizzati come inclinometri misurando le componenti della forza di gravità, che si scompone in maniera differente sui tre assi del sensore, al variare dell'inclinazione dell'accelerometro e sono in grado di misurare variazioni angolari dell'ordine di 2×10^{-4} rad.

L'elaborazione dei dati forniti dal sensore deve necessariamente tenere conto dell'effetto della temperatura sui valori di tensione in uscita sugli assi dei sensori. Infatti, cambiamenti di temperatura inducono variazioni nel livello di zero dei singoli assi (livello di tensione fornito quando l'asse è perpendicolare alla forza di gravità). Il costruttore fornisce informazioni statistiche sulla dipendenza dalla temperatura dei sensori, ma per ottenere risultati migliori occorre definire con precisione il coefficiente di deriva termica per ogni asse di ciascun sensore impiegato.

Oltre all'effetto della temperatura è necessario considerare il comportamento radiometrico delle uscite, che ha come conseguenza una loro dipendenza dalla tensione d'alimentazione. Nel caso ideale in cui quest'ultima sia perfettamente costante, con valore di 3,3 V, tensione d'alimentazione e uscite sono legati da una relazione lineare. Tuttavia, poichè nella realtà sono sempre presenti oscillazioni della tensione in ingresso, per ottenere il massimo della precisione da questo tipo di sensori, occorre introdurre una correzione del second'ordine, che è tanto più importante quanto più ci si discosta dalla tensione d'alimentazione ideale di 3,3 V.

Confronto diretto fra inclinometri servomeccanici e accelerometri MEMS

L'esigenza di confrontare direttamente il nostro sistema di misura con un prodotto commerciale di riferimento deriva dalla necessità di verificare sul campo l'attendibilità e i limiti dei rilevamenti effettuati tramite i nostri inclinometri. Le misure inclinometriche sono normalmente eseguite tramite servo-inclinometri monoassiali che sono installati in coppia su un carrello come quello schematizzato nella fig. 47a.

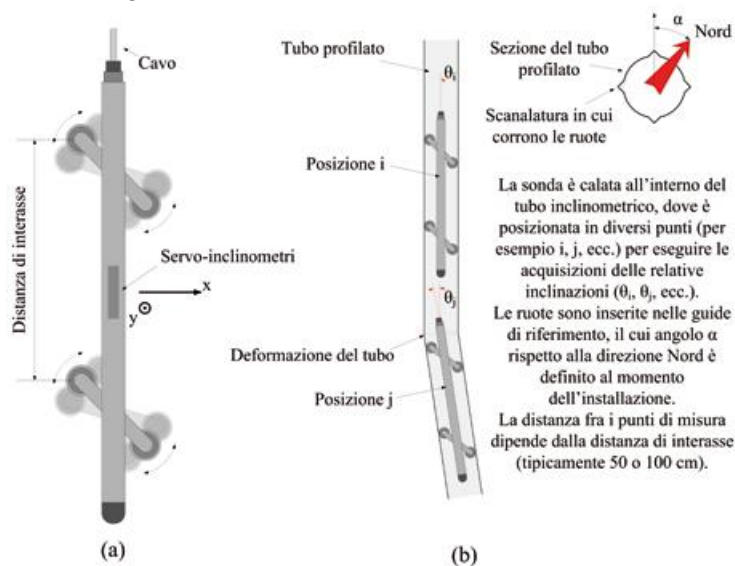


Figura 47. (a) disegno di una sonda inclinometrica utilizzata per monitorare l'evoluzione dei fronti franosi; (b) esempio del funzionamento di una sonda inclinometrica all'interno di una perforazione attrezzata con tubo profilato.

Come si vede dalla figura 47a, il carrello è costituito da due braccia mobili dotate di ruote alle estremità. Esse sono collegate al corpo centrale tramite un perno e, mantenute nella posizione di massima estensione da una molla, sono capaci di ruotare di un angolo limitato.

All'interno del corpo centrale sono collocati i servo-inclinometri, con gli assi sensibili orientati come nella figura 47a. Le perforazioni per il monitoraggio delle frane sono attrezzate con un tubo profilato, come quello illustrato nella figura 47b. Al momento dell'installazione, si misura l'angolo formato dalle scanalature del tubo con la direzione Nord (figura 47b), in modo da fornire un riferimento per le misure. Quando la sonda è inserita nel tubo inclinometrico, le sue ruote sono collocate all'interno delle guide in modo che gli inclinometri siano orientati lungo le direzioni indicate dalle scanalature del tubo: conoscendo l'angolo fra queste e le direzioni Nord-Sud e Est-Ovest, è possibile orientare il profilo inclinometrico, che si costruisce con le misure, rispetto ai punti cardinali.

Per ricostruire la deformazione del tubo si misura l'inclinazione della sonda inclinometrica sui due assi x e y indicati nella figura 47a. Rilevando tali valori a intervalli di profondità regolari definiti dalla distanza d'interasse (figura 47a), si può costruire la deformata, cioè una spezzata che approssima la forma del tubo. I segmenti di tale spezzata, hanno inclinazione fornita dai valori suddetti e lunghezza pari alla distanza fra i punti di misura. Minore è la distanza fra essi, maggiori sono l'accuratezza con cui si può ricostruire il profilo del tubo inclinometrico e il tempo necessario per l'intera operazione. In genere le acquisizioni sono ripetute a distanza di 0,5.1 m (pari alla distanza di interasse) e la profondità si misura tramite apposite tacche presenti sul cavo che regge la sonda.

Poiché gli assi di riferimento sono due (x e y), per ogni punto di misura si hanno due valori dell'inclinazione e, perciò, al termine delle acquisizioni si ricavano due serie di dati.

Il primo punto di misura è quello a maggiore profondità e le acquisizioni si svolgono come segue: inizialmente la sonda è calata sul fondo della perforazione, dove è lasciata per il tempo necessario a stabilizzarne la temperatura; quando ciò è avvenuto, si memorizza il valore d'inclinazione fornito dallo strumento e si colloca la sonda nel punto di misura.

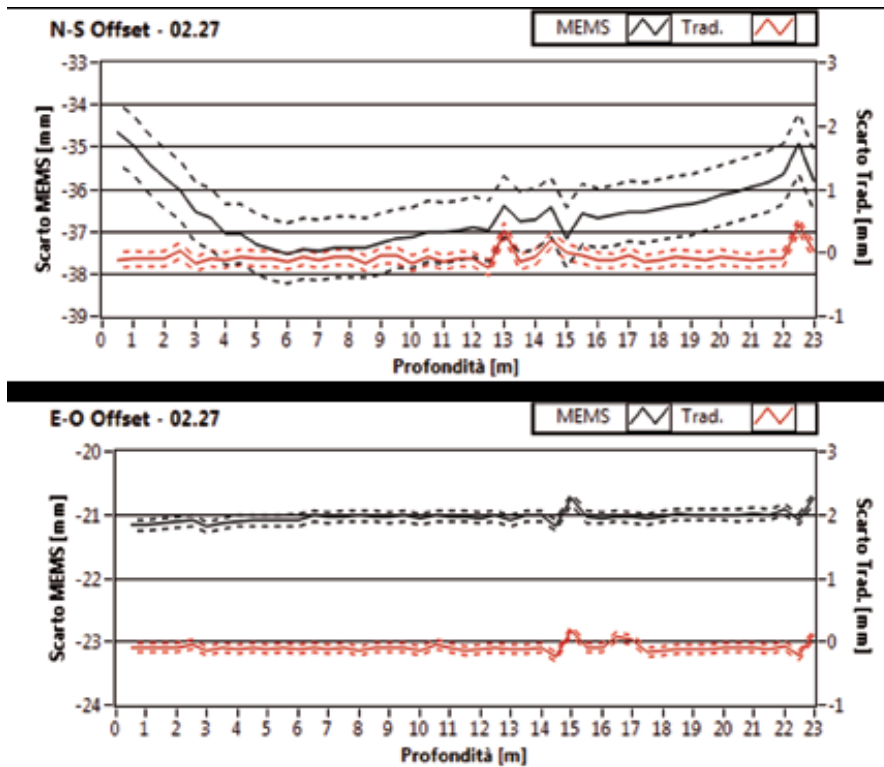


Figura 48. Grafici che rappresentano lo scarto sulle misure (in mm) lungo le due direzioni di riferimento, dopo la correzione della deriva termica e della tensione d'alimentazione, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello "tradizionale" usato come riferimento (linea rossa continua). A ognuna delle curve continue ne sono associate due tratteggiate: una è ottenuta sommando alla curva continua la deviazione standard calcolata sui suoi valori, l'altra si ricava invece sottraendo la deviazione standard.

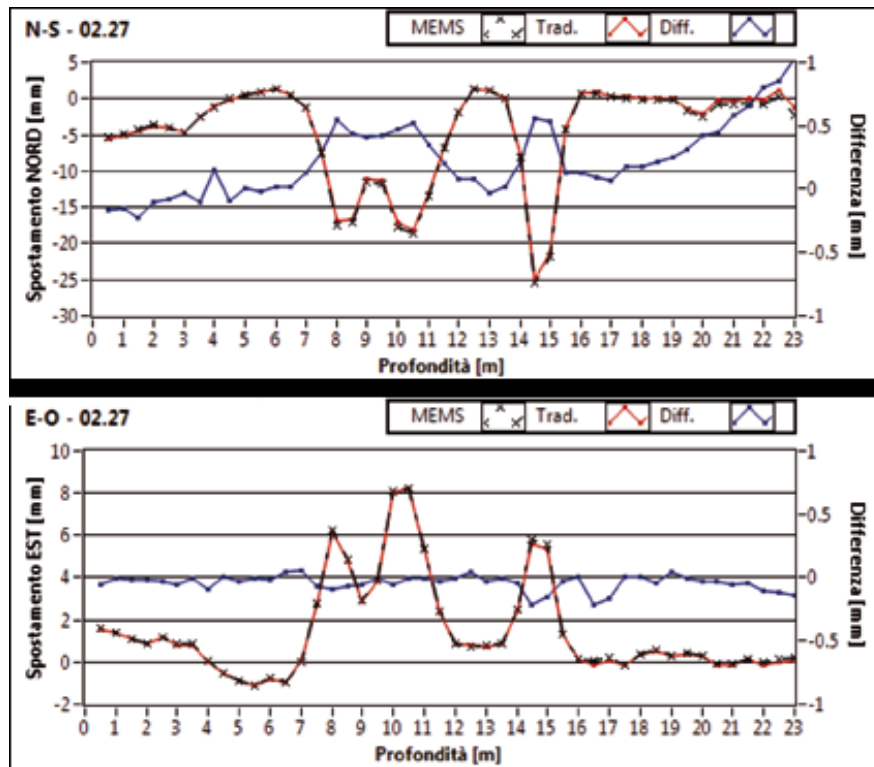


Figura 49. Grafici degli spostamenti differenziali (in mm) dopo le correzioni, lungo le due direzioni di riferimento, per i due inclinometri: quello basato su accelerometro MEMS (linea nera continua) e quello "tradizionale" nato come riferimento (linea rossa tratteggiata).

Poichè i valori sono molto simili, è stata aggiunta una curva (curva blu continua, con markers) che rappresenta la differenza fra le due curve precedenti e che fa riferimento alla scala sulla destra del grafico. successivo (a minore profondità del precedente); per ognuno di questi punti si deve attendere la stabilizzazione del valore di tensione fornito e successivamente si può procedere memorizzando il dato e passando alla posizione seguente.

Per eliminare eventuali errori sistematici della misura si esegue una seconda serie di acquisizioni che si svolge allo stesso modo della precedente, ma ruotando di 180° la sonda inclinometrica: quest'operazione coincide con l'inversione del verso degli assi x e y degli inclinometri rispetto alle guide della

perforazione. Come per la prima misura, al termine delle acquisizioni, si ottengono due serie di dati.

Calcolando per le due direzioni la semidifferenza fra le serie di dati raccolte durante le due misure, si ottiene il valore dell'inclinazione, in funzione della profondità, corretta dall'offset di misura, che può invece essere ricavato calcolando la semisomma delle serie di dati.

I test di confronto sono stati svolti in collaborazione con i geologi del Servizio Lavori Speciali Opere pubbliche della Provincia di Modena, che ci hanno messo a disposizione il sito di misura sulla frana della Biricuccola, nell'Appennino modenese, e la strumentazione da loro normalmente utilizzata per questi monitoraggi. Le campagne di misura sono state due: la prima il 27 febbraio 2009 e la seconda il 27 ottobre 2009. In entrambi i casi, si sono eseguiti i test installando il nostro inclinometro su uno strumento di riferimento: sonda inclinometrica commerciale prodotta da Sisgeo, tipo S060041 (con risoluzione di 0,01 mm per 500 mm, equivalente a $2 \cdot 10^{-5}$ rad), associata alla centralina ARCHIMEDE (n. matricola 20060398). Fissando il nostro sensore al carrello della sonda inclinometrica "tradizionale" abbiamo potuto eseguire le misure di inclinazione simultaneamente allo strumento di riferimento.

Il sondaggio oggetto del monitoraggio è profondo 23 m e, in entrambi i test, le misure sono state effettuate ogni 50 cm (per via del passo fra le ruote del carrello). Viene presentato un consuntivo dei risultati ottenuti con il nostro sistema, affiancati a quelli ricavati dall'elaborazione dei dati forniti dalla sonda di riferimento. Nei grafici di fig. 48 sono rappresentati i valori dell'offset, espresso in funzione della profondità per entrambe le direzioni di interesse, dopo aver applicato le correzioni della deriva termica e della tensione di alimentazione.

Nel confronto fra i due sensori si denota un ottimo accordo fra i dati, dato che la presenza dei picchi è dovuta alle caratteristiche geometriche del sistema di misura e dipende dalle deformazioni del tubo profilato. Quindi, lo stesso andamento delle curve dell'offset dei due sensori costituisce un primo risultato positivo del test di verifica per l'inclinometro MEMS.

L'ampiezza dei picchi nelle curve, rappresentativa dell'errore dovuto all'asimmetria del sistema di misura, è inferiore al millimetro. Ciò indica l'accordo fra i dati delle due sonde: difatti, il sensore MEMS si avvicina ai risultati dell'inclinometro servo-meccanico, anche per misure di spostamenti al limite della sua sensibilità.

I grafici nella figura 49 mostrano lo spostamento differenziale in funzione della profondità per le direzioni Nord-Sud ed Est- Ovest per le due sonde confrontate, dopo l'applicazione delle correzioni per le variazioni della tensione di alimentazione e della temperatura relative ai dati acquisiti.

Per meglio evidenziare la differenza dei valori delle due curve, che non appaiono in quanto sovrapposte, è stata messa in grafico la curva in blu per indicare la differenza, espressa in mm, fra le curve relative ai due inclinometri. Il valor medio e la deviazione standard, calcolati sulla differenza fra le curve corrette, sono:

- $D_{m,N-S} = 0,11$ mm, $f_{\Delta D,N-S} = 0,17$ mm per la direzione Nord-Sud;
- $D_{m,E-O} = 0,02$ mm, $f_{\Delta D,E-O} = 0,09$ mm per la direzione Est-Ovest.

Le correzioni non sono state introdotte per minimizzare la differenza fra le due curve, ma per ottenere un andamento costante da parte dell'offset, partendo dai valori ricavati sperimentalmente per le caratteristiche del sensore. Questa prova, infatti, non ha lo scopo di calibrare il nostro sistema in base ai risultati della sonda di riferimento, ma di confrontare le curve ricavate con l'inclinometro MEMS, dopo avere eseguito una taratura in laboratorio e basandosi su dati svincolati dall'altra sonda, come per esempio l'andamento dell'offset.

Terminiamo la descrizione del confronto fra servo inclinometri e accelerometri MEMS con la figura 50, dove sono riportati tre grafici che mettono a confronto i risultati delle sonde sui due test:

- quello a sinistra rappresenta il modulo dello spostamento integrale (lo spostamento integrale su una direzione si ottiene integrando i valori degli spostamenti differenziali su quella direzione), in funzione della profondità, per entrambe le campagne di misura;
- quello in alto a destra rappresenta lo spostamento integrale, espresso in coordinate polari, per le due sonde, nel primo test;
- quello in basso a destra è analogo al grafico precedente, ma per l'ultima campagna di misura.

Si può notare un ottimo accordo fra i dati ottenuti con il nostro inclinometro MEMS per la rappresentazione della deformazione del tubo inclinometrico, indicativa del movimento del fronte della frana.

Il sistema di monitoraggio fisso

Modulo - Integrale - 02.27 e 10.27

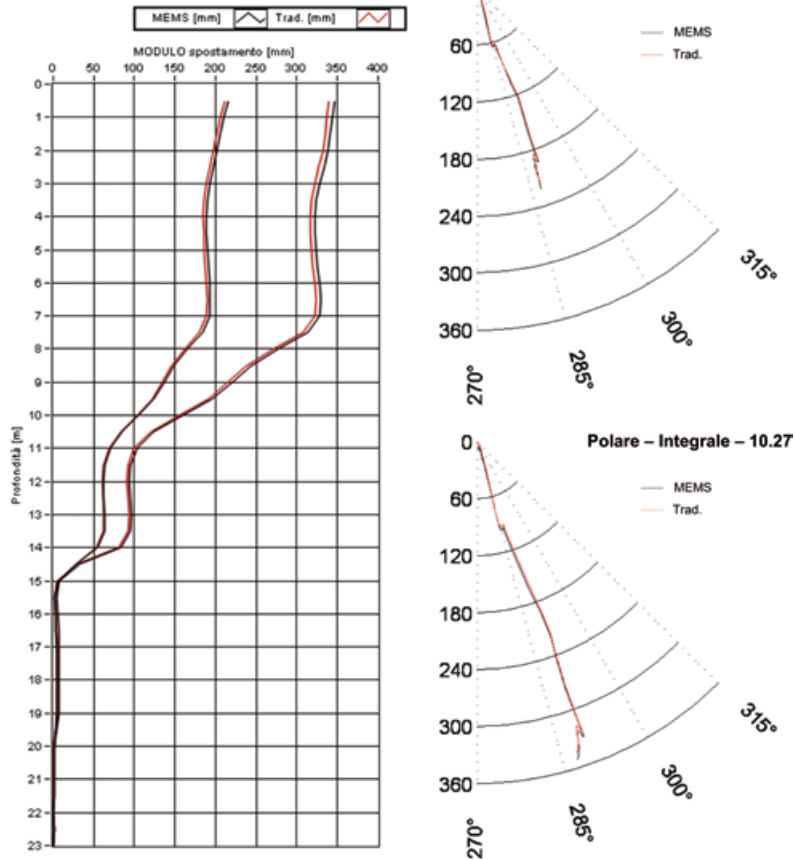


Figura 50. Il grafico a sinistra rappresenta il modulo dello spostamento integrale in funzione della profondità, per entrambe le campagne di misura. Le curve in nero si riferiscono all'inclinometro MEMS, quelle in rosso a quello di riferimento. I due grafici a destra rappresentano lo spostamento integrale in coordinate polari. Quello in alto riporta i risultati della prima campagna di misura e quello in basso i risultati dell'ultima. Anche in questi grafici sono messi a confronto, l'inclinometro MEMS (nero) e quello Sisgeo (rosso).

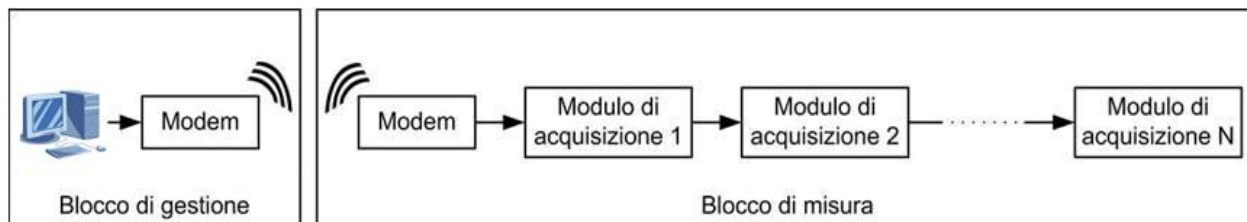


Figura 51. Schema a blocchi del sistema di monitoraggio, rappresentato in base alle sue caratteristiche di modularità.

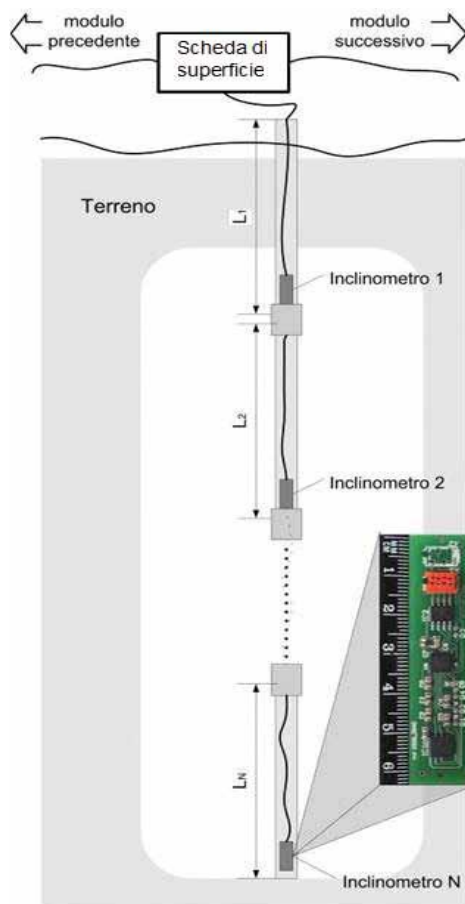


Figura 52. Schema illustrativo di un blocco di misura inserito nel terreno. Sono illustrati: la scheda di superficie; i segmenti dell'ago; gli inclinometri, con la foto di uno di essi affiancato ad una scala centimetrata.

Questo sistema è stato ideato con l'intento di proporre un approccio innovativo al monitoraggio dei fenomeni franosi. Esso possiede le principali caratteristiche dei sistemi misura inclinometrici fissi, basati su sensori tradizionali, unitamente ad un abbattimento dei costi realizzativi e della gestione.

L'utilizzo di accelerometri MEMS, in luogo dei tradizionali inclinometri, rappresenta l'innovazione tecnologica che ha reso possibile la realizzazione del sistema di monitoraggio descritto in quest'articolo.

L'apparato è adattabile a qualsiasi situazione di misura e quindi alla morfologia del fronte franoso da monitorare.

Nella fig. 51 è possibile vedere una schematizzazione che evidenzia le parti principali del sistema.

Il blocco di gestione, in grado di controllare più blocchi di misura (più frane), e costituito da un computer che, tramite un apposito software, esegue le chiamate via modem, archivia i dati e li analizza.

Il blocco di misura comprende un modem e uno o più moduli di acquisizione. Il numero e la configurazione di questi ultimi, dipende dal numero di punti in cui si desidera compiere le misure, dalla profondità cui occorre arrivare e dalla risoluzione che si vuole ottenere nel definire il profilo delle superfici di scorrimento.

Nella figura 52 è illustrato, in maniera schematica, un modulo di acquisizione, che comprende:

- Una scheda di superficie con il compito di fornire alimentazione e gestire gli inclinometri connessi. Queste schede possono essere collegate in serie fra loro, nel caso in cui vi siano più perforazioni e quindi più punti in cui eseguire il monitoraggio.
- Un "ago", composto di N tubi d'acciaio inox di lunghezza L_i , collegati fra loro da un giunto cardanico. Tali tubi sono cavi e all'interno di ognuno si trova un inclinometro, rigidamente vincolato al tubo, che consente di misurarne l'inclinazione. I sensori sono connessi in parallelo, tramite un cavo flat a 4 poli che va dalla scheda di superficie fino all'ultimo inclinometro.

In sede di progettazione del sistema, oltre a poter decidere il numero di moduli di acquisizione, è possibile variare, secondo le circostanze, il numero N di sensori e la lunghezza L_i di ciascun tubo. In questo modo si agisce sulla risoluzione della misura e sulla possibilità di raggiungere maggiori profondità.

Il prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova e costituito da 5 blocchi di misura (collocati nei punti indicati nella figura 53), ciascuno con 6 segmenti di 2 m, ognuno munito di un inclinometro, per una profondità totale di 12 m.

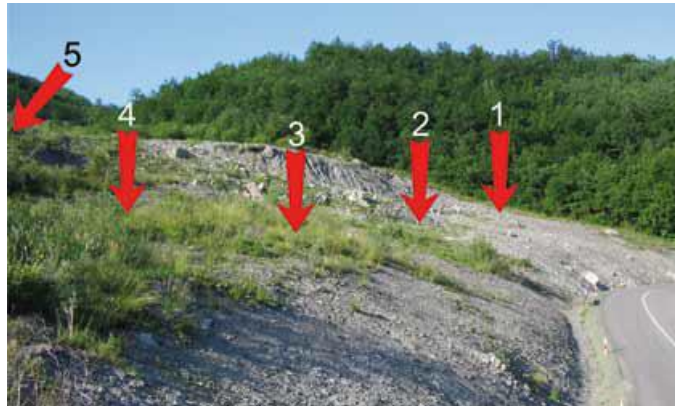


Figura 53. Immagine del fronte della frana di Lezza Nuova (Appennino modenese) su cui è installato il prototipo del sistema di monitoraggio "fisso". Le frecce indicano i punti in cui sono state eseguite le perforazioni e in cui sono collocati i blocchi di misura.

Nella figura 54 è mostrato un ago, durante l'inserimento nel terreno. Si vedono i segmenti, collegati fra loro dai giunti cardanici e il tubo in PVC (arancione) in cui è inserito l'ago. Nella figura 55 è possibile osservare come appare in superficie il blocco di misura collocato nella posizione 1, vicino al quale si vede anche l'alloggiamento della batteria che alimenta il sistema. La scheda di superficie è collocata all'interno del contenitore indicato, che la protegge dagli eventi atmosferici.

La gestione dell'apparato è affidata a un software realizzato in ambiente di sviluppo LabVIEW. Questo, come già anticipato, permette all'utente di pianificare le interrogazioni automatiche. A occuparsi di queste acquisizioni è un servizio di sistema, installato nel PC su cui risiede il software, che si attiva all'avvio del computer. Gli orari delle acquisizioni possono essere liberamente scelti nell'arco delle 24 ore di una giornata.

Oltre a gestire le interrogazioni, il software consente di analizzare i dati raccolti, attraverso alcuni strumenti appositamente realizzati. In particolare, per ciascun modulo di acquisizione è possibile visualizzare due grafici, tipicamente utilizzati in questo tipo di studi: il diagramma polare, che rappresenta

vettorialmente gli spostamenti dei tubi che compongono l'ago; la risultante dello spostamento, che ne indica il modulo.

La costruzione di questi grafici avviene trigonometricamente, partendo dalle misure d'inclinazione dei singoli tubi e dalla loro lunghezza. Inoltre, ogni rappresentazione di questo tipo può essere rapportata a un preciso intervallo temporale definito dall'utente, al fine di poter valutare le variazioni del sistema sia su lunghi che brevi periodi. Va ricordato che con questo sistema è possibile compiere un numero elevato di acquisizioni, creando in questo modo un database molto ricco, dal quale ricavare curve di tendenza dei vari parametri d'interesse, che possono costituire un valido strumento di studio e un possibile sistema di allarme, potendo avere una raccolta dati con cadenza dell'ordine del minuto. Dal momento dell'installazione, avvenuta a fine gennaio del 2007, il sistema ha subito modifiche mirate a correggere alcuni problemi riguardanti principalmente la parte meccanica del progetto.

I risultati raccolti nell'ultimo periodo di funzionamento hanno evidenziato un accordo fra i dati e la situazione riscontrata sulla frana.



Figura 54. Immagine che mostra come appare un blocco di misura dopo l'installazione. È possibile vedere: l'alloggiamento della batteria; il contenitore che racchiude la scheda di superficie; il tubo in PVC (arancione) dentro cui è inserito l'ago, mantenuto in posizione da un distanziale.



Figura 55. Immagine che mostra un ago durante l'inserimento nel terreno.

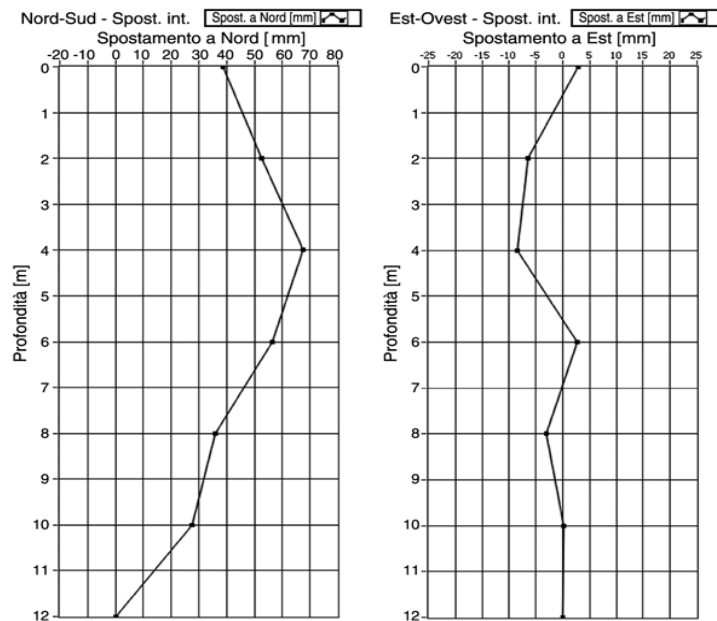


Figura 56. Grafici dello spostamento integrale in funzione della profondità, per il punto di misura 1 (vedi figura). Uno riguarda la direzione Nord-Sud, l'altro la direzione Est-Ovest. Il periodo di riferimento va dal 24 settembre 2009 al 7 febbraio 2010.

Conclusione

Il lavoro di ricerca svolto per lo sviluppo di questo sistema di misura ha permesso di raggiungere risultati positivi per l'impiego degli accelerometri MEMS nelle misure inclinometriche di monitoraggio delle frane.

La validità di un sistema di questo tipo è subordinata al superamento di diversi fattori di criticità, fra cui: la risoluzione dei sensori, la ripetibilità delle misure, la longevità della strumentazione e il suo costo. È importante considerare che i sensori MEMS nascono per rispondere a esigenze ben diverse da quelle per cui sono stati utilizzati in questo progetto. I produttori, infatti, popolano i loro cataloghi basandosi sui settori del mercato in cui è possibile vendere grandi quantità di componenti (anche decine di milioni). Questo discorso vale in particolare per gli accelerometri che, assieme ai giroscopi MEMS, sono largamente diffusi nei sistemi di posizionamento, ormai parti integranti di molti oggetti che usiamo nella vita quotidiana (cellulari, GPS, playstation, hard disk, ecc.).

Una prova di quanto detto viene dal fatto che, per quanto riguarda gli accelerometri, non c'è un reale interesse dei progettisti delle case produttrici ad aumentarne la risoluzione. Al momento della redazione di questo articolo, i sensori utilizzati in questo sistema di misura (LIS3L02AL di ST-Microelectronics) sono stati sostituiti sul mercato dalla generazione successiva (LIS344ALH). Le principali differenze, fra questo nuovo prodotto e quello da noi utilizzato, risiedono nelle dimensioni e nel consumo, mentre la risoluzione è rimasta la stessa, come anche la dipendenza dalla temperatura del livello di zero e della sensibilità.

Ovviamente queste migliorie sono vantaggiose, poichè la riduzione dei consumi permette di aprire la strada a nuove soluzioni e ambiti di utilizzo.

Le prove eseguite per confrontare le sonde inclinometriche basate su MEMS e uno strumento commerciale equipaggiato con inclinometri servo-meccanici, hanno confermato che gli accelerometri da noi utilizzati sono idonei per questo tipo di misure. Nonostante essi siano dotati di una risoluzione di $2 \cdot 10^{-4}$ rad, mentre gli inclinometri servo-meccanici raggiungono $2 \cdot 10^{-5}$ rad, tale divario è attenuato dalle caratteristiche complessive del sistema di misura e del sito di monitoraggio.

Gli errori che intervengono, a causa dei giochi presenti nelle parti meccaniche che costituiscono il carrello su cui è installata la sonda, contribuiscono ad assottigliare il divario prestazionale fra i sensori. Inoltre, le guide dei tubi inclinometrici, col passare del tempo diventano irregolari, poiché subiscono forti

pressioni all'interno della frana (che ne modificano la forma) e sono soggette a incrostazioni, talvolta in grado di rendere inutilizzabile un sito di misura. Queste ipotesi sono confermate dai risultati che abbiamo ottenuto con i confronti, e quindi riteniamo che l'inclinometro MEMS, se opportunamente calibrato, possa essere utilizzato per queste misure, limitando al 2.3% l'errore commesso rispetto a una sonda di maggiore sensibilità. Questo primo risultato costituisce la premessa necessaria per l'affermazione del sistema di monitoraggio fisso. I risultati ottenuti con il prototipo installato sulla frana di Lezza Nuova, permettono di constatare che gli spostamenti rilevati sono in accordo con la situazione riscontrata sulla frana.

Uno dei vantaggi più interessanti offerti da questo sistema di misura è la notevole quantità di dati che possono essere raccolti. Da novembre 2009, infatti, le acquisizioni sono eseguite con frequenza oraria, in maniera completamente automatica.

Concludendo, possiamo riassumere come segue le principali caratteristiche del sistema di monitoraggio descritto:

- Completo automatismo, che permette di risparmiare risorse umane e quindi economiche, consentendo di avere un maggiore numero di dati, non essendo la loro raccolta vincolata a campagne di misura (come nel caso delle sonde inclinometriche manuali), fra le quali di solito intercorrono mesi.
- Un aumento della durata operativa del sito di misura. Le tecniche tradizionali sfruttano un carrello equipaggiato con un servo-inclinometro. Esso è calato all'interno di un tubo munito di guide, che penetra in profondità nel terreno fino a raggiungere lo strato fisso sotto la frana. I movimenti degli strati franosi deformano il tubo fino a renderlo inutilizzabile (già per slittamenti dell'ordine di 10 cm/m) per cui, per proseguire il monitoraggio, è necessaria una nuova perforazione del terreno. Il sistema da noi proposto invece, richiede una perforazione solo al momento dell'installazione, potendo seguire movimenti è possibile una considerevole diminuzione delle spese, grazie al basso costo della strumentazione, ma soprattutto imputabile a spese di gestione molto contenute, con massimizzazione dell'informazione e la capacità di giudicare iniziative da intraprendere ai fini della sicurezza dell'ambiente circostante la frana.

> 2.3 Cenni tecnici all'interferometria

La presente nota riassume brevemente i principi del metodo PSInSARtm, i limiti dello stesso e la tecnica delle “aree anomale” adottate per la presentazione dei dati.

Tecnica PS

L'approccio PS si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers* o PS), che mostra caratteristiche ideali per osservazioni interferometriche. Essi preservano infatti l'informazione di fase nel tempo e al variare della geometria di acquisizione. I PS sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, in generale elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione; questo non accade invece alla vegetazione, il cui aspetto muta di continuo.

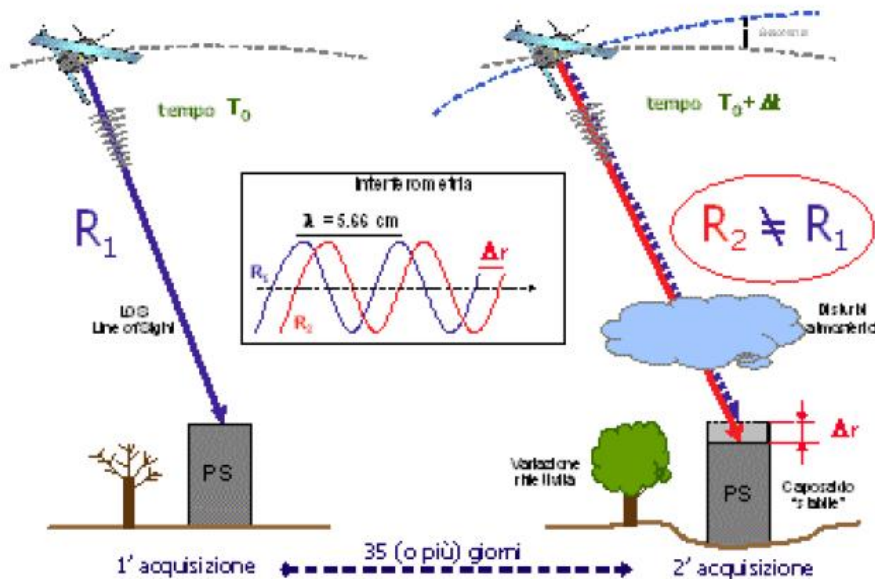


Figura 57. Rappresentazione schematica delle basi teoriche delle tecniche interferometrica classica e PS e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR (decorrelazione temporale, decorrelazione geometrica e disturbi atmosferici)- fonte Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l..

L'elaborazione PS prende origine da uno studio statistico delle immagini radar e segna un passaggio da un'analisi per coppie di immagini, tipica dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), ad un'analisi multi-immagine dell'intero dataset disponibile sull'area di interesse - per selezionare l'insieme dei PS.

Si può immaginare la griglia dei PS come una sorta di rete di stazioni GPS (Global Positioning System) "naturali" per il monitoraggio di vaste aree di interesse, con una frequenza di aggiornamento del dato mensile e una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane fino a 100-400 PS/km²).

Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale dei PS sia sufficientemente elevata (maggiore di ~5 PS/km²), vincolo sempre verificato in aree urbane, e utilizzare per l'analisi dataset di almeno 25-30 immagini. Per ogni singolo PS si ricavano la posizione (le sue coordinate geografiche: latitudine, longitudine) il trend medio di deformazione, con un'accuratezza compresa tra 0.1 e 2 mm/anno, e l'intera serie temporale di deformazione (in questo caso la precisione arriva a 1 mm su ogni singola misura per i PS migliori).

La precisione è funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase del PS sia immune dai fenomeni di disturbo. Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra, di coordinate note e supposti fermi (indicati come tali ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica).

I punti di forza della tecnica PS consistono principalmente nella possibilità di valutare e rimuovere dal segnale i contributi di disturbo atmosferico e di ottenere stime puntuali, e nella maggiore accuratezza delle misure (sino al millimetro su singola misura).

Riassumendo:

- archivio storico (satelliti ERS 1 e 2) dal 1992 al 2001, da cui la possibilità di indagini su fenomeni passati;
- misure differenziali, con accuratezza elevata:
- sul trend di deformazione velocità media PS: fino a 0,1 [mm/a]
- sulla singola misura spostamento verticale PS: fino a 1 mm
- elevata densità spaziale di capisaldi radar (in area urbana fino a ~400 PS/km²), già presenti sul territorio;

- facile integrabilità in ambiente GIS;
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento;
- accuratezza delle misure sull'asse verticale superiore rispetto alla tecnica GPS.

Limiti del metodo PS

Nell'effettuare interpretazioni dei dati PS occorre tenere ben presente una serie di elementi e di limitazioni di seguito brevemente riassunte. Chi utilizza i dati deve sviluppare una sensibilità al dato stesso analoga a quella che occorre sviluppare, ad esempio, per l'interpretazione dei dati inclinometrici. Le presenti considerazioni valgono per l'interpretazione dei dati PS in generale ma si riferiscono, in particolare, alle valutazioni relative ai fenomeni franosi, per la definizione e caratterizzazione dei quali, occorre tener ben presente, non è possibile utilizzare unicamente il dato PS. Il dato PS, in altri termini, è uno degli elementi che, unitamente agli elementi classici (rilievi di terreno, fotointerpretazione, monitoraggio, dati storici ecc.) concorrono alla caratterizzazione dei fenomeni franosi.

Copertura del territorio

Non tutto il territorio si presta all'applicazione della tecnica PSInSAR. Nell'esperienza piemontese, a cui fanno riferimento i dati utilizzati per l'individuazione delle aree anomale, circa un terzo del territorio è totalmente privo di PS. L'assenza di informazione (ovvero l'assenza di riflettori PS) è dovuta a:

- aspetti geometrici legati alle relazioni tra le orbite satellitari e l'orientazione dei versanti: i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore non sono analizzabili; vi sono sensibili distorsioni prospettiche dei pendii ad elevata energia di rilievo; alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri;
- assenza di riflettori in aree vegetate ed in quelle innevate, che non riflettono i segnali radar;
- presenza di PS temporanei (strutture in costruzione o in ristrutturazione durante il periodo di monitoraggio satellitare);
- assenza di fabbricati od infrastrutture, che costituiscono la massa dei riflettori PS.

Le misure di velocità sono misure relative

Tutte le misure di velocità attribuite ai PS sono misure relative in quanto derivanti dal confronto tra il singolo PS ed un PS di riferimento considerato come stabile. Vi è in media un PS di riferimento ogni 2000 km². Benché si sia posta estrema cura nella localizzazione del PS di riferimento è possibile che lo stesso non si perfettamente stabile. Inoltre la deviazione standard dell'errore della misura di velocità aumenta con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento.

Campi di velocità rilevabili

La tecnica PS è in grado di individuare deformazioni all'interno di un ben preciso campo di velocità (sempre e comunque velocità della componente lungo la LOS, vedi sopra).
o Limite superiore del campo di velocità: bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori ad un quarto di lunghezza d'onda (1,4 cm in banda C, satelliti ERS) tra due acquisizioni successive (35 giorni) non vengono individuati come PS; questo significa che non vengono rilevati spostamenti, lungo la LOS, superiori a 5-6 cm/anno.

o Limite inferiore del campo di velocità: le caratteristiche del metodo portano a ritenere che, nel campo delle interpretazioni relative ai fenomeni franosi, possano essere ritenuti stabili punti con velocità lungo la LOS pari a ± 2 mm/anno. Tale valore scende a ± 1.5 mm/a nelle aree di pianura.

Aspetti geometrici

Il metodo è in grado di rilevare spostamento lungo un solo asse, quello che congiunge il bersaglio a terra con il satellite, asse detto LOS (line of sight). In altri termini il metodo rileva se il bersaglio a terra si è avvicinato od allontanato dal satellite. Tale asse presenta orientazione spaziale diversa per le orbite ascendenti e discendenti. Nei satelliti ERS, per le orbite discendenti l'asse immerge con azimut di circa 277° Nord ed inclinazione, rispetto alla normale, di circa 23°.

Tale configurazione geometrica presenta numerose implicazioni che debbono assolutamente ed attentamente considerate in fase di interpretazione dei dati:

- Viene rilevata solo una componente dello spostamento totale, quella lungo l'asse di cui sopra; a seconda dell'orientazione dei versanti e dell'asse degli spostamento potranno essere rilevati valori prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi.

- Date le orientazioni sopra citate saranno meglio rilevati spostamenti lungo assi est-ovest, in quanto tali spostamenti comportano più decisi avvicinamenti od allontanamenti dal satellite.

I movimenti lungo gli assi nord-sud non comportano sensibili allontanamenti od avvicinamenti al satellite e non vengono di norma rilevati o, meglio, vengono rilevate solo componenti minime. La presenza, quindi, di PS lungo versanti che potrebbero sviluppare movimenti lungo assi nord-sud deve essere valutata con particolare attenzione. Non potrò, ad esempio, discriminare se un valore di spostamento inferiore ai 2mm/a, (che, come già citato, viene assunto come soglia di velocità minima per discriminare i movimenti) rappresenti un PS immobile o se rappresenti invece una minima componente di uno spostamento più rilevante.

- Se gli spostamenti avvengono lungo assi est-ovest, gli stessi riflettori potranno indicare valori di spostamento opposti nelle elaborazioni relative rispettivamente alle orbite ascendenti e discendenti. Questo in quanto il riflettore nell'un caso si avvicina e nell'altro si allontana dal satellite. L'effetto è particolarmente evidente per movimenti lungo piani poco inclinati come avviene, ad esempio, nei settori sommitali delle grandi deformazioni di versante.
- Un'analisi superficiale della distribuzione del seminato PS potrebbe talora portare a definire settori a comportamento cinematico diverso ove, in realtà, tali settori differiscono unicamente per l'orientazione del versante rispetto alle orbite satellitari, elemento che si riflette in componenti diverse degli spostamenti reali lungo la LOS.

Interpretazione delle deformazioni rilevate su edifici

La massa dei PS rilevati corrisponde a fabbricati od infrastrutture. Nell'effettuare interpretazioni per quanto attiene ai fenomeni franosi occorre tener presente che non è assolutamente possibile attribuire acriticamente al fenomeno franoso le velocità di spostamento rilevate sugli edifici. Questo in quanto tra le velocità rilevate sugli edifici e quelle "reali" del movimento franoso si interpongono numerosi elementi che possono amplificare o ridurre i valori:

- richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi;
- fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa;
- caratteristiche strutturali dell'edificio e soprattutto, caratteristiche delle sue fondazioni;

- fattori geotecnici legati al comportamento dei terreni di fondazione.

Movimenti non lineari

L'analisi PS standard suppone l'esistenza di movimenti che seguono un andamento lineare. In presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. In presenza di movimenti non lineari occorre modificare l'algoritmo utilizzato, per esempio attraverso l'applicazione di modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza. L'adozione di modelli diversi dal lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi di dettaglio, limitati ad un'area circoscritta.

Pratiche da evitare

In conclusione si elencano alcune pratiche da assolutamente evitare nell'analisi dei dati PS:

- indagini PS commissionate su aree inadatte a tale tipo di analisi (versanti ad orientazione sfavorevole, aree vegetate ecc.);
- acritica accettazione del dato PS come dato "risolutore" ;
- acritica trasposizione di un seminato PS in una zonizzazione del territorio a fini pianificatori;
- interpretazione generica degli spostamenti rilevati come dovuti a sole componenti subverticali;
- assenza di PS interpretata come assenza di movimenti;
- acritica interpretazione di spostamenti rilevati su manufatti come spostamenti dovuti ai corpi di frana.

Le Aree Anomale

Il percorso di analisi, il cui obiettivo consiste nell'interpretazione geologica dei campi di moto descritti dai PS prevede come passo iniziale la formazione di aggregati o cluster di PS che per caratteristiche fisiche e spaziali (velocità superiori od inferiori alla classe di velocità considerata stabile, e distanza interpunti e numerosità) possono rappresentare indizi di geo-processi. Tali raggruppamenti sono stati definiti come Aree Anomale. le aree anomale vengono relazionate a processi e forme geologiche al fine di individuare/ipotizzare le cause delle deformazioni misurate. Si tratta di un'interpretazione geologica

preliminare a scala regionale che andrà successivamente verificata con l'analisi di dettaglio. Questo livello si presta a studi di carattere regionale.

L'interpretazione delle Aree Anomale dipende dalla tipologia di fenomeno, che a sua volta è funzione della velocità e del tipo di movimento (lineare e non).

Le cause dei movimenti sono state suddivise in:

1. attività neotettonica e sismica
2. fenomeno franoso
3. subsidenza naturale per consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati o per la presenza di terreni "problematici"
4. subsidenza naturale connessa a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche o evaporitiche
5. subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo
6. subsidenza indotta da attività sotterranea (scavi per gallerie, attività mineraria)
7. subsidenza indotta da applicazioni di carichi (costruzioni, grandi opere) su superfici estese
8. comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione e problemi strutturali
9. detrito di versante

Occorre tenere presente che i fenomeni, che causano i movimenti si possono anche sovrapporre a scale diverse, per cui l'interpretazione dei dati interferometrici può risultare 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.

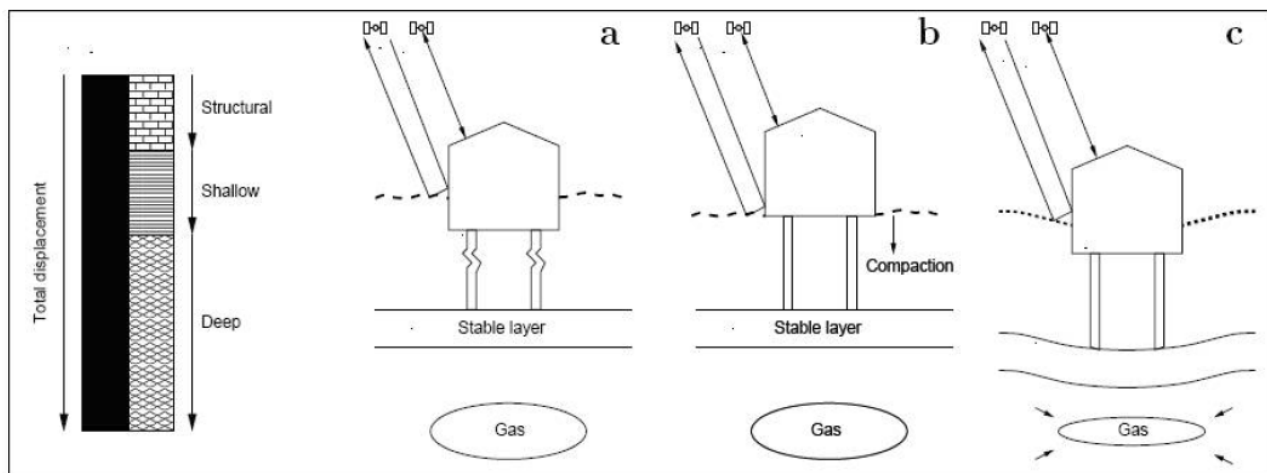


Figura 58. Esempio della scomposizione dello spostamento misurato dovuto a differenti cause: a) strutturali (fondazioni), b) consolidamento del terreno, c) estrazioni di gas.

La fase di interpretazione dei dati PSInSARtm può essere inoltre condizionata da una serie di fattori:

- Localizzazione e densità dei Permanent Scatterers

La quantità e la localizzazione dei permanent scatterers non possono essere previste prima della fase di processamento; un buon diffusore permanente dipende dalle proprietà dielettriche del materiale che costituisce il bersaglio e dalla geometria delle superfici in relazione al satellite. In un'area urbana ci si può aspettare alcuni centinaia di punti per chilometro quadrato, tuttavia questa densità diminuisce considerevolmente in ambienti rurali e soprattutto in aree a bosco.

- Copertura del territorio

Non tutto il territorio si presta all'applicazione della tecnica PSInSARtm in relazione a:

- Deformazioni prospettiche legate alla geometria di acquisizione del satellite: i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore non sono analizzabili; vi sono sensibili distorsioni prospettiche dei pendii ad elevata energia di rilievo; alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri;
- Aree vegetate;
- PS temporanei (strutture in costruzione o in ristrutturazione durante il periodo di monitoraggio satellitare);

- Moti veloci;
- Moti non lineari.
- **Movimenti relativi**
I valori dei tassi di deformazioni sono relativi ad un punto di riferimento scelto arbitrariamente e assunto come stabile.
- **Riflessioni multiple**
Una componente del movimento dei PS può essere costituita dalle riflessioni dagli edifici o da riflessioni multiple (e.g. dal satellite alla pavimentazione, all'edificio, a un altro edificio e quindi di nuovo al satellite). Questi fenomeni dovrebbero essere presi in considerazione, specialmente quando si studiano punti singoli o spuri.
- **Distanza dal punto di riferimento**
La deviazione standard dell'errore della misura della velocità aumenta con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento. Il punto di riferimento può anche essere distante dall'area di studio.
- **Velocità lungo la LOS**
La velocità data è misurata lungo la linea di vista del satellite (LOS), che è in media inclinata di 23° rispetto alla verticale. Se il movimento reale non avviene lungo la LOS la velocità misurata dal PS è sottostimata rispetto a quella reale, specialmente nel caso in cui la componente orizzontale del movimento è importante.
- **Spostamenti con velocità elevate**
Bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori ad un quarto di lunghezza d'onda (1,4 cm in banda C) tra due acquisizioni successive non vengono individuati come PS.
- **Movimenti non lineari**
L'analisi standard suppone l'esistenza di movimenti lineari, in presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. Quando si ipotizza la presenza di movimenti non lineari occorre modificare l'algoritmo utilizzato, per esempio attraverso l'applicazione di modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza. L'adozione di modelli diversi dal lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi di dettaglio, limitati ad un'area circoscritta.

- Differente filosofia di misura rispetto al monitoraggio tradizionale

I punti di monitoraggio convenzionali *in situ* sono posizionati strategicamente sulla base di alcuni parametri quali il facile accesso del sito, la ripetibilità della misura, ecc.; nella tecnica PSInSARtm la localizzazione dei PS dipende dalla disponibilità di immagini SAR (*temporal sampling*) e dalla presenza di bersagli radar (*spatial sampling*).

3. CASI NOTEVOLI DI MONITORAGGIO FRANE

> 3.1 ARPA Piemonte

3.1.1 Progetto INTERREG ALPS GPS QUAKENET

Arpa Piemonte ha partecipato, unitamente a 7 partner italiani e 5 partner europei, al Progetto Interreg Alps GPS Quakenet, avente come obiettivo la creazione di una rete geodetica transnazionale in ambito alpino, costituita da stazioni di misura GPS con precisione millimetrica. La rete di ricevitori GPS fornirà un sostegno all'utilizzo di tecniche spaziali che costituiranno la base sperimentale della comprensione scientifica dei rischi naturali in genere e, in particolare, dei terremoti.[9]

Il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche ha curato la realizzazione, e si sta occupando della gestione, delle cinque stazioni previste nel territorio piemontese. I siti prescelti per l'installazione sono stati individuati sulla base dei seguenti requisiti:

- geologico-tecnico (es. presenza di un substrato roccioso sul quale fondare il supporto del ricevitore, aree esterne a settori in frana);
- contesto tettonico regionale (correlazioni a grandi strutture geologiche per l'interpretazione delle tendenze evolutive dei diversi domini crostali);
- tecnico – strumentali (es. assenza di ostruzioni sopra i 20° di elevazione, assenza di disturbi dovuti a linee elettriche e reti di telecomunicazione).

Si è inoltre tenuto conto della presenza nelle vicinanze di una stazione meteorologica di Arpa Piemonte, utile per poter effettuare correlazioni tra dati satellitari e meteorologici, e della presenza di una linea telefonica o di buona copertura GSM per la trasmissione dei dati acquisiti.

Infine per l'installazione si sono privilegiate le aree di proprietà pubblica poco esposte ad atti di vandalismo. Per ridurre al minimo l'impatto ambientale tutti i manufatti sono stati rivestiti utilizzando pietra locale.

I siti individuati sono i seguenti:

- Alpe Devero – Comune di Baceno (VB)
- M.te Carza – Comune di Trarego/Viggiona (VB)
- Lago Agnel – Comune di Ceresole Reale (TO)
- Osservatorio Astronomico di Torino – Comune di Pino T.se (TO)
- Bric del Paluco – Comune di Paroldo (CN)

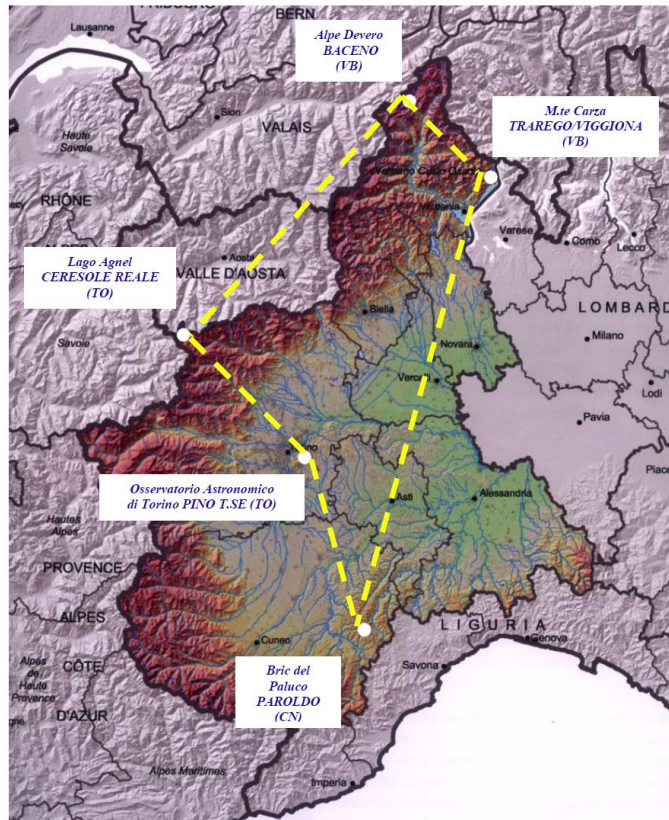


Figura 59. La rete di stazioni permanenti GPS di Arpa Piemonte

ALPE DEVERO – Comune di Baceno (VB)

Inquadramento geografico

La stazione si trova in alta Valle Devero, nelle Alpi Lepontine, all'interno del Parco Naturale Veglia e Devero, ad una quota di circa 1650 m s.l.m.m. È raggiungibile in auto da Torino in circa tre ore.

Cenni di geologia

In corrispondenza della stazione GPS affiorano calcescisti di età mesozoica (era geologica che va da 250 a 66 milioni di anni fa).

Siamo in un settore delle Alpi occidentali in cui affiorano rocce appartenenti alle più profonde unità visibili nell'edificio alpino; ci troviamo nelle cosiddette falde Pennidiche inferiori, nella zona di intersezione di lineamenti tettonici regionali, quali la linea tettonica del Sempione e della Centovalli, responsabili della esumazione finale delle unità Alpine nord-occidentali.

L'area è stata fortemente modellata durante l'ultima glaciazione; in corrispondenza dell'attuale piana di Devero, l'azione erosiva del ghiacciaio (esarazione) creò una profonda depressione che, successivamente al ritiro della massa glaciale, venne colmata dalle acque dando origine ad un lago. Il materiale trasportato dai torrenti discendenti dai monti circostanti ha prodotto nel tempo il graduale interrimento dello specchio d'acqua.

Testimonianze di antichi ghiacciai (valli sospese, depositi morenici, rocce montonate e massi erratici) sono facilmente visibili in tutta l'area circostante la conca del Devero.

Caratteristiche tecniche della stazione

- Nome del sito: DEVE
- N° IERS: 12779M001
- Data di installazione: 01 settembre 2005
- Ricevitore: Leica GRX1200PRO
- Antenna: LEIAT504
- Manufatto: pilastro in c.a. ancorato su roccia
- Alimentazione: rete elettrica
- Coordinate

Geodetiche (WGS84Igb00): $\varphi = 46^{\circ}18'48.81411''$ $\lambda = 8^{\circ}15'39.59803''$

Piane (UTM-WGS84 F32): N = 5 129 152.4108 E = 443 101.6431

- Quota elissoidica: 1679.420 m
- Quota ortometrica: 1630 m s.l.m.

- Altre strumentazioni presenti nel sito: pluviometro, termometro aria, igrometro, nivometro.



Figura 60. La stazione GPS permanente presso l'Alpe Devero

MONTE CARZA – Comune di Trarego/Viggiona (VB)

Inquadramento geografico

La stazione è ubicata sulla sommità del M.te Carza, circa 1120 m s.l.m.m., situato sulla sponda destra del Lago Maggiore, a costituire l'ultima elevazione della cresta spartiacque tra il bacino del Rio di Cannero e quello del T. Cannobino. È raggiungibile in auto da Torino in circa 3 ore.

Cenni di geologia

La stazione GPS è ubicata sul M.te Carza, nella zona di intersezione di importanti lineamenti tettonici regionali, quali la linea tettonica del Canavese e del

Tonale. La sommità di tale monte è costituita da anfiboliti di età tardo paleozoica (circa 250 milioni di anni fa).

Dal punto di vista geologico il monte Carza è situato nella zona di affioramento della Serie dei Laghi, costituita da rocce di tipo prevalentemente gneissico ed appartenente alle cosiddette Alpi Meridionali (o Sudalpino). Queste ultime sono caratterizzate da una sequenza di falde tettoniche traslate, a partire dalla fine dell'Oligocene (24 milioni di anni fa), verso S.

Caratteristiche tecniche della stazione

- Nome del sito: CARZ
- N° IERS: 12778M001
- Data di installazione: 25 agosto 2005
- Ricevitore: Leica GRX1200PRO
- Antenna: LEIAT504
- Manufatto: pilastro in c.a. ancorato su roccia
- Alimentazione: pannello solare
- Coordinate

Geodetiche (WGS84Igb00): $\varphi = 46^{\circ}2'32.42729''$ $\lambda = 8^{\circ}40'48.73402''$

Piane (UTM-WGS84 F32): N = 5 098 801.5838 E = 475 256.3470

- Quota ellissoidica: 1165.278 m
- Quota ortometrica: 1116 m s.l.m.
- Altre strumentazioni presenti nel sito: pluviometro, termometro aria.

LAGO AGNEL – Comune di Ceresole Reale (TO)

Inquadramento geografico

La stazione è ubicata nei pressi del Lago Agnel, posto ad una quota di circa 2300 m s.l.m.m. nell'alta Valle dell'Orco, nelle Alpi Graie, lungo la strada che da Ceresole Reale sale al Colle del Nivolet, che segna il confine con la Regione Valle d'Aosta.

Ricade all'interno del Parco Nazionale del Gran Paradiso ed è raggiungibile in auto da Torino in circa 1 ora e 30 minuti.

Cenni di geologia

Le rocce affioranti in corrispondenza della stazione GPS sono gneiss occhiadini, derivanti dal metamorfismo di originarie rocce granitiche di età carbonifera superiore (300 milioni di anni fa).

Queste rocce affiorano nella parte occidentale del massiccio cristallino del Gran Paradiso, appartenente alle cosiddette falde Pennidiche superiori. Poche

centinaia di metri ad ovest del lago è presente un limite geologico (contatto tettonico) che separa queste ultime dalle rocce appartenenti alla Zona Piemontese dei calcescisti con pietre verdi.

La morfologia dell'area è caratterizzata da tracce di modellamento glaciale: depositi morenici, massi erratici, rocce montonate, circhi glaciali, conche di sovraescavazione, ecc..

Caratteristiche tecniche della stazione

- Nome del sito: AGNE
- N° IERS: 12777M001
- Data di installazione: 30 agosto 2005
- Ricevitore: Leica GRX1200PRO
- Antenna: LEIAT504
- Manufatto: pilastro in c.a. ancorato su roccia
- Alimentazione: rete elettrica
- Coordinate Geodetiche (WGS84|gb00): $\varphi = 46^{\circ}28'4.58799''$ $\lambda = 7^{\circ}8'22.62928''$
- Piane (UTM-WGS84 F32): N = 5 036 618.2201 E = 354 572.3224
- Quota ellissoidica: 2354.602 m
- Quota ortometrica: 2300 m s.l.m.
- Altre strumentazioni presenti nel sito: pluviometro, termometro aria, nivometro.

OSSERVATORIO ASTRONOMICICO DI TORINO - Pino T.se (TO)

Inquadramento geografico

La stazione è ubicata presso l'Osservatorio Astronomico di Torino, alla quota di circa 600m s.l.m.m., situato nel Comune di Pino T.se, sulla collina torinese.

È raggiungibile in auto dalla città di Torino in circa 20 minuti.

Cenni di geologia

Le rocce affioranti in corrispondenza della stazione GPS sono costituite da marne, arenarie e conglomerati che formano i rilievi della Collina di Torino. Parte di queste rocce sono composte da sedimenti che provengono dallo smantellamento della catena alpina in sollevamento.

Queste rocce hanno un'età compresa dall'Eocene sup. (circa 40 milioni di anni fa) al Messiniano (circa 5 milioni di anni fa). La forma dei rilievi collinari è il risultato delle spinte orogenetiche legate alla formazione sia della catena alpina che di quella appenninica. Studi recenti hanno evidenziato che tali spinte sono

ancora in atto; negli ultimi 100 anni il sollevamento di quest'area è stato di circa 16 cm.

Caratteristiche tecniche della stazione

- Nome del sito: OATO
- N° IERS: 12724M001
- Data di installazione: 7 GIUGNO 2005
- Ricevitore: Leica GRX1200PRO
- Antenna: LEIAT504
- Manufatto: pilastro in c.a. ancorato su roccia
- Alimentazione: rete elettrica
- Coordinate

Geodetiche (WGS84lgb00): $\varphi = 45^{\circ}2'29.57363''$ $\lambda = 7^{\circ}45'55.08576''$ Piane (UTM-WGS84 F32): N = 4 988 307.3783 E = 402 757.2343

- Quota ellissoidica: 658.811 m
- Quota ortometrica: 610 m s.l.m.
- Altre strumentazioni presenti nel sito: pluviometro, termometro aria, barometro, igrometro, radiometro, anemometro.

BRIC DEL PALUCO – Paroldo (CN)

Inquadramento geografico

La stazione è ubicata nelle Langhe, sul versante meridionale del Bric del Paluco, alla quota di circa 800 m s.l.m.m.; la sommità dell'altura fa parte della cresta spartiacque tra il torrente Bovina ed il torrente Belbo.

È raggiungibile in auto dalla città di Torino in circa 1 ora e 30 minuti.

Cenni di geologia

Le rocce affioranti in corrispondenza della stazione GPS sono costituite da marne siltose di colore grigio-azzurro, caratterizzate, nella porzione inferiore, da intercalazioni di arenarie o sabbie ocracee. Tale formazione, di età miocenica inferiore (circa 20 milioni di anni fa), prende il nome di Marna di Paroldo. L'area in cui ci troviamo si colloca all'interno delle Langhe; queste rappresentano un dominio del Bacino Terziario Piemontese, costituito da una potente (4.000 m) successione di sedimenti immergente mediamente a NW, composta da depositi principalmente silicoclastici, deposti in un bacino marino durante l'Oligocene-Miocene medio (circa 36 ÷ 15 milioni di anni fa). L'evoluzione geologica del dominio delle Langhe è caratterizzata durante il Miocene (circa 24 ÷ 5 milioni di

anni fa) da tassi di subsidenza maggiori rispetto a quelli adiacenti (Alto Monferrato) e da un sollevamento relativo dalla fine del Miocene ad oggi.

Caratteristiche tecniche della stazione

- Nome del sito: PARO
- N° IERS: xxxxxxxxx
- Data di installazione: estate 2007
- Ricevitore: in fase di definizione
- Antenna: Ashtech Dorne Margolin
- Manufatto: pilastro in c.a. ancorato su roccia
- Alimentazione: rete elettrica
- Coordinate

Geodetiche (WGS84|gb00): $\varphi = 44^{\circ}26'45.56734''$ $\lambda = 8^{\circ}04'52.05445''$ Piane (UTM-WGS84 F32): N = 4 921 820.574 E = 426 884.1345

- Quota ellissoidica: 849.812 m
- Quota ortometrica: 810 m s.l.m.
- Altre strumentazioni presenti nel sito: pluviometro, termometro aria.

La gestione del sistema

I dati acquisiti e memorizzati in file giornalieri vengono gestiti dal software Leica "Spider". Tale applicativo consente, tramite il collegamento in remoto alle cinque stazioni permanenti, di verificare il corretto funzionamento dei ricevitori, di settare le varie funzionalità nel modo più opportuno e di trasferire i dati in modo automatico ad un server centrale, situato presso la sede del Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche.

La trasmissione dei dati dalle stazioni al server centrale avviene, giornalmente ad orari prestabiliti, con le seguenti modalità:

- Alpe Devero: tramite linea telefonica;
- Monte Carza: tramite modem GSM;
- Lago Agnel: tramite modem GSM;
- Osservatorio Astronomico: tramite linea telefonica ADSL;
- Bric del Paluco: tramite linea telefonica.

Software Leica "Spider" - *Sky Plot* e diagramma di qualità di una delle stazioni (Lago Agnel)

Aspetti operativi

In fase di individuazione dei siti deputati ad ospitare le stazioni permanenti non si sono riscontrati particolari problemi operativi. L'idoneità dei siti ad accogliere i manufatti sui quali sono stati installati i ricevitori GPS e le relative antenne è stata verificata in tempi relativamente brevi.

Nondimeno molto sollecitate sono state le Amministrazioni Pubbliche locali nel fornire le necessarie autorizzazioni per la realizzazione delle opere richieste.

La realizzazione dei pilastrini è stata volutamente affidata ad imprese del posto, che hanno ultimato l'opera rapidamente ed, allo scopo di ridurre al minimo l'impatto ambientale, hanno utilizzato materiale in prevalenza locale.

Attività e diffusione dei dati

Il Progetto deve il suo successo alla collaborazione tra istituti di ricerca, importanti programmi di istruzione e sensibilizzazione a livello internazionale, agenzie nazionali e governative e uffici pubblici regionali.

La strategia di progetto si individua nella struttura transnazionale della collaborazione che coinvolge geoscientiati e utenti finali, fornendo strumenti eccellenti per la formazione incrociata e l'interazione tra impiegati regionali e giovani scientiati.

Il Progetto, finalizzato alla riduzione dei rischi naturali, concerne diversi aspetti quali la deformazione crostale con potenziale sismico, la meteorologia, il monitoraggio dei fenomeni franosi, l'agricoltura, la navigazione, i trasporti, la cartografia ed il rilievo topografico.

Attualmente i dati acquisiti dalle quattro stazioni permanenti attive dell'Agenzia vengono trasmessi ad un server generale gestito, per conto dell'Università degli Studi di Trieste (capofila del Progetto), dalla Società GalileianPlus dove, contestualmente a quelli provenienti dalle altre stazioni distribuite sull'arco alpino, si procede ad un controllo di qualità, alla loro elaborazione e successivamente all'archiviazione, in attesa della loro utilizzazione per gli scopi specifici del progetto e degli altri impieghi ritenuti opportuni dagli Enti proprietari.

Obiettivo del Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche é di mettere questi dati a disposizione degli operatori del settore. A questo scopo è in fase di studio la realizzazione di un apposito servizio di fruizione dei dati via Web che permetterà a Amministrazioni Locali, Enti Pubblici, società private e professionisti lo scarico di tali dati. Si prevede infatti di individuare all'interno del sito ARPA un apposito spazio nel quale collocare i files ottenuti dalle operazioni

di post-processamento, secondo una architettura/struttura ancora da definire, al quale potranno accedere i succitati soggetti secondo prestabilite modalità.

3.1.2 Gestione delle reti di controllo ARPA Piemonte

Il territorio piemontese per le sue caratteristiche geologiche e per il regime climatico a cui è esposto, presenta un assetto geomorfologico in rapida evoluzione: i versanti dell'arco alpino sono particolarmente soggetti allo sviluppo di fenomeni franosi di grandi dimensioni caratterizzate da meccanismi di tipo complesso e di crolli diffusi. La Collina di Torino e l'ampia zona collinare appenninica sono soggette a fenomeni di scivolamento che tendono ad evolvere in colamenti lenti. Viceversa la zona delle Langhe piemontesi per la peculiare struttura geologica è soggetta in modo predominante a scivolamenti di tipo planare. In tutti gli ambienti le coperture superficiali sono soggette a fenomeni di colamento rapido, specie in occasione di eventi meteorologici intensi.

Attività servizi, controlli:

- Gestione, aggiornamento ed approfondimento dell'inventario dei fenomeni franosi all'interno del Sistema Informativo FRANE in Piemonte (SIFRAP) (metadocumentazione disponibile al percorso Geologia e processi di dissesto>Processi di versante>IFFI/SIFRAP e RERCOMF)
- Studi propedeutici alla predisposizione di sistemi di monitoraggio.
- Studi di approfondimento a supporto di situazioni di particolare criticità a livello comunale.
- Individuazione di indicatori rappresentativi a livello regionale.
- Gestione e aggiornamento della base dati documentale.
- Rilevamento degli effetti dei processi naturali in Piemonte finalizzata all'aggiornamento delle banche dati su effetti e danni indotti da movimenti di versante in Piemonte e alla redazione del Quadro del Dissesto.
- Supporto tecnico nella definizione del quadro delle conoscenze su fenomeni franosi nell'ambito di attività di governo del territorio.
- Valutazioni tecniche di competenza per la definizione del quadro del dissesto idrogeologico a supporto delle attività volte alla prevenzione del rischio e per gli obiettivi della protezione civile.
- Concorso alla stesura di indirizzi per la programmazione di interventi di sistemazione idrogeologica a seguito di eventi alluvionali.

- Contributo ad attività di reporting e di informazione diretta ai cittadini ed educazione ambientale.
- Partneriato nazionale e internazionale.

3.1.3 La RERCOMF

(REte Regionale di COntrollo dei Movimenti Franosi)

La rete comprende circa 300 sistemi di monitoraggio strumentale attivi su altrettante frane del territorio piemontese[10]

- I sistemi sono stati realizzati (a partire dagli anni '80) per lo più dai Comuni, a seguito di finanziamenti regionali
- A partire dagli anni '90, Regione Piemonte, attraverso un Settore in seguito confluito in Arpa Piemonte, dà inizio ad una gestione unificata dei sistemi di monitoraggio attivi sul territorio regionale
- La gestione operata da Arpa Piemonte si configura come un servizio reso agli enti locali, i quali, pur essendo formalmente proprietari della strumentazione, raramente dispongono delle risorse necessarie a garantire l'efficacia e l'efficienza della strumentazione nel tempo.

I sistemi di monitoraggio sono finanziati per acquisire informazioni circa lo stato di attività del fenomeno franoso monitorato e progressivamente disporre di supporto conoscitivo per una serie di interventi sul territorio:

- interventi di sistemazione lungo i versanti;
- interventi di pianificazione territoriale;
- predisposizione di piani di protezione civile.

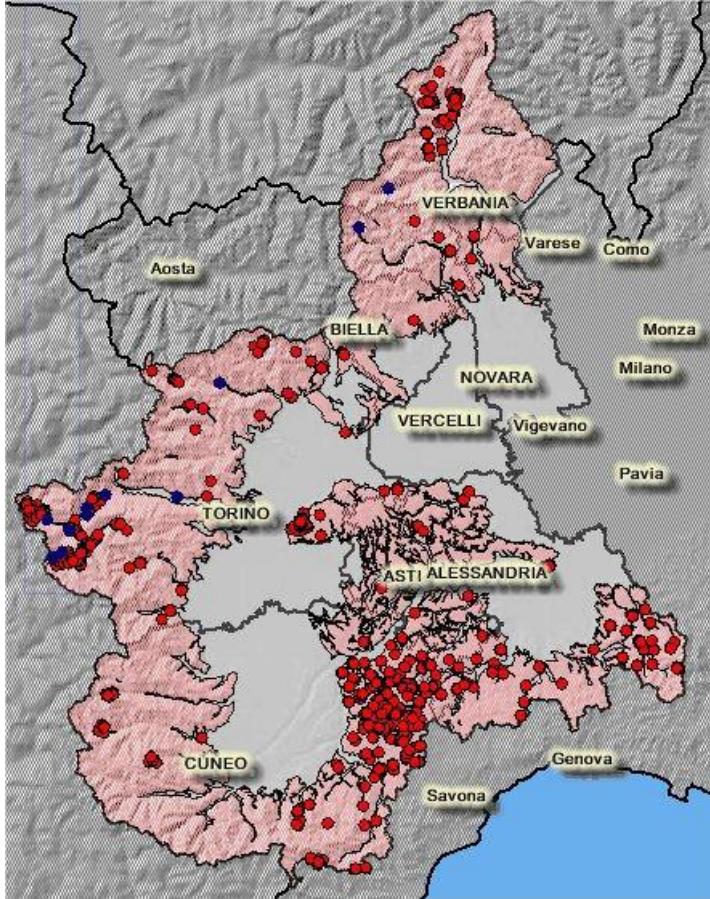


Figura 61

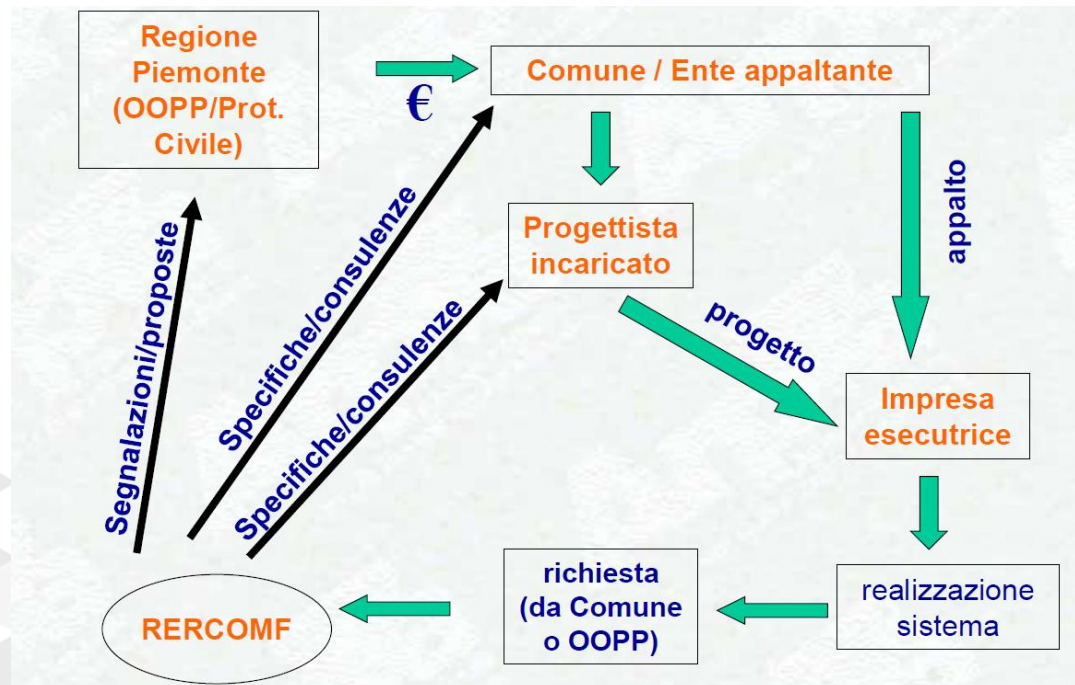
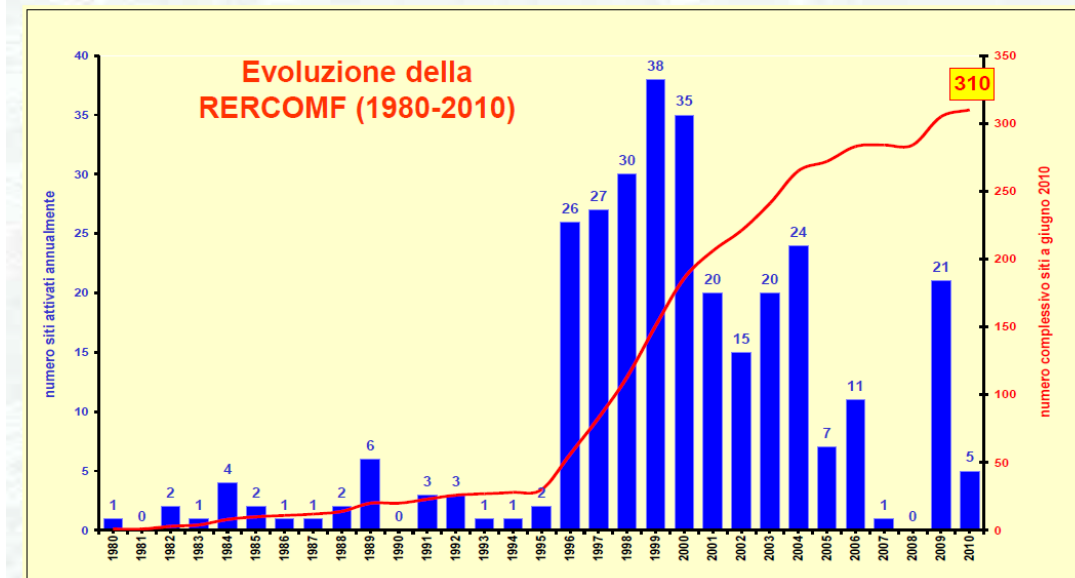


Figura 62. Evoluzione della rete RERCOMF e delle relazioni con altri enti

La rete e' di tipo estensivo: comprende molti siti (300 circa) ciascuno con relativamente pochi strumenti perlopiù convenzionali (inclinometri, piezometri, estensimetri e caposaldi topografici), installati su fenomeni a lenta evoluzione.

- 700 inclinometri e 400 piezometri di proprietà dei Comuni: lettura manuale semestrale (ditta esterna)squadra di 2 tecnici per 220 giorni/anno
- 400 caposaldi topografici/GPSrealizzati da Arpa + Comuni:lettura manuale semestrale/annuale (Arpa)squadra di 4 tecnici per 35 giorni/anno
- 22 inclinometri fissi (automatizzati) di proprietà Arpa + Sett. Protezione Civile: letture automatiche plurigiornaliere dati visualizzabili su sito internet da Arpa e Prot. Civ.

400 piezometri + 400 caposaldi topografici/GPS + 22inclinometri fissi (automatizzati) vengono periodicamente acquisiti ad alimentare la serie storica dell'Agenzia trasmessi ai Comuni, accompagnati da una specifica relazione tecnica affinché vengano impiegati per la pianificazione territoriale. Qualora siano da evidenziare situazioni "critiche" o suggerire interventi integrativi, tali relazioni vengono trasmesse per conoscenza anche ai Settori OOPP competenti e/o al Settore Reg. Protezione Civile, talora proponendo sopralluoghi congiunti.

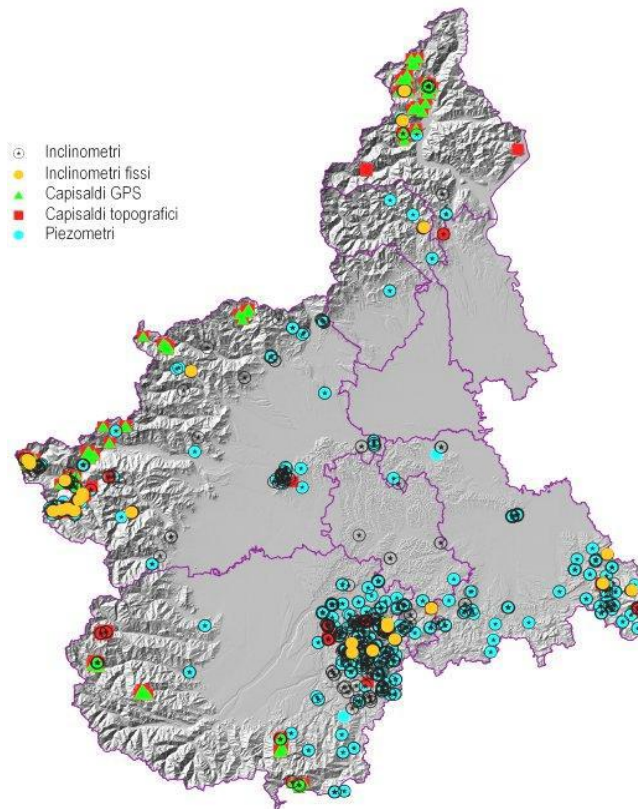


Figura 63. Distribuzione della strumentazione di misura nella rete RERCOMF

Gli obiettivi della RERCOMF sono garantire l'efficienza, nel tempo, delle strumentazioni al fine di

- costituire, attraverso l'effettuazione di periodiche misure, una preziosa serie storica di dati...
- valutare (in situazioni ordinarie e di emergenza) l'evoluzione nel tempo dei fenomeni franosi...
- informare le autorità competenti (comuni, province, uffici regionali)

A inizio d'anno, per ogni provincia, viene redatta una relazione di sintesi su tutti i siti monitorati. Tali relazioni hanno lo scopo di informare la Direzione di Settori OOPP competenti (incluso il Settore Protezione Civile) e le Amministrazioni Provinciali (strutture di difesa suolo e protezione civile) sulle attività condotte, nell'ottica di avviare con ciascuna struttura valutazioni congiunte.

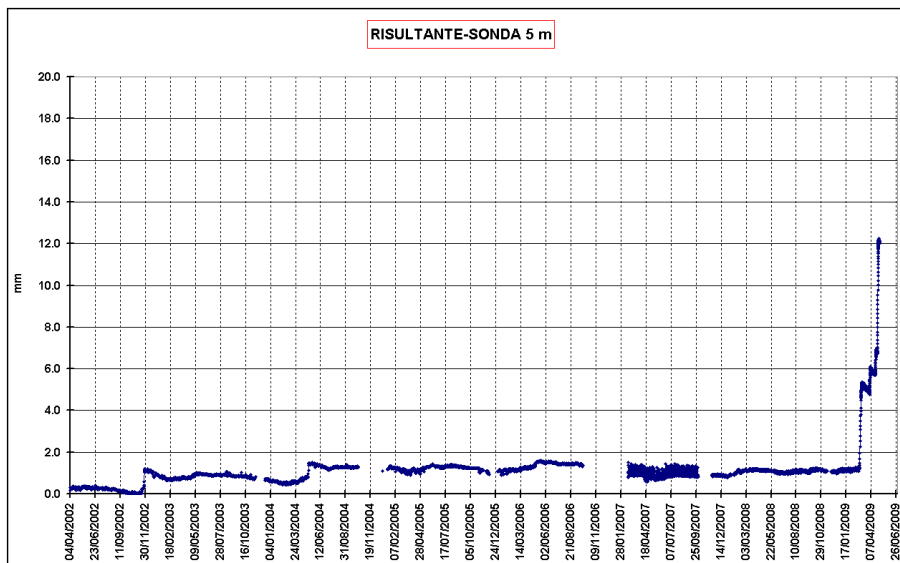
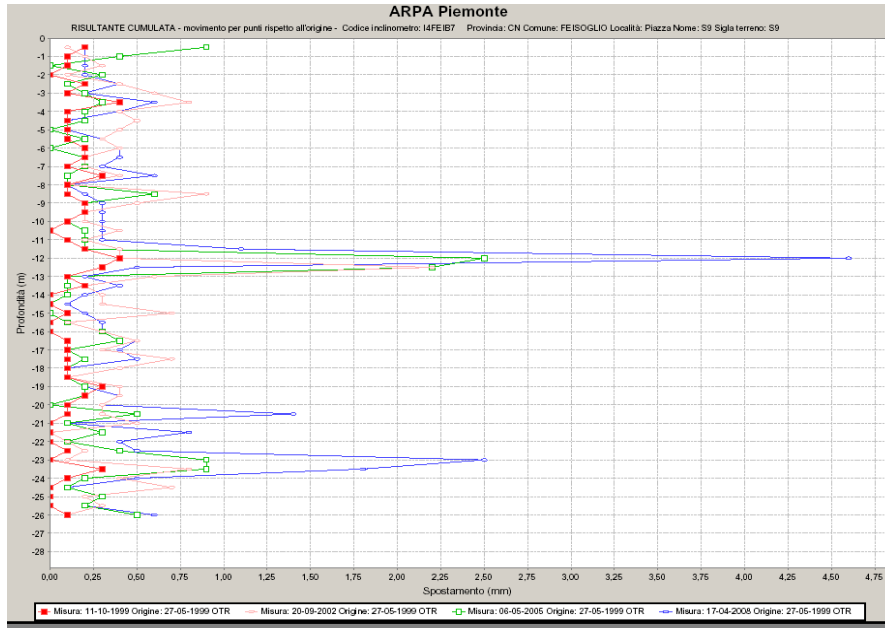


Figura 64. Esempio dell'importanza di registrare una serie storica dei dati: letture manuali (sopra) letture automatiche (sotto).

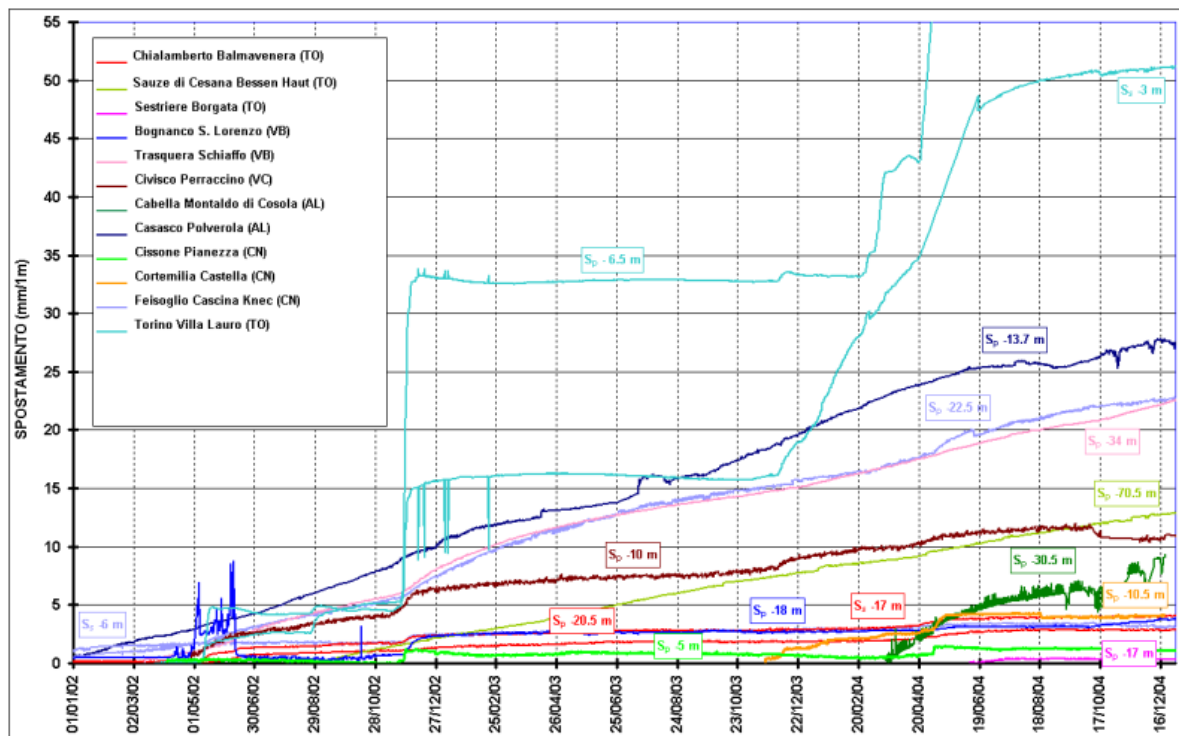


Figura 65

Benché l'attività di gestione della RERCOMF sia consolidata ormai da più di un decennio, al momento attuale il servizio non ha ancora un preciso recepimento normativo a livello regionale. I servizi e gli obiettivi poc'anzi descritti sono contemplati in una procedura di qualità dell'Agenzia. A fronte degli eventi meteo pluviometrici verificatisi in diversi settori alpini e collinari del Piemonte negli anni 2008 e 2009, che hanno visto Arpa e Regione operare nell'ambito delle rispettive competenze, è emersa la necessità di proceduralizzare le modalità operative che orientano il Settore regionale Protezione Civile e l'Agenzia nell'ambito delle attività congiunte di controllo dei movimenti franosi. A tale scopo nell'autunno 2009 è stato istituito un gruppo di lavoro, composto da tecnici di Arpa Piemonte e del Settore regionale Protezione Civile, finalizzato alla stesura di un disciplinare regionale volto alla definizione di nuovi strumenti utili alla diffusione e dall'uso dei dati della rete di monitoraggio sui fenomeni franosi in Piemonte in condizioni di ordinarietà, di emergenza e di prevista emergenza.

Le procedure operative del disciplinare, attualmente in fase di prima bozza, si baseranno sulla correlazione tra attività di monitoraggio dei fenomeni franosi e sistema di allertamento meteoridrologico regionale. Il sistema, istituito con DGR n. 37-15176 del 2005, suddivide il territorio piemontese in Zone di allertamento, ambiti territoriali caratterizzati da risposta meteorologica, idrologica e nivologica omogenea in occasione dell'insorgenza del rischio. Quotidianamente il Centro Funzionale di Arpa Piemonte emette un bollettino che riporta la situazione attesa per le successive 36 ore in ciascuna zona (Situazione Ordinaria, Moderata Criticità, Elevata Criticità).

<u>Soggetti coinvolti</u>	<u>COMPITI – situazione ordinaria</u>	<u>COMPITI – evento/emergenza</u>
Protezione Civile Regione Piemonte	<ul style="list-style-type: none"> • Impiego dei dati di monitoraggio per attività programmatiche e pianificatorie • Fornitura di supporto logistico • Proposta e finanziamento nuovi siti <p style="text-align: center;">1^a FASE: stesura testo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Uso dei dati durante il lavoro di sala operativa e di azioni urgenti di protezione civile • Supporto tecnico-logistico (sopralluoghi) • Supporto tecnico-economico • Supporto tecnico-informativo (web)
Arpa Piemonte- SC Geologia e dissesto	<ul style="list-style-type: none"> • Gestione tecnica, validazione e pubblicazione dei dati di monitoraggio • Coordinamento attività di manutenzione • Proposta nuovi siti • Supporto tecnico ai Comuni 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestione, + fornitura a richiesta dei dati secondo cadenza definite • Supporto tecnico ad uffici di PC regionali e provinciali • Sopralluoghi
Province piemontesi	<ul style="list-style-type: none"> • Impiego dei dati per attività programmatiche e pianificatorie • Proposta nuovi siti • Formazione/divulgazione del disciplinare c/o Comuni 	<ul style="list-style-type: none"> • Consultazione dei dati • Supporto informativo ai Comuni colpiti dall'evento e UTG-Prefetture • Sopralluoghi
Uffici regionali OO.PP. decentrati per territorio	<ul style="list-style-type: none"> • Proposta finanziamento nuovi siti • Confronto finanziamenti regionali e nazionali ad hoc <p style="text-align: center;">2^a FASE: condivisione testo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Consultazione dei dati • Supporto informativo ai Comuni • Sopralluoghi
UTG-Prefetture	<ul style="list-style-type: none"> • Destinatari dei dati 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiesta supporto informativo agli uffici provinciali e regionali
Comuni Piemontesi	<ul style="list-style-type: none"> • Primi destinatari dei dati • Adeguamento piani di protezione civile in ragione dei dati • Manutenzione 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiesta supporto tecnico e sopralluoghi • Attuazione di quanto previsto dal piano comunale di PC • Sopralluoghi

CENTRO FUNZIONALE		AZIONI RERCOMF	
Livello di vigilanza	Attività di monitoraggio	Assenza movimento	Movimento/accelerazioni
Situazione ordinaria	Campagne semestrali/annuali	Trasmissione report ai Comuni	<ul style="list-style-type: none"> • Segnalazione ai Comuni, uffici Regione/province • Il Comune fa un primo sopralluogo. Sulla base dell'anomalia cinematica riscontrata da Arpa (lieve o grave), è tenuto o meno a relazionarne gli esiti agli altri soggetti competenti • Eventuale e successiva concertazione ulteriori azioni/interventi
Criticità moderata/elevata	Campagna straordinaria nei siti inclusi nella zona allertata	idem	idem

Figura 66. Azioni RERCOMF per condizioni determinate dalle misure della strumentazione a lettura manuale

CENTRO FUNZIONALE		AZIONI RERCOMF	
Livello di vigilanza	Attività di monitoraggio	Assenza movimento	Movimento/accelerazioni
Situazione ordinaria	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica quotidiana funzionalità via web (acceso/spento) • In caso di anomalie, segnalazione per manutenzione • Elaborazione mensile dei dati ed interpretazione 	Trasmissione report ai Comuni	<ul style="list-style-type: none"> • Segnalazione ai Comuni, uffici Regione/province • Il Comune fa un primo sopralluogo. Sulla base dell'anomalia cinematica riscontrata da Arpa (lieve o grave), è tenuto o meno a relazionarne gli esiti agli altri soggetti competenti • Eventuale e successiva concertazione ulteriori azioni/interventi
Criticità moderata (da inizio evento a 6 gg dopo fine evento)	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica quotidiana (acceso/spento, manutenzione) • Ogni 2 gg, elaborazione dei dati delle postazioni incluse nella zona allertata ed interpretazione 	idem	idem
Criticità elevata (da inizio evento a 10 gg dopo fine evento)	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica quotidiana (acceso/spento, manutenzione) • Ogni 2 gg, elaborazione dei dati delle postazioni incluse nella zona allertata ed interpretazione 	idem	idem

Figura 67. Azioni RERCOMF per condizioni determinate dalle misure della strumentazione a lettura automatica

I fenomeni franosi inclusi nella RERCOMF hanno evoluzione lenta (spostamenti misurati in superficie dell'ordine di alcuni cm/anno, con accelerazioni/attivazioni parossistiche in occasioni di eventi meteorologici intensi e/o prolungati). Tali fenomeni interessano realmente la maggior parte della porzione montuosa e collinare del territorio piemontese. Nella fase di interpretazione dei dati, la definizione di una situazione critica avviene confrontando l'accelerazione/attivazione eventualmente riscontrata con la tendenza evolutiva registrata con le misure precedenti (seriestoriche) e/o con il comportamento segnalato da altri strumenti nell'intorno o in contesti geomorfologici analoghi. E' inoltre fondamentale il contributo fornito dalla consultazione dei Sistemi informativi/Banche Dati Geologici propri dell'Agenzia e la collegialità delle valutazioni.

I "traguardi" della RERCOMF nel lungo termine sono:

- favorire la cultura della gestione del territorio soprattutto in condizioni ordinarie, cioè in assenza di necessità contingenti dettate da eccezionali condizioni meteorologiche e al suolo;
- favorire la conoscenza e consapevolezza dello stato del dissesto locale, ai fini di una efficace pianificazione;
- mitigare l'eccessiva attesa/fiducia nei sistemi di monitoraggio con specifica finalità di allertamento.

Creare un "livello base permanente" di attenzione nei confronti dei fenomeni naturali contribuire affinché le responsabilità nelle azioni/scelte nell'ambito della gestione del territorio siano adeguatamente condivise fra tutti i soggetti pubblici coinvolti, a partire dalle Amministrazioni comunali (proprietà della strumentazione).

> 3.2 ARPA Lombardia

ARPA, in virtù delle funzioni assegnate dalla Regione Lombardia con la legge 16/99, opera nel campo della progettazione, installazione, manutenzione e gestione di reti di monitoraggio geotecnico e idrometeorologico in accordo con la programmazione elaborata dalle strutture della Giunta regionale competenti in materia. ARPA fornisce inoltre un servizio di consulenza specialistica in materia di monitoraggio geotecnico agli Enti Locali che ne fanno richiesta. Un ruolo operativo in termini di presidio delle reti di monitoraggio installate su alcune frane

dell'area lombarda è affidato al Centro Monitoraggio Geologico che elabora i dati disponibili segnalando eventuali situazioni di rischio agli Organi preposti alla tutela dell'incolumità delle popolazioni. Il Centro Monitoraggio Geologico ha sede presso la Sede Territoriale della Regione Lombardia di Sondrio dove confluiscono i dati acquisiti in telemisura la cui valutazione è affidata ai tecnici presenti nella sala operativa.

La programmazione delle attività con la definizione degli indirizzi tecnici e degli obiettivi del Centro Monitoraggio Geologico è posta in capo alla Unità Organizzativa Centro di Monitoraggio Geologico del Settore Tutela delle Risorse Naturali di Milano. Il Centro è attivo 7 giorni su 7 negli orari d'ufficio e in caso di necessità - a seguito di pre-allarme o allarme meteo o per segnalazioni provenienti dalla rete di monitoraggio geotecnico - può organizzare un presidio continuativo.

Per monitoraggio geotecnico, che costituisce la funzione fondamentale del Centro, si intende l'insieme di attività che consente di caratterizzare e controllare nel tempo un dissesto. La necessità di controllo deriva da valutazioni di ordine geologico e geotecnico, spesso a seguito di indagini (perforazioni o geofisiche) che possono anche essere utilizzate per la posa di strumentazione di monitoraggio e dall'interno del corpo di frana tramite:

- *Controllo dell'apertura delle fratture*
- *Individuazione delle superfici di scivolamento*
- *Individuazione di movimenti profondi*
- *Misura del livello di falda*

La strumentazione utilizzata può essere in telemisura, con rilievo e trasmissione automatica del dato a cadenza prefissata, oppure manuale, con rilievo del dato da parte di un operatore in sito. Le informazioni acquisite dalla rete geotecnica possono essere integrate da rilievi topografici e/o dal monitoraggio GPS.

Il monitoraggio topografico utilizza i principi e gli strumenti del rilievo geodetico e topografico per il controllo degli spostamenti di caposaldi opportunamente posizionati. L'utilizzo del Sistema di Posizionamento Globale (GPS) può integrare le informazioni acquisite dal monitoraggio topografico. Utilizzando antenne di collegamento ad una costellazione di 24 satelliti orbitanti e' possibile determinare la posizione di un punto elevata precisione. Uno dei vantaggi dell'utilizzo di questo Sistema è la possibilità di operare con qualsiasi condizione atmosferica e in assenza di visibilità. La tecnologia GPS consente di determinare la posizione

(latitudine, longitudine, quota) sulla superficie terrestre di un punto (RP1) e quindi di calcolare gli eventuali spostamenti di un caposaldo, posizionato nell'area di frana, con precisione millimetrica. Per poter funzionare il Sistema di Posizionamento Globale deve poter ricevere contemporaneamente il segnale da almeno quattro satelliti. Dai tecnici di questo Centro vengono effettuate campagne di misure topografiche e GPS a cadenza programmata sui siti di frana. La frana della Val Genasca è inoltre monitorata anche da un sistema GPS con acquisizione dati in tempo reale.

Ad integrazione dei dati acquisiti dalla strumentazione geotecnica, esiste una vasta rete di monitoraggio idrometeorologico che fornisce tutta una serie di informazioni relative alle precipitazioni piovose e nevose, temperature dell'aria, portata dei corsi d'acqua, direzione e velocità del vento, umidità dell'aria, radiazione solare diretta e riflessa. Tutti questi dati, acquisiti in modalità automatica ogni mezzora, integrati con le informazioni fornite dal monitoraggio geotecnico, consentono di elaborare modelli previsionali di comportamento per ciascuna frana.

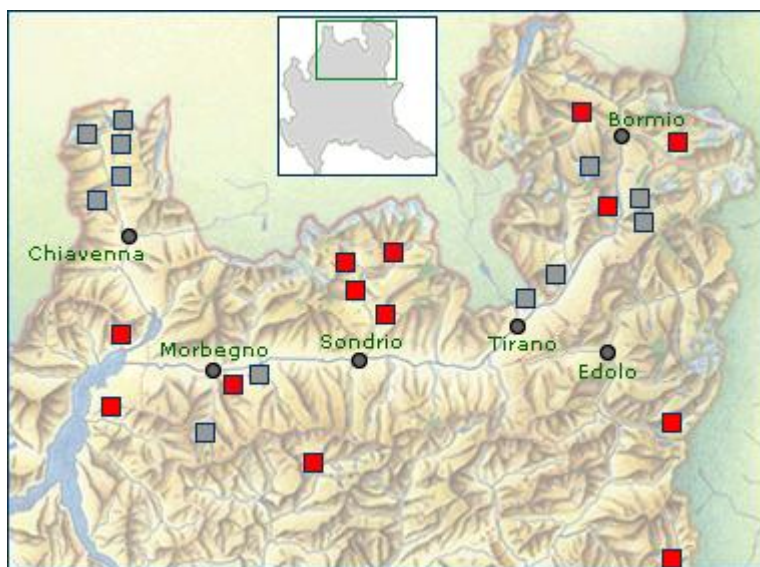


Figura 68. Rete di rilevamento geotecnico automatico

In alcuni casi sono stati costruiti degli scenari di rischio collegati a valori di soglia, utilizzati per la gestione delle eventuali situazioni di emergenza e la

salvaguardia della popolazione. Le procedure sono contenute nei relativi piani di emergenza. In particolare, al momento esistono i seguenti piani di emergenza:

- *Ruinon*
- *Val Pola*
- *Spriana*
- *Torreggio*
- *Semogo*
- *Campo Frasca*
- *Saviore*
- *Gera Lario*

I piani di emergenza contengono scenari di rischio crescente e considerano le differenti tipologie di evento che si possono verificare in corrispondenza dei dissesti (colate di detrito, crolli, ribaltamenti,...), con le relative conseguenze per centri abitati ed infrastrutture.

Esempio di zona dissestata monitorata con piano di emergenza elaborato.

Località: Santa Caterina Valfurva

Comune: Valfurva (SO)

Cartografia: Sezioni C.T.R. 1:10000 D2d1 Val di Sotto est – D2e1 Santa Caterina Valfurva.

Tipologia del dissesto: scivolamento di detrito superficiale e di roccia profondo, più possibili crolli di massi anche di grossa volumetria e colate detritiche in concomitanza ad eventi meteorologici (pioggia e/o disgelo).

Reti di monitoraggio: geotecnica automatica e manuale, GPS automatica e manuale, topografica e meteorologica. Sul versante opposto a quello della frana dall'estate 2006 è posizionato un'interferometro che trasmette i dati in tempo reale presso la sede Centrale di Arpa Milano.

Riferimento: scheda n. 78 Atlante "Centro abitati instabili della provincia di Sondrio" (edito Regione Lombardia) e Inventario dei dissesti della Regione Lombardia.

Elementi a rischio: prioritariamente interessamento della strada ex SS300. In caso di collasso generalizzato, rischio ostruzione del torrente Frodolfo con possibili formazioni di onde liquido/solide ad alta mobilità rischia di interessare gli abitati di S. Antonio, Uzza, S. Nicolò, S. Gottardo e Bormio.

Piani di emergenza: esiste un piano particolareggiato di emergenza elaborato dalla prefettura di Sondrio attivato dalle segnalazioni di superamento soglie relativamente alla strumentazione del sistema di monitoraggio.

Frana attiva con forti accelerazioni in concomitanza di eventi meteorologici che subisce rallentamenti nella sua dinamica in occasione del periodo invernale. Si osservano frequenti distacchi di materiale roccioso soprattutto a partire dalla "nicchia bassa". Scenari di rischio previsti dal "piano particolareggiato della Prefettura di Sondrio" Vengono elencati i fenomeni che potrebbero aver luogo, in ordine crescente di pericolosità e di volumi coinvolti, con relativa indicazione delle aree interessate dalle fenomenologie proprie di ogni scenario.

Scenario A - Crollo di massi isolati provenienti dalle due nicchie o dal detrito già in parte mobilizzato. I blocchi di maggiori dimensioni (diverse decine di mc) possono raggiungere il fondovalle per rotolamento o rimbalzo.

Scenario B - Formazione di colate detritiche e/o franose coinvolgenti il materiale presente sul corpo frana e a monte della stessa, in particolare ai due lati della zona di frana che possono canalizzarsi nella piccole incisioni vallive presenti e possono raggiungere il fondovalle.

Scenario C - mobilitazione e franamento di porzioni di ammasso roccioso di volumetria variabile, dell'ordine delle migliaia di metri cubi, provenienti sia dalla Nicchia Alta che dalla Nicchia Bassa, sotto forma di scivolamenti o valanghe di roccia/detrito, con elevata energia e velocità di movimento, che potrebbero raggiungere il fondovalle.

Scenario D - mobilitazione e franamento di porzioni di ammasso roccioso, con gli stessi meccanismi ipotizzati nello scenario C ma con volumetrie maggiori (centinaia di migliaia di mc), che potrebbero ostruire parzialmente il corso del torrente Frodolfo, con successiva rimobilizzazione del materiale e conseguente aumento del trasporto solido e con fenomeni eorsivi e di esondazione a valle.

Scenario E - Franamento dell'intero ammasso di frana instabile con volumetrie fino ad alcune decine di milioni di mc, con totale sbarramento del corso del torrente Frodolfo e con formazione di un vaso di ritenuta a monte dell'accumulo e con eventuale tracimazione (sfondamento della diga naturale formatasi). Tutto il fondovalle del torrente Frodolfo e parte del versante opposto verrebbero interessati dalla valanga di roccia e dall'ondata detritica di piena conseguente.

> 3.3 Provincia di Treviso

Introduzione

La valutazione di pericolosità geomorfologica è legata alla franosità del territorio in esame e si basa sulla combinazione di analisi di previsione

dell'occorrenza dei fenomeni franosi, in termini spaziali e temporali, e di previsione della tipologia, intensità e tendenza evolutiva dei fenomeni. La stima della pericolosità geomorfologica di un'area è dunque un'operazione molto complessa che richiede differenti fasi di studio e di approfondimento.

In una prima analisi, data la difficoltà che si incontra nel valutare i tempi di ritorno degli eventi franosi, ci si limita alla previsione spaziale della franosità, stimando, sulla base del tipo di dissesto, delle notizie disponibili (qualora siano disponibili) e dall'analisi multitemporale delle serie di foto aeree che interessano l'area, una frequenza presumibile.

Di fatto, in tal modo si sostituisce il concetto di pericolosità con quello di suscettività, ovvero di propensione al dissesto franoso del territorio esaminato. Tale studio della propensione al dissesto è mirato all'elaborazione di una carta dove l'informazione ha carattere non più discontinuo e generalmente puntuale, ma dotato di continuità di informazione in cui il territorio risulta suddiviso in aree caratterizzate da differenti gradi di suscettibilità al dissesto. Su tale carta saranno quindi rappresentate non solo le aree ed i punti di frana, ma anche le aree finora mai interessate da fenomeni franosi, e che, sulla base delle analisi effettuate, risultano probabili siti di innesco di tali fenomeni.

Per valutare la suscettività da frana di un territorio, dunque, ci si basa innanzitutto su un'accurata analisi volta alla comprensione di tutte le possibili cause di innesco delle frane. Una volta individuati i fattori causali delle frane rilevate si estende l'analisi a tutta l'area in esame e le porzioni di territorio che risultano caratterizzate dalle medesime condizioni ambientali riscontrate nelle aree in frana vengono considerate potenzialmente instabili.

In questo modo devono essere valutati come elementi discriminanti, al fine della perimetrazione della pericolosità da frana, tutte quelle peculiarità del territorio (fattori climatici, antropici, geologici, etc.) riconosciute nelle aree dissestate come responsabili dirette o indirette degli eventi franosi.

Da quanto detto si evince che la prima base di informazioni necessaria per affrontare un'analisi di pericolosità da frana consista in una carta della distribuzione dei fenomeni franosi sul territorio, quanto più aggiornata, dettagliata (in termini di informazioni alfanumeriche e di posizionamento geografico) e completa possibile.

Da qui si è costruita una prima carta della pericolosità (secondo il metodo BUWAL) che costituisce l'informazione di partenza di un primo tentativo di

redazione di una carta di sintesi di suscettibilità alla franosità che ha seguito le seguenti fasi operative:

1. realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi nel territorio provinciale;
2. predisposizione di una carta di pericolosità;
3. preparazione di carte tematiche per i parametri fisici del territorio che sono ritenuti;
direttamente o indirettamente, correlati con l'instabilità dei versanti;
4. valutazione del contributo di ogni parametro all'instabilità del versante;
5. classificazione della regione di studio in domini di diverso grado di suscettività da frana.

La predisposizione della cartografia di pericolosità ha inizialmente richiesto l'allestimento di un nuovo data base, interattivo con le piattaforme GIS più comuni, che implementasse tutti i dati raccolti e che potesse consentire, per il futuro, modifiche, adattamenti, miglioramenti e aggiornamenti, anche in relazione alle esigenze dell'Amministrazione Provinciale.

Le fasi di lavoro che hanno portato alla realizzazione di una nuova carta della pericolosità da frana vengono di seguito sinteticamente elencate:

1. ricerca di tutta la documentazione disponibile, relativa alle fonti bibliografiche, alla documentazione, ai data base esistenti e agli archivi cartacei;
2. omogeneizzazione tipologica dei dissesti secondo la classificazione di Cruden e Varnes (1996);
3. revisione critica dei dati disponibili;
4. redazione, per ogni singolo dissesto aggiunto alla banca dati esistente, di un record sintetico in cui vengono riportati i principali parametri di catalogazione dei fenomeni;
5. definizione, per ciascun dissesto, del livello di pericolosità, in relazione soprattutto al comportamento cinematico e ai parametri geologico-tecnici, in particolare di velocità di movimento e frequenza probabile;
6. redazione di un unico data base relazionale contenente tutte le informazioni raccolte;
7. georeferenziazione di tutti i dissesti censiti e delimitazione, quando disponibile, dell'area coinvolta dal dissesto;

8. predisposizione di un progetto ArcView, che costituisce lo strumento grafico-numerico per la georeferenziazione dei dissesti e la rappresentazione dei diversi attributi presente nel data base.

E' necessario sottolineare il fatto che il livello di analisi generale non si può considerare omogeneo, soprattutto per la diversità delle fonti disponibili. Le notizie a disposizione, infatti, provengono originariamente da diverse tipologie di fonti, sopralluoghi diretti sul terreno, archivi pubblici, relazioni e pubblicazioni (principalmente dalla redazione del catalogo IFFI). È evidente quindi che l'attendibilità e l'accuratezza delle notizie è assai diversa e dipende dal documento disponibile. In alcuni casi si avranno notizie complete e attendibili, in altri solo una generica descrizione del fenomeno di dissesto che a volte non consente neppure di definirne con sufficiente accuratezza l'ubicazione. Ciò vale, in particolare, per i fenomeni segnalati lungo tratti di strada, per l'impossibilità di definire con esattezza la località d'accadimento e per le possibili variazioni di tracciato avvenute nell'arco di questo secolo.

Infine, proprio per la tipologia dei documenti a disposizione possono riscontrarsi ripetizioni di notizie riferite allo stesso evento.

Da ciò risulta necessaria, in un futuro, un riletture critica di tutti i fenomeni franosi, nonché la predisposizione di una cartografia geologica di dettaglio opportunamente omogeneizzata e reinterpretata globalmente, dell'intero territorio provinciale, al fine di approntare una carta di sintesi di sufficiente accuratezza ed attendibilità da poter poi essere utilizzata quale utile strumento di pianificazione territoriale.

Quindi, l'esempio tentato nel presente lavoro di redazione di una cartografia di sintesi vuole semplicemente costituire un primo approccio metodologico per una prossima attività di caratterizzazione geologico-tecnica del territorio provinciale.

3.3.1 Carta della pericolosità da frana

Raccolta dei dati disponibili e di interesse allo scopo del lavoro

I dati necessari alla predisposizione ed all'esecuzione del lavoro sono stati acquisiti e, ove possibile, approntati in un unico sistema GIS. Si tratta in particolare dei seguenti dati:

1. di tipo cartografico: Carta Tecnica Regionale alle scale 1:5.000 e 1:10.000; cartografia geologica esistente;
2. di tipo fotografico: ortofoto degli anni 1998 e 2003; fotografie aeree relative agli anni 2001-2004 e 1991;

3. di banche dati già esistenti riguardanti i fenomeni franosi noti nel territorio provinciale;
4. dati ottenuti dalla compilazione di schede appositamente predisposte per la raccolta di informazioni dai Comuni.

Per i Comuni della Provincia è stata, infatti, approntata una scheda di richiesta di informazioni relative ai fenomeni franosi presenti nei territori di competenza, nella quale si tiene conto dei parametri significativi di interesse per lo studio; la versione definitiva della scheda viene riportata in allegato alla presente relazione.

Tale scheda, redatta in maniera semplice, richiede alcune informazioni di base riguardanti i fenomeni più recenti e/o significativi presenti nel territorio comunale. In particolare si richiede di indicare l'ubicazione, le dimensioni, la data dell'evento, il tipo di uso del suolo del territorio interessato dal fenomeno, il materiale coinvolto nel fenomeno franoso (se terra o roccia), l'eventuale presenza di ristagno d'acqua ed il coinvolgimento eventuale di strutture od infrastrutture.

La scheda così realizzata è stata inviata ufficialmente a ciascun Comune appartenente al territorio montano collinare provinciale da parte dell'Ufficio Difesa del Suolo della Provincia di Treviso. Si è, in tal modo, inteso produrre una scheda informativa finalizzata all'aggiornamento continuo della situazione territoriale relativa ai dissesti, favorendo un rapporto di collaborazione tra l'Ente Provinciale e ciascun Comune.

Confronto dei dati esistenti

I differenti data base acquisiti sono stati integrati in un unico sistema informatico al fine di agevolare il confronto tra dati eterogenei. Tali dati sono stati successivamente aggiornati con le informazioni acquisite per mezzo del censimento delle segnalazioni dei fenomeni franosi a cura dei singoli Comuni. Dall'analisi di tutti i dati disponibili è stato rilevato un certo grado di disomogeneità in termini di qualità e tipologia dell'informazione; si è così resa necessaria la predisposizione di un primo nucleo di dati direttamente confrontabili, caratterizzati da informazioni comuni.

L'analisi dei dati presenti nei data base esistenti ha messo in luce una disomogeneità anche all'interno delle informazioni presenti in ogni singola banca dati; si è, per esempio, riscontrata la presenza di più segnalazioni puntuali corrispondenti allo stesso fenomeno franoso all'interno dello stesso catalogo, relative evidentemente a più eventi di riattivazione coinvolgenti il medesimo sito

in dissesto. Per le necessità legate alle fasi successive del presente progetto, è stato quindi necessario identificare in maniera univoca ciascun fenomeno ed uniformare la qualità dell'informazione; ciò ha reso necessario un lavoro di ottimizzazione del nuovo data base costruito a partire da tutte le informazioni presenti nelle banche dati a disposizione.

Analisi fotointerpretativa

L'analisi delle foto aeree dell'area di studio è stata completata prendendo in considerazione le serie di fotografie aeree acquisite negli anni 1991 e nel periodo 2001-2004. Sono state complessivamente analizzate circa 450 fotografie aeree.

Si tratta in particolare dei seguenti voli aerei:

- .. Volo Rossi 1991;
- .. Volo Regione Veneto Treviso-Belluno 2001;
- .. Volo Regione Veneto Belluno 2003;
- .. Volo Regione Veneto Treviso Nord 2004.

L'analisi delle serie più recenti ha consentito di individuare le zone attualmente attive e di includere nella nuova banca dati fenomeni di dissesto non segnalati nelle banche dati preesistenti e che, di conseguenza, potrebbero essere sede di ulteriori studi di dettaglio allo scopo di definirne localmente il rischio connesso.

L'analisi delle serie fotografiche aeree relative all'anno 1991 ha permesso di effettuare un ulteriore controllo relativo alla presenza di eventuali ulteriori fenomeni non segnalati in precedenza, ma soprattutto ha consentito di effettuare una valutazione riguardante lo stato di attività dei fenomeni franosi già catalogati.

L'analisi stereoscopica delle serie aerofotografiche più recenti ha consentito di valutare le tendenze evolutive di alcuni fenomeni di dissesto, fornendo così informazioni parametriche utili alla redazione della carta della pericolosità realizzata applicando il metodo svizzero (BUWAL).

Si evidenzia che la soluzione alle problematiche emerse durante le operazioni di fotointerpretazione ha richiesto un notevole dispendio di tempo per la verifica e la validazione dei dati di archivio. L'analisi delle banche dati esistenti ha, in molti casi, mostrato la mancanza della perimetrazione dell'area coinvolta nel fenomeno di dissesto segnalato. Tale problematica, riconducibile presumibilmente o alle esigue dimensioni del fenomeno rispetto alla scala di lavoro o alla mancanza di informazioni riguardanti il fenomeno, ha richiesto una onerosa analisi puntuale di verifica, comunque riconducibile ad un grado di dettaglio compatibile con la scala di rappresentazione. Di conseguenza, poiché lo studio è stato finalizzato sia alla

riorganizzazione, omogeneizzazione ed aggiornamento delle informazioni relative ai dissesti, sia alla definizione del grado di pericolosità conseguente, si è cercato, ove possibile, di perimetrare le aree interessate dal fenomeno di instabilità.

Descrizione del data base

La costruzione del sistema informativo si è basata sulla raccolta, organizzazione ed omogeneizzazione dei dati provenienti dalle diverse autorità competenti nel territorio della Provincia di Treviso. In particolare, per quanto riguarda la raccolta dei dati di archivio e storici, questi sono stati forniti dalla Regione del Veneto, Direzione difesa del Suolo; dalla Provincia di Treviso e dai Comuni della Provincia di Treviso.

I dati forniti dalla Regione del Veneto, Direzione Difesa del Suolo, si riferiscono ai fenomeni franosi della Provincia di Treviso come estrazione parziale del data base cartografico ed alfanumerico riferito al Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia).

I dati forniti dalla Provincia di Treviso si riferiscono sia a serie storiche di fenomeni franosi pubblicati dalla

Regione Veneto che a segnalazioni di fenomeni di dissesto aggiornate a cura dell'Ufficio Difesa del Suolo della Provincia di Treviso stessa.

Data base alfanumerico IFFI

I dati vengono forniti dalla Regione del Veneto, in formato shapefile. Le informazioni sono state fornite su tre livelli informativi distinti sulla base della topologia dell'informazione. In particolare i tre livelli cartografici sono distinti come punti, linee e poligoni. Una ulteriore distinzione è stata attuata nell'estrazione del livello poligoni al fine di distinguere le aree franose, dai fenomeni franosi in senso stretto.

Dati forniti dalla Provincia di Treviso.

La Provincia di Treviso, Direzione Difesa del Suolo, ha fornito due banche dati relative ai fenomeni franosi estratti in forma di foglio elettronico (excel). Nella tabella seguente si riassumono le caratteristiche dei dati forniti.

L'analisi effettuata nella fase di interpretazione delle fotografie aeree ha consentito, oltre alla verifica dei fenomeni già noti ed inclusi nelle banche dati

esistenti, l'individuazione ed il riconoscimento di fenomeni franosi non ancora noti o segnalati.

Complessivamente, l'analisi fotointerpretativa ha consentito di individuare 20 nuovi fenomeni di dissesto e di perimetrare un totale di 34 aree interessate da fenomeni nuovi o già segnalati.

Nel caso di 5 punti (4 nel Comune di Valdobbiadene ed 1 nel Comune di Crespano del Grappa) si tratta di segnalazioni presumibilmente già note, ma la cui localizzazione non era segnalata in maniera esatta. Si è ritenuto, comunque, di procedere ad una nuova segnalazione piuttosto che ad una correzione del data base di partenza, allo scopo di mantenere integro il dato di origine.

Dei 20 fenomeni segnalati, 13 sono stati rilevati a partire dalle fotografie aeree del 1991, mentre i restanti 7 fenomeni sono molto recenti, individuati nelle sole fotografie aeree della serie 2001-2004.

Per quanto riguarda la tipologia dei fenomeni individuati, si tratta prevalentemente (13 casi) di fenomeni di scivolamento (tipologia 2 nel catalogo IFFI), per 5 casi di colamento rapido (tipologia 5 nel catalogo IFFI) e per i restanti 2 casi di fenomeni di crollo (tipologia 1 nel data base IFFI).

Raccolta delle segnalazioni dai Comuni

Come illustrato in precedenza, i Comuni localizzati nella zona montana e collinare del territorio provinciale di Treviso sono stati invitati a compilare una scheda di raccolta dati che consentisse di raccogliere informazioni relative ai fenomeni di maggior interesse presenti sul territorio e ad individuare eventuali fenomeni non ancora segnalati.

Tale richiesta ha avuto una risposta parziale; dei circa 30 Comuni interpellati, alla data del presente rapporto le risposte giunte alla sede dell'Ufficio Difesa del Suolo della Provincia di Treviso sono state 6.

Riassumendo, le segnalazioni provenienti dai Comuni riguardano prevalentemente fenomeni già noti oppure fenomeni relativamente recenti ma di piccole dimensioni, legati prevalentemente a dissesti che hanno coinvolto la sede stradale.

Verifica di campagna

La verifica di campagna è stata effettuata mediante sopralluoghi in alcuni siti ritenuti significativi ai fini della validazione del riconoscimento stereofotografico effettuato sulle serie di immagini aeree disponibili.

Considerato l'elevato numero di fenomeni di dissesto riportati nei data base esistenti, si è ritenuto di effettuare delle analisi di dettaglio in alcune zone campione segnalate come di particolare rilevanza. Si è scelto, quindi, di avviare una verifica in sito in aree critiche comunicate dai Comuni, sollecitati alla compilazione dei moduli appositamente predisposti, e che hanno dato risposta individuando, presumibilmente, i fenomeni di loro maggiore interesse. In base alla quantità di fenomeni segnalati, riportati nel paragrafo precedente, si è scelto di effettuare un sopralluogo nel territorio del Comune di Valdobbiadene, allo scopo di verificare l'effettiva pericolosità connessa ai fenomeni segnalati.

Dal sopralluogo si evince che tali segnalazioni si riferiscono prevalentemente a piccole aree instabili o a cedimenti della sede stradale.

Il sopralluogo effettuato nella zona di Valdobbiadene ha avuto lo scopo di identificare i fenomeni segnalati dal Comune. I siti segnalati sono stati oggetto di sopralluogo e sono state raccolte notizie utili anche all'aggiornamento del data base IFFI. Pur essendo stati segnalati fenomeni fondamentalmente di modesta entità, il sopralluogo è stato utile per la comprensione del rapporto esistente tra l'attivazione del fenomeno franoso e le caratteristiche morfologiche del territorio.

Il sopralluogo effettuato nella zona del Monte Grappa ha consentito di valutare con maggiore chiarezza alcune situazioni in cui la sola analisi eseguita attraverso lo studio delle foto aeree non consentiva una chiara e completa comprensione del fenomeno. La porzione di territorio oggetto del sopralluogo dimostrava molte aree in cui il substrato roccioso subaffiorante, costituito da una facies fittamente stratificata del Biancone, si presenta in superficie come accumuli di detrito di modesto spessore. Tali materiali, che da foto aerea appaiono di difficile interpretazione, risultano riconducibili a fenomeni di erosione superficiale e, di conseguenza, non legati a fenomeni di tipo franoso.

3.3.2 Sintesi dei dati

Metodologia di lavoro

I dati provenienti dalle varie fasi di lavoro, a partire da quelli derivanti da banche date già esistenti a quelli di nuova segnalazione e a quelli identificati mediante analisi fotogeologiche e di campagna sono stati accorpati al fine di creare un unico prodotto cartografico associato ad un unico data base.

Il sistema informativo pensato allo scopo consente di raccogliere i dati provenienti dalle varie Amministrazioni competenti nel territorio, avvalendosi anche degli strumenti e dei prodotti messi a disposizione dalla Regione Veneto,

quali la cartografia numerica e le banche dati, affinché possano essere raccolti ed utilizzati presso la Provincia di Treviso. Il semplice diagramma concettuale riportato nella seguente figura schematizza in particolare quella che dovrebbe essere la base informativa fondamentale per la Provincia al fine di essere aggiornata dalle Amministrazioni comunali ed a propria volta supportare la raccolta dati e l'aggiornamento delle banche dati della Regione Veneto.

Tale sistema informativo deve essere naturalmente supportato da un sistema integrato per la raccolta dei dati, processo che è rappresentato nella figura 70. Il diagramma concettuale del sistema informatico, così come pensato per la realizzazione del presente progetto, può essere applicato ai fini dell'aggiornamento dei dati da parte della Provincia di Treviso stessa. La possibilità di automatizzare, almeno in parte, la fase di processo di analisi e trasformazione dei dati potrebbe agevolare il lavoro di aggiornamento o integrazione dei dati attualmente disponibili.

Il lavoro di integrazione dei dati, acquisiti nella fase di applicazione del sistema informativo, viene svolto allo scopo di creare una base di immagazzinamento comune attraverso l'utilizzo di un software GIS (Geographic Information System).

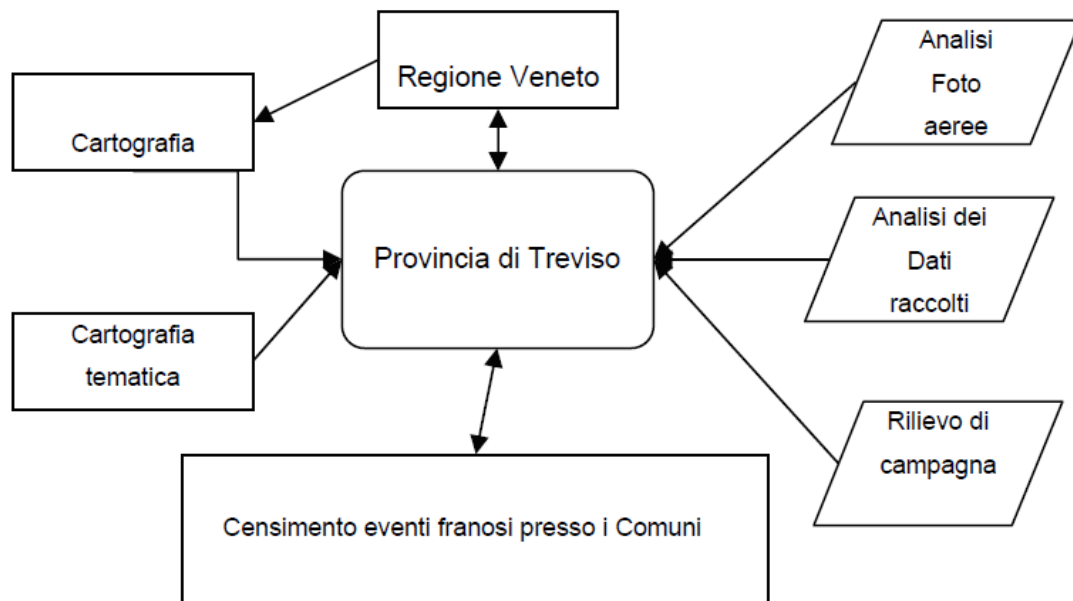


Figura 69. Diagramma concettuale del Sistema Informativo per la Provincia di Treviso.

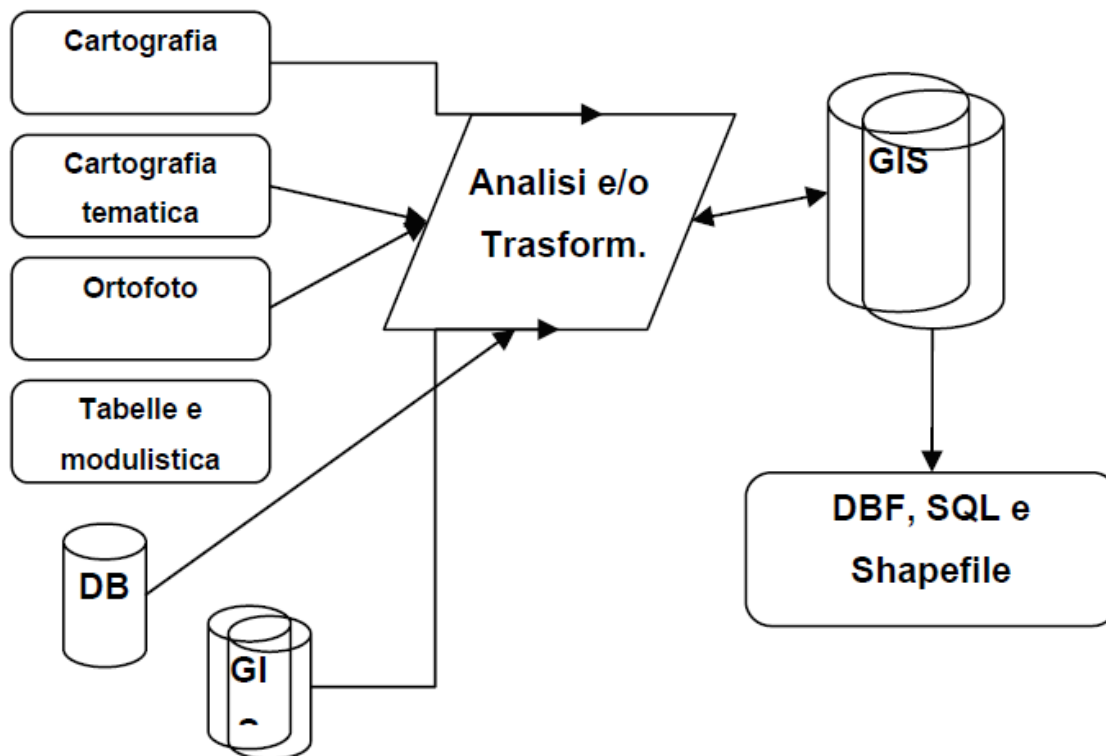


Figura 70. Diagramma concettuale del Sistema Informativo

A questo scopo è stato individuato un gruppo di classi di rappresentazione dei dati, disponibili o ricavabili, la cui definizione a "livello fisico" all'interno del Sistema Informativo Territoriale consente l'integrazione e la gestione automatizzata degli stessi. Le classi di dati sono utilizzate per il confronto dei rapporti tra gli eventi franosi (o segnalazione di eventi franosi) con la banca dati con maggior numero di eventi registrati per il territorio della provincia di Treviso (in particolare il data base IFFI). Tale banca dati viene mantenuta come termine di riferimento per la epurazione di eventi identici presenti in più banche dati simultaneamente. In figura 71 si riporta il diagramma di flusso relativo ai processi di confronto ed elaborazione dei dati individuati.

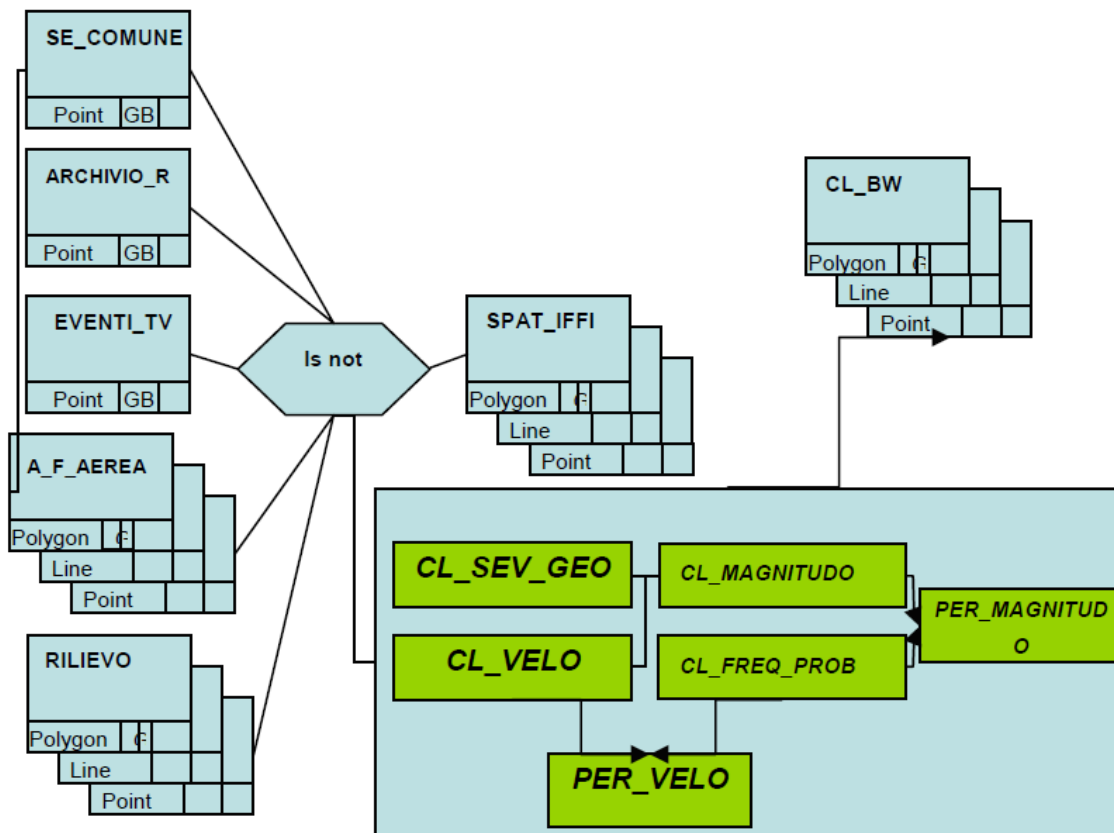


Figura 71. Diagramma di flusso del processo di classificazione dei fenomeni franosi.

Descrizione del metodo di elaborazione per la classificazione dei fenomeni franosi.

Come schematizzato nel diagramma di flusso di figura 71 tutti i dati disponibili sono stati elaborati allo scopo finale di ottenere la classificazione dei fenomeni franosi con il metodo BUWAL e l'individuazione delle aree a differente sensibilità alla franosità nell'area esaminata della Provincia di Treviso.

Esaminando il processo di elaborazione utilizzato, al centro del diagramma viene identificata l'entità denominata SPAT_IFFI. Tale entità rappresenta l'unione di tutti i dati alfanumerici e geometrici (aree e punti) costituenti la banca dati di partenza più completa tra quelle disponibili. In particolare quindi é stato scelto il

data base IFFI come banca dati di riferimento con la quale effettuare i confronti sugli altri dati.

Nell'area a sinistra del diagramma di fig. 71 vengono identificate le entità utilizzate per integrare le informazioni del data base IFFI.

In particolare sono stati utilizzati i dati forniti dalla Provincia di Treviso riguardanti un archivio di eventi franosi mantenuto a cura dell'ufficio Difesa del suolo le segnalazioni utilizzabili pervenute dai comuni oggetto del censimento e dal rilievo di campagna, i fenomeni individuati con l'analisi delle foto aeree ed i dati ricavati dalle schede archivio della Regione Veneto redatte in un periodo precedente alla realizzazione del data base IFFI.

Questo ultimo archivio di dati era parzialmente informatizzato ed é stato integrato utilizzando le schede cartacee per definire i campi necessari alla classificazione dei fenomeni col metodo BUWAL.

Tutti i dati sopra descritti sono stati utilizzati per effettuare l'elaborazione schematizzata nel diagramma di flusso di fig. 71.

Vista la forte eterogeneità nella provenienza e nelle caratteristiche dei dati, una parte dei dati non originariamente descritti nel data base IFFI risultano di fatto dei duplicati di fenomeni franosi già presenti nel data base stesso. Il processo di elaborazione, pertanto, comprende una prima fase di filtratura ed omogeneizzazione dei dati, di modo da consentire l'operatività del sistema con tutti i dati disponibili.

La prima fase di elaborazione consiste quindi nell'eliminazione dei fenomeni doppi ed é identificata nel diagramma di fig. 71 dall'esagono "is not near". Tale fase consiste in un confronto spaziale sulla posizione di tutti i punti e le aree frana disponibili, mantenendo fisse, per i motivi sopradetti, le informazioni del data base IFFI, sono stati eliminati tutti i punti delle altre banche dati ricadenti nelle aree IFFI, frane del data base IFFI a cui sia associata la delimitazione dell'area in frana ed inoltre sono stati eliminati tutti i punti ricadenti in un intorno di 50 metri rispetto alle posizioni dei fenomeni franosi identificati da un punto nel data base IFFI.

Tale criterio é stato applicato con l'assunzione logica che punti troppo vicini di banche dati differenti siano da ritenersi associati allo stesso fenomeno.

Pur riconoscendo l'arbitrarietà di tale assunzione, in particolare per quanto riguarda il raggio di esclusione di 50 metri applicato, si precisa che la struttura del sistema consente comunque di variare le condizioni di filtratura descritte essendo tale operazione eseguita successivamente all'inserimento dei dati e non al

momento di inserimento, questo criterio è rivolto alla conservazione integrale dei dati originali.

Eseguito questo confronto, sempre per esigenze di omogeneizzazione, da tutti gli elementi in ingresso al processo di attribuzione della classe di pericolosità vengono estratti un sottogruppo di colonne necessarie alla classificazione stessa.

A tale processo segue quindi l'attribuzione delle classi di pericolosità operando un incrocio tra i dati estratti allo scopo e le tabelle di definizione delle classi stesse identificate nel diagramma dai rettangoli identificati come per_velo e cl_velo.

L'incrocio dei dati secondo i criteri sopra descritti, eseguito utilizzando il linguaggio "SQL" per la gestione dei dati, consente di ottenere la classificazione dei livelli informatici corrispondenti ai punti frana, aree frana ed alle aree franose in quattro classi di pericolosità (p1,p2,p3 e p4) che nel loro insieme costituiscono l'elemento indicato come CL_BW nel diagramma di fig. 71.

Nei paragrafi successivi verranno esaminati in dettaglio i criteri utilizzati per la definizione delle classi di pericolosità.

Considerazioni statistiche

La banca dati dei fenomeni franosi della Provincia di Treviso, strutturata come descritta nel sottoparagrafo precedente, contiene un totale di 627 fenomeni di dissesto, di cui 127 sono associati ad un'area.

I fenomeni sono suddivisi nelle varie tipologie secondo il diagramma di cui si descrive la definizione comunemente assunta secondo la classificazione di Cruden e Varnes (1996):

Crolli: sono caratterizzati dal distacco di porzioni rocciose da versanti generalmente molto acclivi, spesso legati a condizioni di fratturazione intensa o particolarmente sfavorevole nella geometria del versante. Crolli ed ribaltamenti sono stati considerati come singola tipologia in quanto spesso difficilmente distinguibili.

Scorrimenti: possono essere rotazionali o traslativi e possono avere carattere profondo o superficiale.

Generalmente sono bene individuabili grazie ad indizi geomorfologici di superficie (nicchia di distacco, la zona di accumulo, ecc...).

Colamenti: il movimento varia da estremamente rapido a estremamente lento. Tra i movimenti rapidi i Debris Flows possono essere considerati tra i fenomeni di dissesto a maggiore pericolosità per l'elevata velocità e la scarsa prevedibilità.

Sono stati considerati, inoltre, i fenomeni di tipo Complesso in cui il movimento risulta dalla combinazione di due o più dei tipi principali sopra descritti.

Sono stati infine distinti gli Sprofondamenti in quanto alcune aree, per la presenza soprattutto di litotipi gessosi, sono caratterizzate da una notevole diffusione di questi fenomeni, nonché le DGPV.

Dallo studio si evidenzia (a livello provinciale) una assoluta maggioranza di fenomeni di scivolamento (404), che rappresentato il 64% del totale. I fenomeni di colamento rapido (12%) e di crollo/ribaltamento (10%), seppur molto meno rappresentati, sono presenti in quantità da segnalare. Si segnala, inoltre, la presenza di un totale di 36 aree soggette a frane diffuse (24 di tipo superficiale e 12 di crollo), che occupano circa 910 km² di superficie del territorio provinciale.

Per quanto riguarda la litologia che dà origine ai fenomeni in esame, essa è suddivisa come illustrato nel diagramma di figura 71. In particolare, si nota che la maggioranza dei fenomeni si genera nelle litologie siltitiche e argillose (28% del totale) ed arenitiche e marnose (21%). Di seguito, un numero di fenomeno notevole avviene nelle litologie relative alle formazioni geologiche cretatiche di Biancone e Scaglia Rossa (87 fenomeni equivalenti al 14%) ed alle rocce conglomeratiche terziarie (13%). La litologia dei calcari a banchi, corrispondente alle rocce giurassiche presenti mediamente alle quote più elevate, generano un numero di fenomeni più limitato (10%). I restanti fenomeni avvengono nei materiali poco coesivi di fondovalle o lungo i versanti aventi coperture di spessore importante.

Si può notare come il Comune di Vittorio Veneto contenga da solo il 24% dei fenomeni e come sia sostanzialmente il settore orientale della Provincia (Comuni di Tarzo, Sarmede, Fregona e Conegliano, oltre che al già citato Vittorio Veneto) a d essere interessato dal maggior numero di fenomeni di dissesto.

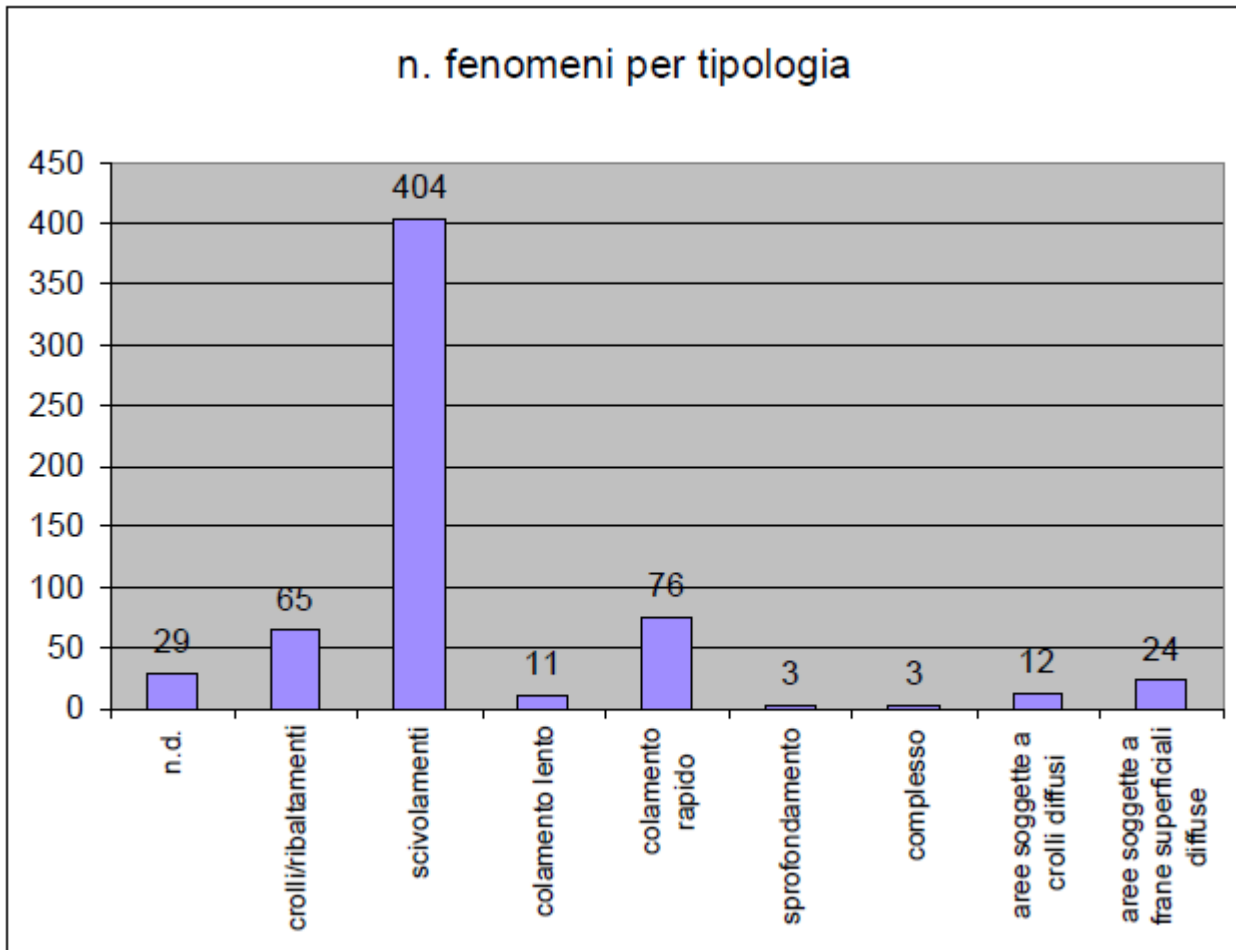


Figura 72. Numero di fenomeni franosi suddivisi per tipologia di dissesto. (n.d.: fenomeni di cui si conosce la sola posizione, ma di cui non viene segnalata la tipologia di fenomeno).

Un caso a parte è presentato dal Comune di Segusino, che mostra la presenza di ben 65 fenomeni di dissesto, localizzati prevalentemente in un'area piuttosto ristretta, situazione legata ad una particolare condizione litologica e strutturale dell'area.

Definizione delle aree di pericolosità

La procedura di valutazione della pericolosità da frana qui utilizzata fa riferimento a quanto predisposto dall'ufficio Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) della Confederazione Elvetica. Tale metodologia è coerente con quanto previsto dalla norma italiana vigente in tema di valutazione del rischio idrogeologico ed attualmente utilizzata nell'ambito delle redazioni del P.A.I. da parte delle Autorità di Bacino competenti per territorio.

Il metodo BUWAL

Il metodo BUWAL definisce la pericolosità dei fenomeni di frana attraverso la matrice di interazione tra intensità, espressa in termini di velocità e magnitudo, rispetto alla frequenza probabile stimata per le frane.

Tale metodologia prevede, quindi, che le aree identificate come aventi un certo grado di pericolosità siano esclusivamente quelle in cui sia stata accertata la presenza di un fenomeno franoso. Di conseguenza, a ciascun fenomeno franoso ed alla relativa area di pertinenza (se individuata) viene associato un grado di pericolosità determinato dal risultato del calcolo della matrice costituita dai parametri sensibili.

I parametri utilizzati nelle matrici sono i seguenti:

Intervalli di velocità: tali intervalli sono individuati considerando i valori tipici di velocità competenti alle varie tipologie di fenomeno franoso come sono classificati secondo Cruden & Varnes (1996). Gli intervalli di velocità utilizzati nella metodologia BUWAL sono 3:

Severità geometrica: tale parametro viene definito in funzione delle varie tipologie di frana: nel caso ci si trovi in presenza di frane di crollo, il parametro della severità geometrica fa riferimento alla dimensione massima dei blocchi; nel caso di frane di scorrimento e di colate, la severità geometrica viene valutata considerando lo spessore coinvolto nel movimento. Di seguito si riporta la tabella che definisce le classi di severità geometrica.

La pericolosità può essere valutata, a partire dai parametri descritti, in due differenti modi: il primo prevede l'incrocio dei dati provenienti dai parametri "intervalli di velocità" e "frequenza probabile"; il secondo prevede la definizione di un terzo parametro, chiamato "Magnitudo" e ottenuto mediante la combinazione dei parametri "severità geometrica" e "intervalli di velocità", che a sua volta viene incrociato con il parametro "frequenza probabile".

Assegnazione dei parametri

Poiché l'utilizzo delle classi di severità geometrica, previste da metodo BUWAL, per la classificazione dei fenomeni franosi implicherebbe un grado di arbitrarietà ritenuto troppo elevato, in quanto sarebbe necessaria la conoscenza di caratteristiche peculiari della frana quali la profondità della superficie di scivolamento ed i volumi di materiale coinvolto nei crolli. Non essendo disponibili dati quantitativi su tali parametri non si è ritenuto opportuno dedurli da altre informazioni note considerando tale approccio assolutamente qualitativo e soggettivo. Quindi fra i due approcci proposti nel metodo BUWAL per la valutazione della pericolosità, precedentemente descritti, si è scelto di utilizzare quello basato sui parametri “intervalli di velocità” e “frequenza probabile” in quanto costituiscono caratteristiche più correttamente associabili alle varie tipologie di dissesto.

I parametri necessari per la valutazione della pericolosità secondo il metodo BUWAL sono stati assegnati a partire dalle caratteristiche generali delle tipologie di dissesto presenti nell'area di studio.

Per quanto riguarda il parametro “intervalli di velocità”, i valori sono stati assegnati sulla base delle velocità tipiche relative alle varie tipologie di dissesto riportate in bibliografia (CRUDEN & VARNES, 1996) nel modo seguente:

intervallo di velocità 1: fenomeni di colamento lento (codice 4 nel catalogo IFFI);

intervallo di velocità 2: scivolamenti rotazionali/traslativi, sprofondamenti e fenomeni complessi (rispettivamente codice 2, 6 e 7 nel catalogo IFFI);

intervallo di velocità 3: fenomeni di crollo/ribaltamento e fenomeni di colamento rapido (rispettivamente codice 1 e 5 nel catalogo IFFI).

Per quanto riguarda il parametro “frequenza probabile”, la classe comprendente i fenomeni attivi e ad alta frequenza corrispondente a valori di frequenza 1-30 anni è stata assegnata a tutti quei fenomeni di cui si conosca un evento avvenuto entro gli ultimi 30 anni (dal 1976). Per quei fenomeni di cui non siano noti eventi multipli e che abbiano una data precedente è stata invece assegnata la classe dedotta dalla sola segnalazione.

Nell'attribuzione del parametro “frequenza probabile” inoltre è stato scelto di mantenere un approccio cautelativo. In particolare per quanto riguarda i dati del data base IFFI, la parte alfanumerica dello stesso prevede l'assegnazione al fenomeno di una data certa, nel caso essa sia conosciuta, oppure di un intervallo temporale anno min - anno max nel caso la data non sia certa. Nei casi in cui

fosse disponibile la data certa, questa è stata usata per l'attribuzione della classe di frequenza, nei casi in cui questa non fosse disponibile è stato utilizzato il valore di "anno max"; nel caso in cui il dato anno max non fosse disponibile è stato utilizzato il valore "anno min".

Nei casi in cui i dati disponibili non fossero sufficienti ad individuare le classi di velocità e frequenza probabile, nei termini e con i criteri sopra descritti, ai relativi fenomeni non è stata attribuita alcuna classe di pericolosità.

Il criterio descritto sopra non è stato seguito in alcuni casi particolari, illustrati di seguito.

L'area del comune di Segusino è, infatti, caratterizzata da una densità di fenomeni franosi superiore alla media. Molti di questi fenomeni, sebbene individuati nella posizione, mancano dei dati necessari all'attribuzione di una classe di pericolosità (data evento). Considerata la particolare criticità dell'area, e sempre seguendo un approccio cautelativo, è stata attribuita ai fenomeni correlati ad una stessa particolare condizione geomorfologica una data arbitraria corrispondente all'anno 2000, utilizzata per la classificazione dei dissesti.

Nel caso delle "Aree franose" il problema della classificazione è risultato anche più complesso, non essendo disponibile né una classificazione certa della tipologia di frana, né una data univoca. Il criterio seguito si è quindi basato sul consueto principio di massima cautela, attribuendo a queste aree la classe corrispondente al fenomeno avente classe di pericolosità maggiore tra quelli contenuti nella stessa area franosa.

Risultati

Nelle seguenti tabelle si riporta una statistica sui risultati dell'elaborazione distinti per classe di pericolosità, gruppo litologico, tipologia di fenomeno franoso e frequenza dei fenomeni in classe p3 e p4 per comune.

Le litologie presenti nell'area di studio sono state raggruppate secondo un criterio geologico-tecnico in 5 gruppi litologici, composti come in tab. 2.9

Tali gruppi rappresentano litologie che mostrano generalmente comportamenti geotecnico e geomeccanico comparabili.

Vengono di seguito riportati i risultati grafici dell'analisi dei rapporti fra il numero di fenomeni di frana rilevati nel territorio provinciale e la loro competente classe di pericolosità (figura 73).

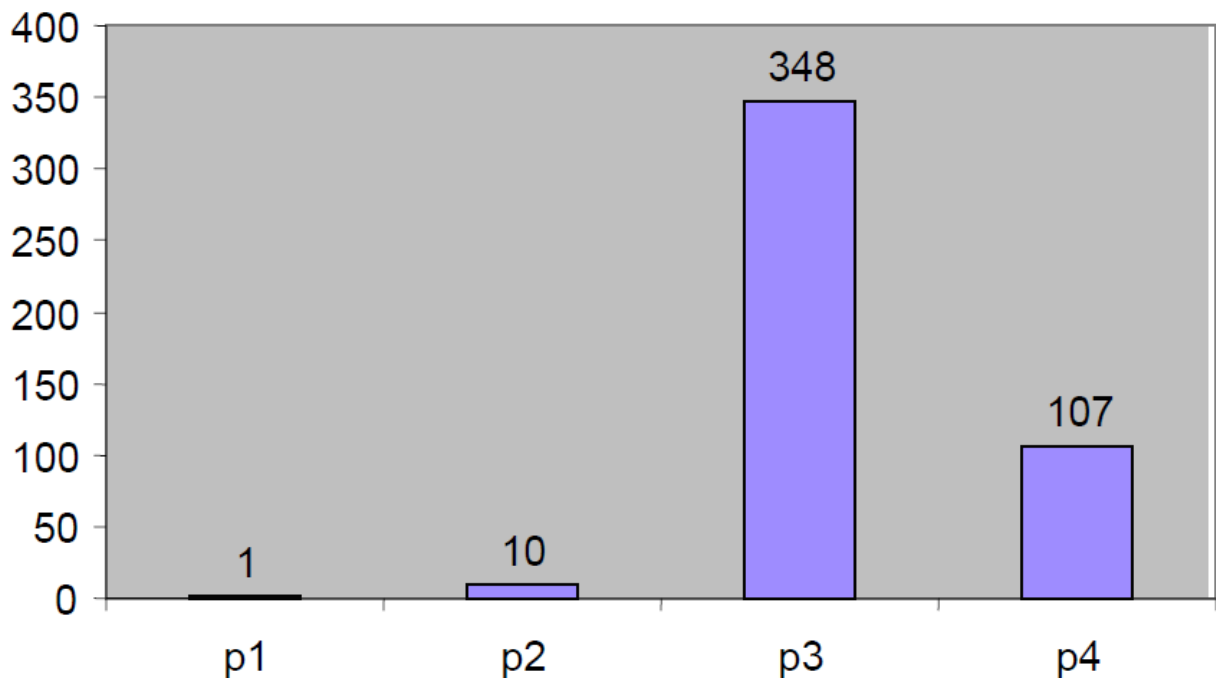


Figura 73. Nel grafico sé rappresentato il numero di fenomeni franosi suddivisi per competente classe di pericolosità

I risultati ottenuti sono stati confrontati a campione con quanto riportato nel P.A.I. (Piano di Assetto Idrogeologico), in particolare con i dati pubblicamente disponibili riferiti al solo bacino del Livenza.

É stata quindi evidenziata una sostanziale concordanza nella valutazione della pericolosità dei fenomeni franosi. Sulla base del principio di cautela utilizzato, si evidenzia l'assegnazione di classi superiori ad alcuni fenomeni di dissesto. Si sottolinea inoltre il valore aggiunto relativo al presente contributo, dovuto all'implementazione dei dati di base del P.A.I. con l'aggiornamento di nuovi fenomeni non precedentemente catalogati e l'attribuzione di una classe di pericolosità anche ai fenomeni dei quali è disponibile la sola localizzazione.

3.3.3 Analisi propedeutica alla predisposizione di una cartografia di sintesi di attitudine alla franosità

Nell'ambito del presente progetto, la Provincia di Treviso ha richiesto la realizzazione di una carta di sintesi che potesse consentire, a partire da tutti i dati

disponibili, una indicazione della suscettibilità del territorio provinciale all'insorgenza di fenomeni franosi.

Tale elaborazione, inizialmente redatta ad una scala di 1:50.000, vuole essere un primo contributo alla futura definizione di uno strumento di supporto all'utilizzo del territorio in tutte le sue forme.

Da questa iniziale valutazione a carattere qualitativo potrà essere intrapresa una successiva attività di aggiornamento, corredata da analisi di maggior dettaglio, che possa consentire di poter disporre, in un prossimo futuro, di una classificazione del territorio senza soluzione di continuità, che possa divenire strumento tecnico utile alla pianificazione territoriale.

Descrizione dei livelli informativi utilizzati

Le litologie presenti, come raggruppate secondo un criterio geologico-tecnico nei 5 gruppi litologici. Una volta eseguito il raggruppamento delle varie litologie nei 5 gruppi litologici, i fenomeni di dissesto risultano così articolati: il 50% di essi ricade nelle zone costituite da materiali coesivi (rocce arenitico-marnose e siltitico-argillose), mentre la restante quantità di fenomeni si suddivide quasi equamente tra gli altri 4 gruppi litologici.

In sintesi:

- Tipologia di fenomeni di dissesto corrispondenti al gruppo litologico 1 (calcari a banchi e dolomie): il 55% dei dissesti è costituito da fenomeni di scivolamento, coinvolgenti, presumibilmente, le coperture quaternarie; il 37% è rappresentato complessivamente da fenomeni di crollo/ribaltamento e da colamenti rapidi. Si registra la presenza di 3 aree a franamento diffuso per crollo.
- I fenomeni di dissesto che interessano litologie appartenenti al gruppo 2 (biancone e scaglia rossa): il 37% è rappresentato da fenomeni di scivolamento; il 34% è rappresentato complessivamente da fenomeni di crollo/ribaltamento e da colamenti rapidi. Si evidenzia la presenza di ben 15 aree a franamento diffuso per fenomeni di tipo superficiale e di 8 aree interessate da franamento diffuso per crollo.
- Distribuzione del numero di frane suddivise per tipologia, che interessano aree classificate come appartenenti al gruppo litologico 3 (conglomerati): il 70% è rappresentato da fenomeni di scivolamento; il 14% è rappresentato da fenomeni di crollo/ribaltamento; si segnala la presenza

di qualche colamento rapido (5) e di 3 aree a franamento diffuso per fenomeni di tipo superficiale.

- Fenomeni di dissesto che interessano aree a litologia appartenente al gruppo 4 (materiali non coesivi), sempre suddivise per tipologia di fenomeno: il 76% è rappresentato da fenomeni di scivolamento; il 18% è rappresentato da fenomeni di colamento rapido.
- Fenomeni di dissesto interessati da litologie appartenenti al gruppo 5 (materiali coesivi) in relazione al tipo di frana: il 69% è rappresentato da fenomeni di scivolamento, il 10% è rappresentato da fenomeni di colamento rapido e il 7% da crolli. Si segnala la presenza di 8 fenomeni di colamento lento, che rappresentano il 72% del totale dei fenomeni relativi a questa tipologia, e di 6 aree soggette a fenomeni diffusi di tipo superficiale.

Modello digitale del terreno (D.T.M.)

Per la produzione della carta di sintesi della sensibilità ai fenomeni franosi si è considerato necessario l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DTM). Tale necessità deriva dal fatto che con l'utilizzo del DTM è possibile produrre una serie di indicatori morfologici del territorio imprescindibili per l'analisi in questione, come ad esempio, ma non solo, la carta tematica delle pendenze e la carta tematica dell'orientazione dei versanti.

Il DTM costituisce un livello informativo di tipo raster, che consiste fondamentalmente nella suddivisione del territorio con una griglia regolare a maglia quadrata. In questo modo il territorio risulta suddiviso in singole unità fondamentali ad ogni una delle quali è possibile attribuire un determinato valore.

I livelli informativi di tipo raster risultano di fondamentale importanza nei casi in cui sia necessario descrivere, in modo continuo, la variazione di un determinato parametro quale ad esempio la quota del terreno.

Il modello del terreno utilizzato è stato generato con una unità minima con lato di cella pari a 25 metri. Tale valore è stato individuato tenendo in considerazione la scala della carta tematica finale, pari ad 1:50.000, e la qualità generale dei dati di partenza.

Sebbene nel tipo di elaborazione effettuata la risoluzione del dato sia fondamentale e, naturalmente, maggiore è la risoluzione utilizzata più fedelmente sono riprodotte le caratteristiche del territorio si ritiene che produrre dati a risoluzione maggiore di 25 metri, seppure possibile, non aggiunga alcuna reale

informazione al modello prodotto e possa anzi indurre a gravi errori di calcolo e di interpretazione.

Carta tematica della pendenza del versante

Utilizzando come dato di partenza il modello digitale del terreno descritto sopra è stata calcolata la carta tematica della pendenza del versante.

Anche in questo caso si tratta di un livello informativo di tipo raster, che descrive la variazione della pendenza, in modo continuo, attraverso i valori di pendenza attribuiti alle singole celle ancora una volta con lato di cella pari a 25 metri. Il calcolo della pendenza viene effettuato utilizzando una finestra mobile quadrata di nove celle (3x3), il valore di pendenza viene calcolato per la cella centrale sulla base delle differenze di quota delle otto celle che la circondano.

La carta delle pendenze del versante così ottenuta è stata confrontata con la posizione dei fenomeni franosi distribuiti nel territorio in esame. In questo modo è stato individuato il valore di pendenza relativo ad ogni singola frana e tale valore è stato ad essa associato. In questo modo è stato possibile effettuare una analisi statistica dei valori della pendenza dei versanti sulla posizione dei fenomeni franosi.

Tale analisi è stata condotta al fine di determinare una correlazione tra fenomeni franosi e valori della pendenza del versante.

Dall'analisi statistica tra la posizione delle frane, le caratteristiche litologiche ed i valori della pendenza del versante sono stati individuati sei intervalli di pendenza che dimostrano caratteristiche omogenee in correlazione alle variabili considerate. La carta delle pendenze a valori continui è stata quindi suddivisa in sei classi di pendenza discreti. Seguendo questi criteri è stata operata una riclassificazione della carta delle pendenze.

Giaciture degli strati

Le giaciture considerate provengono dai fogli geologici a scala 1:100.000 relativi al territorio in esame. Per esaminare l'opportunità di utilizzare il dato delle giaciture disponibili nella carta della sensibilità è stato fatto uno studio sulla distribuzione di queste rispetto alla orientazione dei versanti.

La carta della orientazione dei versanti è stata ricavata con un calcolo simile a quello effettuato per il calcolo delle pendenze. Il livello informativo raster così ottenuto è stato riclassificato in otto direzioni principali di esposizione dei versanti.

Le indicazioni di giacitura riportate non sono, però, spazialmente omogenee e non indicano con precisione il valore di pendenza degli strati; di conseguenza, il dato non risulta statisticamente significativo e non può essere esteso arbitrariamente alle aree limitrofe, se non si dispone di ulteriori informazioni anche di carattere tettonico.

Le classi di esposizione dei versanti sono state quindi confrontate con i valori di immersione delle giaciture al fine di individuare le aree a franapoggio.

La distribuzione della informazione sulle giaciture è risultata molto poco distribuita e l'informazione, da considerarsi attendibile solo per piccole aree, non è stata inserita nel calcolo finale della carta della sensibilità.

Correlazione tra dato pluviometrico e dissesti

E' stato tentato un raffronto tra il dato di densità di fenomeni di dissesto e la distribuzione delle precipitazioni medie annuali, fornita dalle stazioni ARPAV relativamente al periodo 1992-2004.

La distribuzione delle piogge segue prevalentemente le fasce altimetriche, con un'anomalia evidente nella zona tra Tarzo e Refrontolo, che presenta un elevato gradiente in aumento verso NNW dei valori medi annui di piovosità.

In corrispondenza a questa anomalia pluviometrica, probabilmente imputabile ad un effetto orografico, si evidenzia un significativo aumento della densità di fenomeni di dissesto. Tale coincidenza può comunque essere spiegata dalle particolari condizioni litologico-strutturali, che determinano una particolare instabilità dell'area. Potendo disporre delle caratteristiche peculiari delle precipitazioni quali quelle relative ai fenomeni intensi, al tipo di precipitazione ed ai livelli medi giornalieri, sarebbe possibile tentare una correlazione più robusta tra la distribuzione delle frane ed il dato pluviometrico.

La sola distribuzione delle isoiete, quindi, non consente di dimostrare una correlazione causa-effetto tra intensità di precipitazione e distribuzione ed intensità dei fenomeni franosi.

Un ulteriore confronto è stato effettuato calcolando la carta tematica della densità dei fenomeni di dissesto con i valori di piovosità media annua. La carta della densità delle frane è stata calcolata utilizzando una funzione gaussiana bidimensionale ed isotropa. Questa funzione modella la probabilità di trovare un fenomeno in uno spazio bidimensionale basandosi sulla distribuzione degli stessi.

In questo caso la possibilità di utilizzare l'informazione direttamente nel calcolo della carta della sensibilità ai fenomeni franosi è stata scartata, e stata utilizzata indirettamente per valutazioni sull'assegnazione dei pesi ai livelli informativi direttamente utilizzati per il calcolo.

3.3.4 Carta della sensibilità alla franosità

Introduzione

La carta della sensibilità alla franosità rappresenta uno strumento dinamico per la rappresentazione continua nel territorio suddividendolo in aree a cui vengono assegnati diversi livelli di sensibilità relativa. Questo tipo di carta tematica si differenzia dal più classico approccio costituito dalla produzione della carta della franosità per due motivi fondamentali. Il primo motivo è dovuto al fatto che la carta della franosità costituisce di fatto una situazione congelata al momento della redazione della stessa. Il secondo motivo risiede nel fatto che, normalmente, tale tipo di carta considera le sole zone già colpite da fenomeni franosi senza fornire alcuna informazione sul resto del territorio.

L'approccio qui utilizzato per la redazione della carta della sensibilità alla franosità si propone, invece, di valutare i parametri fondamentali preparatori e predisponenti all'insorgenza di fenomeni di dissesto legati alle caratteristiche intrinseche del territorio. In tal modo è possibile ottenere una classificazione del territorio senza soluzione di continuità, estendendo le informazioni a carattere puntuale. La risultante carta della sensibilità alla franosità costituisce un primo tentativo che deve essere considerato ancora allo stato sperimentale, migliorabile sia mediante modificazione dei pesi assegnati ai parametri considerati, sia con l'eventuale aggiunta di altri tematismi. Ad oggi non esiste, di fatto, in letteratura, una metodologia universalmente riconosciuta per effettuare questo tipo di analisi.

Definizione dei parametri

Sulla base delle analisi descritte nel paragrafo precedente, sono stati individuati i livelli informativi da utilizzare per la produzione della carta.

I livelli informativi sono dati dalla carta litologica e la carta delle pendenze. Su questi livelli è stata studiata la distribuzione dei fenomeni franosi, incrociando i dati relativi alla posizione delle frane con i valori delle carte tematiche nella medesima posizione.

Utilizzando le tabelle di analisi statistica dei paragrafi precedenti la carta tematica delle pendenze dei versanti è stata suddivisa in sei classi e queste sono

state incrociate con le cinque classi litologiche per produrre la matrice di interazione.

L'incrocio delle classi ha permesso di definire univocamente il grado di interazione tra litologia, pendenza e presenza di fenomeni franosi. I valori del grado di interazione sono stati espressi in termini di pesi, attribuiti con un intervallo da uno a quattro, dove il peso 1 indica il grado più basso di sensibilità alla franosità ed il peso 4 indica il maggiore.

Una volta definiti i pesi della matrice è stata scritta una procedura automatizzata a livello software che confronta i diversi valori di classi litologiche e di pendenza ed attribuisce il corrispondente grado di penalità.

Il risultato del calcolo ha generato la carta tematica della sensibilità alla franosità, suddividendo il territorio in quattro gradi di sensibilità relativa. Le quattro classi così definite sono state usate per la definizione di tre livelli di sensibilità, bassa sensibilità per le aree individuate con peso 1 e 2, media sensibilità per le aree con peso 3 ed alta sensibilità per le aree con peso 4

La carta di fig. 74 rappresenta un livello informativo inizialmente in formato raster e, successivamente, convertito in formato vettoriale. La caratteristica dei dati vettoriali di non diminuire la qualità grafica all'aumentare della scala può talvolta trarre in inganno l'operatore, si precisa quindi che non ha alcun senso utilizzare od esaminare il dato ad una scala superiore ad 1:50.000.

Un vantaggio di uno strumento di questo tipo è dato dalla disponibilità di una continuità spaziale dell'informazione sull'intero territorio. Le informazioni prodotte inoltre sono raccolte in un formato facilmente aggiornabile e potrà costituire, se dovutamente integrata, una evoluzione della stessa carta della pericolosità.

Il risultato finale comunque soffre della mancanza di dati fondamentali come le giaciture in quanto le informazioni ad esse relative sono state estratte dalle carte geologiche a scala 1:100.000 e sono risultate del tutto insufficienti a causa della distribuzione disomogenea e dell'esiguo numero di dati.

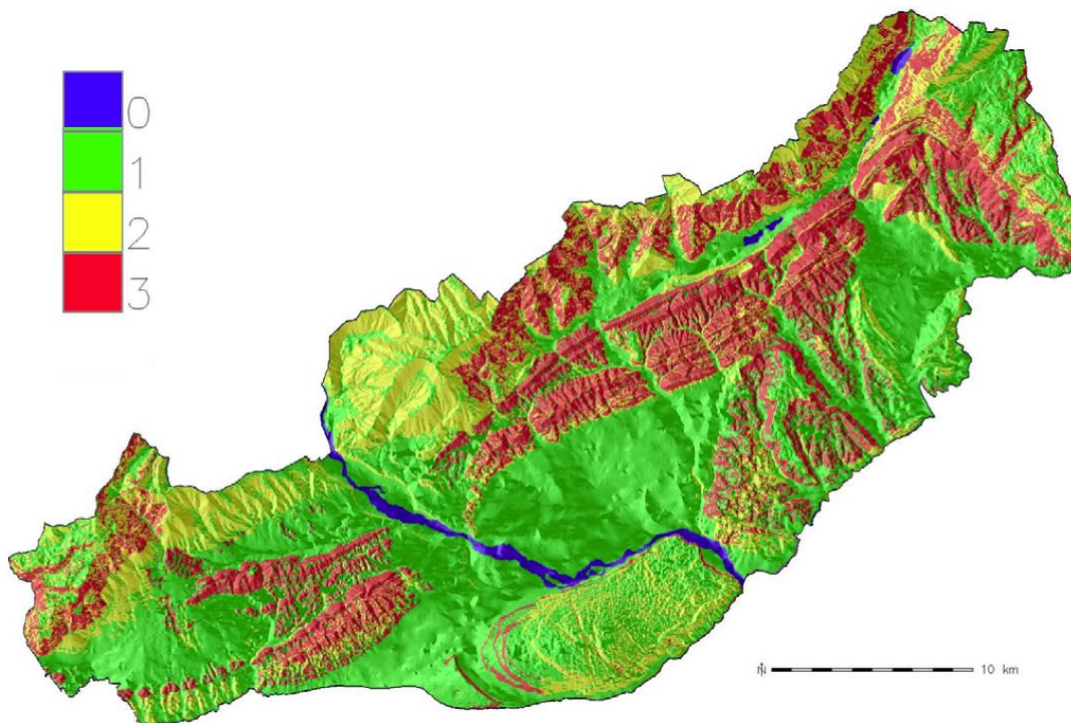


Figura 74. Carta della sensibilità alla franosità

3.3.5 Indicazioni tecniche di indagine nelle aree sensibili

Premessa

Le Norme di Attuazione (previste dal PAI), contemplano la possibilità di apportare integrazioni e varianti al Piano Stralcio per effetto di una serie di condizioni supportate da documentazione e rappresentazione cartografica idonea.

Riprendendo l'approccio gestionale adottato nella redazione del Piano di Assetto Idrogeologico, il presente documento intende fornire una guida per le indagini geologiche che soggetti pubblici o privati possono intraprendere per proporre:

- progetti nelle aree di pericolo molto elevato (P4) ed elevato (P3) da dissesti di versante;

- modifiche alla perimetrazione della carta della pericolosità da frana.

Di seguito si riportano, nel rispetto della normativa vigente in materia, distinte per tipologia di fenomeno, le attività essenziali che i soggetti proponenti ed i tecnici da questi incaricati dovranno svolgere relativamente alle indagini geognostiche s.l., al fine di presentare una documentazione (comunque coerente con gli aspetti evidenziati dal PAI) che possa pervenire ad una caratterizzazione di maggiore dettaglio di quello necessariamente limitato dalla scala di rappresentazione (1:50.000) della carta di pericolosità da frana redatta a livello provinciale.

Qualificazione delle indagini

In questa fase vengono definite le tipologie di indagine nonché i requisiti di affidabilità, di qualità e di univoca individuazione delle indagini stesse; non sono pertanto ammessi riferimenti bibliografici e/o riferimenti a studi e indagini eseguiti per altri scopi.

Le indagini geognostiche in sito ed in laboratorio da eseguirsi nelle aree a rischio devono essere redatte, ai fini della qualità, secondo la normativa vigente in materia (circolare Ministero LLPP del 16/12/1999 n. 349/STC) ed ai sensi delle norme tecniche di cui al D.M. 11.3.88 e s.m.i. In ogni caso, le indagini, dovranno essere corredate da rilievi fotografici con indicazione certa della data e luogo di esecuzione. I rilievi stratigrafici, geotecnici, sismici, piezometrici, inclinometrici e quanto altro riguardante le indagini eseguite, devono contenere indicazioni relative all'impresa esecutrice ed essere sottoscritti da un geologo, responsabile tecnico di cantiere.

La qualità e la quantità delle indagini devono ispirarsi a finalità tali da ricondurre con certezza alle ricostruzioni stratigrafiche, geotecniche e sismiche dell'intera area indagata ed alla definizione dei rapporti con le aree al contorno, definendo le perimetrazioni delle aree in dissesto o potenzialmente tali. In ogni caso le indagini geognostiche a corredo dello studio devono essere eseguite in occasione dell'incarico specifico.

Il programma delle indagini deve tener conto dei caratteri intrinseci del processo morfoevolutivo (superficie interessata, volumi mobilizzati o mobilizzabili, velocità, ecc.) e delle specificità del sito (frane storiche, caratteri pluviometrici ed idrologici, incendi boschivi, interventi antropici significativi per le condizioni di stabilità del versante, etc.).

Indagini geologiche L.S.

Le indagini geologiche che devono essere eseguite si prevede debbano riportare le seguenti informazioni, indispensabili alla redazione del progetto del possibile utilizzo del terreno:

1. natura dei terreni, evidenziando sia le descrizioni inerenti la tessitura, stratificazione e rapporti giaciture, fatturazione, alterazione e di tutti gli aspetti tecnicamente utili sotto il profilo applicativo;
2. spessore e tipologia delle coperture, ove possibile;
3. elementi strutturali significativi quali: discontinuità stratigrafiche, sistemi di faglie e fratture, ecc.
4. stato fisico dell'ammasso roccioso con descrizione: dello stato di alterazione dei complessi litologici affioranti, dello stato di fratturazione con orientazione dei principali sistemi di discontinuità, del grado di apertura delle discontinuità, della natura del riempimento delle stesse;
5. idrografia superficiale, precisando il tipo di erosione;
6. regime delle acque superficiali e sotterranee;
7. ubicazione di sorgenti, pozzi, ristagni d'acqua;
8. tipologia del movimento franoso ed eventuali elementi indicativi della sua storia;
9. avvallamenti, trincee o fessure, fratture di trazione, ondulazioni ovvero rigonfiamenti del terreno, fenomeni di erosione concentrata o accelerata, contropendenze significative ecc.;
10. rilievo delle forme e dei processi distinti per tipologia e stato di attività, perciò:
 11. processi attivi (se legati a processi in atto al momento del rilevamento o non in atto, ma ricorrenti);
 12. processi quiescenti (forme non attive al momento del rilevamento ma con oggettiva possibilità di riattivazione in quanto ancora in evoluzione nel tratto di versante considerato;
 13. processi inattivi, precisando gli eventuali interventi e opere di stabilizzazione naturale o antropica (gradonature, piantumazioni, muri di sostegno, muri a secco, gabbionate, opere di ingegneria naturalistica, ecc.);
 14. definizione geometrica e caratterizzazione di eventuali cavità sotterranee (forme di genesi antropica; forme carsiche);

15. uso del suolo, con le informazioni inerenti i principali usi del suolo (cartografia redatta dall'ARPAV).

La rappresentazione topografica del territorio dovrà essere eseguita sulla base di rilievi aerofotogrammetrici e/o rilievi a terra. La cartografia tematica dovrà essere redatta in funzione della superficie indagata alla scala 1:1.000 (o inferiore) o al massimo 1:2.000. La scala di rappresentazione prescelta dovrà evidenziare in maniera chiara ed inequivocabile gli elementi rilevati.

Tutta la cartografia di base, e quella tematica, dovrà essere estesa a superfici utili per la comprensione del fenomeno franoso, incluse le aree di alimentazione e di possibile invasione. Dovranno essere superfici sufficientemente ampie, tali da rappresentare sia il processo di frana nella sua interezza sulla base di criteri morfologici, genetici ed evolutivi, sia i rapporti tra processo franoso ed aree al contorno.

Tutte le attività comprese in questa fase dovranno essere originali e non dovranno fare riferimento a dati bibliografici e/o relazioni eseguite per altri scopi anche se correlabili con quelli oggetto di studio, utili invece per la sola fase preliminare.

Accertamenti di dettaglio

In questa fase vengono definite le tipologie di indagine nonché i requisiti di affidabilità, di qualità e di univoca individuazione delle indagini stesse, suddivise per tipologia di dissesto che interessa l'area d'indagine; non sono pertanto ammessi riferimenti bibliografici e/o riferimenti a studi e indagini eseguiti per altri scopi.

Colate rapide di fango e detriti

A) Indagini e rilievi di campagna

Questo scenario di franosità comprende colate di fango e detriti sia canalizzati (debris-mud flow incanalati) che di versante a morfologia planare (debris-mud flow areali); le indagini da svolgere dovranno comprendere:

- rilevamento geologico di affioramenti naturali e/o di trincee fino al raggiungimento del substrato roccioso per la definizione degli spessori e per la caratterizzazione stratigrafica di tutti gli accumuli di materiale detritico e residuale potenzialmente coinvolgibili in processi di innesco e trasporto di flussi detriticofangosi;
- indagine morfometrica di dettaglio ed individuazione delle possibili traiettorie percorribili da flussi di colata;

- analisi numerica di simulazione di evento considerando idrogrammi di flusso che esprimano le peggiori condizioni di evento ipotizzabili sulla base di indagini storiche e/o da evidenze morfologiche, dei massimi volumi mobilizzabili, massimizzando inoltre i valori di portata nei tratti canalizzati;
- analisi della correlazione fra eventi pluviometrici intensi ed innesco di fenomeni di colata;
- rilevamento di opere quali briglie, salti, attraversamenti, opere idrauliche e relativi accumuli sedimentari, ostruzioni d'alveo, strade, sentieri, piste ed altri interventi antropici che possono dar luogo a situazioni critiche sotto il profilo idraulico e della stabilità delle sponde e dei versanti.

B) Elaborati grafici

Gli elaborati cartografici dovranno comprendere:

- Carta delle coperture, in cui andranno rappresentati i depositi di copertura detritici e residuali (terreno vegetale, suoli sepolti, substrato alterato) distinti sulla base della loro genesi, tessitura e spessore (tarato con le indagini in situ); su tale carta vanno riportate le precedenti sezioni geologiche significative complete delle coperture, utili per la definizione di modelli evolutivi del versante.
- Carta geomorfologica di dettaglio, finalizzata alla valutazione della pericolosità, che dovrà contenere, su base topografica aggiornata e georeferenziata a curve di livello leggibili, ottenuta da rilievi a scala 1:1000 o migliore, le forme di denudazione (erosionali e/o gravitative) e di deposizione connesse all'evoluzione recente dell'area in studio, nonché indicazioni idrologiche sulle caratteristiche della eventuale presenza di acque superficiali. Andranno poi cartografate le tendenze evolutive in relazione ai processi in atto, siano essi anche del tipo quiescente o inattivo, definendo anche l'influenza della morfologia sull'idrologia superficiale e sotterranea in occasione di eventi meteorici sia normali che intensi ed eccezionali.

Andranno altresì cartografati i punti significativi e/o le opere (limite alveo-conoide, salti, attraversamenti, opere idrauliche, ostruzioni d'alveo, etc.).

In particolare va esplicitata la presenza o l'assenza dei seguenti elementi indicativi di processi morfoevolutivi:

- depositi di versante costituiti da depositi incoerenti e/o depositi eventualmente in condizioni di equilibrio limite;

- forme deposizionali legate a movimenti di massa pregressi;
- processi di creep o evidenze di instabilità di superficie;
- venute di acqua.
- Carta della proposta di ripermimetrazione della pericolosità da frana, motivata nelle variazioni proposte.
- Relazione sulle attività svolte e descritte ai punti 3 e 4, comprensiva delle analisi e delle valutazioni poste a base della proposta di ripermimetrazione.

Nel caso che la proposta di ripermimetrazione scaturisca o preveda la realizzazione di opere di bonifica e sistemazione idrogeologica, andrà predisposto anche un progetto preliminare degli interventi per la mitigazione dei fattori di pericolosità, comprendente almeno gli elaborati richiamati all'art. 18, comma 1, lettere a-b-c-d-e del DPR 554/1999 oltre al piano di manutenzione degli interventi, tenendo conto che un progetto di sistemazione idrogeologica o di bonifica andrà supportato dalla conoscenza dei processi e dei fattori che hanno innescato o che possono innescare il dissesto. Va inoltre confrontato il coefficiente di sicurezza prima e dopo l'intervento per valutare l'effettivo miglioramento delle condizioni di stabilità raggiunta.

Crolli e ribaltamenti

Sono fenomeni tipici dei versanti ripidi e/o pareti subverticali o verticali, caratterizzate da rocce lapidee e/o da depositi e successioni stratigrafiche più o meno addensate e/o coesive.

A) Indagini e rilievi di campagna

Le indagini da svolgere dovranno comprendere:

- rilievi strutturali in parete volti alla individuazione delle principali situazioni di instabilità e dei sistemi di discontinuità del versante o della falesia. I rilievi dovranno prevedere inoltre l'individuazione dei volumi rocciosi unitari e di tutti i parametri geomeccanici utili alla classificazione dell'ammasso roccioso secondo il metodo di Beniauskas, in particolare dovranno essere effettuati i rilievi dei parametri geomeccanici in situ (orientazione, spaziatura, rugosità, persistenza, resistenza a compressione, apertura, terminazione, riempimenti) ed in laboratorio (point load test); la necessità di effettuare ulteriori prove di laboratorio quali prove di resistenza trassiali e monoassiali e scatola di Hoek, verrà valutata caso per caso sulla base dell'estensione e della gravità del fenomeno franoso;

- rilievo morfometrico georeferenziato di dettaglio del versante o della falesia alla scala 1:500 con metodi laser-scanner e/o topografici tradizionali;
- rilievi fotografici e relativa ubicazione su cartografia adeguata;
- rilievo morfologico del versante o della falesia volto alla simulazione numerica dei possibili percorsi dei blocchi rocciosi che dovessero distaccarsi;
- verifiche al rotolamento mediante applicazione di analisi numerica dedicata da eseguirsi in tutte le aree critiche e censimento delle dimensioni dei blocchi distaccati dal versante dell'area di interesse, anche considerando le caratteristiche sismiche dell'area;
- installazione, ove considerata necessaria, di strumenti per il monitoraggio dei movimenti lungo le discontinuità, o nei settori dimostratisi più critici sia dall'analisi di informazioni storiche o rilevate durante le indagini eseguite ad hoc;
- analisi cinematica dei versanti e verifica di stabilità con il metodo dei cunei (o Jambu) se si tratta di rocce estremamente fratturate.

B) Elaborati grafici

Gli elaborati grafici dovranno comprendere:

Carta geolitologico-strutturale con rappresentazione delle principali discontinuità;

grafici di rappresentazione della classificazione dell'ammasso roccioso e carta della zonizzazione geomeccanica (quest'ultima necessaria qualora l'area presenti differenti caratteri lito-strutturali Carta geomorfologica; nella stessa dovranno essere altresì individuati i limiti dei settori critici di versante, indicando anche i possibili percorsi seguiti dai blocchi rocciosi, ottenuti dall'analisi numerica Carta della proposta di ripermetrazione della pericolosità da frana.

La relazione finale dovrà indicare in particolare:

- la determinazione dei parametri per la caratterizzazione meccanica dei sistemi di discontinuità (tipologia, spaziatura, orientazione, lunghezza della traccia, rugosità, eventuale riempimento) e per la classificazione degli ammassi lapidei (metodi di Romana, Beniaowsky, Hoek & Brown);
- i risultati delle verifiche di stabilità lungo le superfici di discontinuità rilevate, da eseguire preferibilmente con il metodo dell'equilibrio limite, o dei cunei (o Jambu) qualora l'ammasso roccioso si presenti molto fratturato;

- la stima dei volumi di roccia potenzialmente soggetti a crollo;
- digramma frequenza-dimensioni dei blocchi redatta sulla base del censimento dei blocchi precipitati dal versante, nonché la valutazione delle energie cinetiche, delle massime altezze di rimbalzo, la distanze massima percorsa e le traiettorie seguibili sul pendio.

Nel caso che la proposta di ripermimetrazione scaturisca dalla realizzazione di opere di bonifica e sistemazione idrogeologica, andrà predisposto anche un progetto preliminare degli interventi per la mitigazione dei fattori di pericolosità, comprendente gli elaborati richiamati all' art. 18, comma 1, lettere a-b-c-d-e del DPR 554/1999 oltre al piano di manutenzione degli interventi, tenendo conto che un progetto di sistemazione idrogeologica o di bonifica andrà supportato dalla conoscenza dei processi e dei fattori che hanno innescato o che possono innescare il dissesto. Va inoltre confrontato il coefficiente di sicurezza prima e dopo l'intervento per valutare l'effettivo miglioramento delle condizioni di stabilità raggiunta.

Fenomeni di frana roto-traslazionale (scivolamenti rotazionali e/o traslativi)

A) Indagini e rilievi di campagna

Le indagini da svolgere dovranno comprendere:

- Sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, utili per l'accertamento della successione stratigrafica nel suo complesso ed, in particolare, per il rilievo degli spessori delle coperture argillose. Vanno eseguiti in quantità opportune, proporzionate all'area da indagare, e comunque mai meno di due per aree di ridotte dimensioni (utili per la ricostruzione almeno bidimensionale del versante interessato dal dissesto). Dovrà essere riportata la lettura geologico-tecnica delle carote per l'intera lunghezza del sondaggio. Per l'individuazione della presenza di superfici critiche e determinare la localizzazione del "bedrock" stabile dovranno essere eseguiti sondaggi geoelettrici (ERT) o sismici (attivi e/o passivi, a rifrazione e/o riflessione) e/o prove penetrometriche statiche (CPT), qualora tale prova sia consentita dalle condizioni litostratigrafiche e logistiche. Va sottolineata la necessità di monitorare alcuni sondaggi mediante inclinometri e piezometri nei settori più critici. In particolare, l'istallazione di piezometri dovrà consentire (a seconda dei casi, a tubo aperto o Casagrande) il controllo del regime delle acque sotterranee, e dovrà essere in numero idoneo alla definizione dell'andamento della falda e comunque disposti lungo la stessa verticale; la scelta dei piezometri è

connessa alla natura dei terreni e ai valori attesi delle altezze piezometriche; il monitoraggio dovrà durare un intero anno.

- L'accertamento della successione stratigrafica non potrà essere in alcun modo eseguito con tecniche che non siano i carotaggi continui.
- Prelievo di campioni indisturbati di terreno da sottoporre a prove di laboratorio, e tali da caratterizzare geotecnicamente tutti i differenti strati (granulometria, peso specifico, peso di volume, contenuto d'acqua, limiti di Atterberg, coesione, attrito interno, resistenza al taglio, anche residuo, prove di compressione).
- calcolo della stabilità del versante basato sul modello ottenuto dall'analisi dei risultati di tutte le prove geologico-tecniche e geofisiche effettuate.
- Installazione di capisaldi topografici interni ed esterni alla zona instabile e di inclinometri per la misura, rispettivamente, degli spostamenti superficiali e profondi; il monitoraggio dovrà essere esteso almeno ad un intero anno, nonché installazione di un pluviometro che consenta la correlazione temporale fra precipitazioni ed eventuali movimenti.

B) Elaborati grafici

La documentazione grafica dovrà essere costituita dai seguenti elaborati:

Modello geolitologico ed idrogeologico corredato da sezioni stratigrafiche significative per la ricostruzione della superficie di scorrimento;

Carta geomorfologica con perimetrazione delle aree in frana e loro classificazione in base allo stato di attività. Andranno cartografate:

- le eventuali fratture nel terreno per trazione nella fascia topograficamente alta e/o di avvallamenti;
- le eventuali fratture per compressione nella fascia topograficamente più bassa e/o la presenza di rigonfiamenti;
- la presenza di fratture per taglio lungo i bordi;
- la presenza di aree con ristagno di acqua;
- le venute di acqua;
- l'inclinazione di alberi e/o di manufatti;
- le lesioni nelle strutture.
- la deformazione di terrazzamenti, di muri di contenimento, di sedi stradali.

L'assenza di tali effetti in risposta a processi evolutivi va dichiarata esplicitamente.

Carta della proposta di ripermetrazione della pericolosità da frana.

Relazione descrittiva delle attività svolte, comprensiva delle analisi e delle valutazioni poste a base della proposta di ripermetrazione.

La relazione finale dovrà inoltre comprendere:

- dati delle letture inclinometriche e/o piezometriche, relative ad un periodo di almeno un anno, effettuando letture anche in periodi successivi ad intensi eventi piovosi;
- verifiche di stabilità sulla base del modello geologico-tecnico determinato anche procedendo con metodi di back-analisi, qualora si disponga di dati storici di verifica.

Nel caso che dalla proposta di ripermetrazione scaturisca la realizzazione di opere di bonifica e sistemazione idrogeologica, andrà predisposto anche un progetto preliminare degli interventi per la mitigazione del rischio, comprendente almeno gli elaborati richiamati all'art. 18, comma 1, lettere a-b-c-d-e del DPR 554/1999 oltre al piano di manutenzione degli interventi, tenendo conto che un progetto di sistemazione idrogeologica o di bonifica andrà supportato dalla conoscenza dei processi e dei fattori che hanno innescato o che possono innescare il dissesto. Va inoltre confrontato il coefficiente di sicurezza prima e dopo l'intervento per valutare l'effettivo miglioramento delle condizioni di stabilità raggiunta.

Pericolosità non riconducibile a dissesti di tipologia definita

Nei casi di aree per le quali il grado di pericolosità derivi da fenomeni di frana complessi o non riconducibili direttamente alle categorie sopra considerate, le indagini necessarie alla richiesta di ripermetrazione dovranno essere eseguite in conformità a quelle competenti alla tipologia di frana più affine, in termini di comportamento ed evoluzione, mantenendo comunque valido il principio di cautela.

Predisposizione della relazione finale

I risultati di tutte le indagini geologico-tenciche acquisite e gli elaborati grafici, dovranno essere riportati in una relazione finale; a questa sarà allegata una documentazione fotografica che illustri tutte le fasi di indagine. La relazione, oltre ad essere comprensiva degli elementi come innanzi richiesto, dovrà essere redatta conformemente a quanto disposto dall'art. 27 del DPR 554/1999 (Regolamento di attuazione della legge quadro sui LL.PP. n. 109/1994 e s.m.i.), che riporta:

“La relazione geologica comprende, sulla base di specifiche indagini geologiche, la identificazione delle formazioni presenti nel sito, lo studio dei tipi litologici, della struttura e dei caratteri fisici del sottosuolo, definisce il modello geologico-tecnico del sottosuolo, illustra e caratterizza gli aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici, litotecnici e fisici nonché il conseguente livello di pericolosità geologica e il comportamento in assenza ed in presenza delle opere.”

Sulla cartografia andranno indicate le ubicazioni dei siti fotografati opportunamente numerati e facilmente individuabili nell'allegato fotografico. Vanno altresì allegati i risultati dei rilievi e delle misurazioni, da riportare su carta e sotto forma di diagrammi. Nel caso di sopralluoghi effettuati in tempi successivi, dovrà essere approntato un accurato confronto dei dati raccolti per consentire una ricostruzione precisa e puntuale della evoluzione del versante.

Per quanto attiene i sondaggi a carotaggio continuo, le cui stratigrafie andranno allegate alla relazione conclusiva, si ricorda che le carote di terreno prelevate andranno alloggiate in cassette catalogatrici e poi fotografate entro 24 ore, previo loro scortico. Le informazioni riportate sulle cassette circa il cantiere, la data di perforazione, il numero di sondaggio e di cassetta, l'intervallo di profondità carotato, ecc., dovranno essere leggibili ed incluse nelle foto; il fascicolo con le foto originali andrà allegato alla relazione, corredata dal rapporto geologico-tecnico dei tratti carotati.

Lo schema illustra il percorso che potrebbe essere seguito dalla Provincia per giungere all'aggiornamento della Carta Provinciale di suscettività alla franosità, nell'ambito di questo processo, effettua anche un confronto con la carta del dissesto del PAI, applicando norme compatibili con le prescrizioni dell'articolo 9 della Norme di attuazione del PAI.

> **3.4 I casi di Serra di Buda e San Luca**

3.4.1 Monitoraggio spostamenti Serra di Buda

Il Servizio Geologico Nazionale (ora APAT) ha realizzato negli ultimi anni il monitoraggio degli spostamenti superficiali in continuo di alcune frane con stazioni totali motorizzate. Nella presente nota sono illustrati due casi di dissesto innescatisi rispettivamente nel comune di Acri (frana di Serra di Buda-CS) per cause naturali e nella città di Roma (V.le Newton) per cause antropiche. Tali casi costituiscono esempi di applicazioni in scenari geo-

ambientali differenti. La prima rete, predisposta in collaborazione con il CNR-IRPI di Cosenza (ottobre 1999), è stata utilizzata per integrare i controlli del versante in frana al fine di consentire il transito lungo la SS 660, principale via di accesso all'abitato. Nel dicembre del 2001 è stata realizzata una seconda rete per il monitoraggio di un versante, in depositi argillosi Quaternari, al fine di verificare la stabilità delle opere di contenimento realizzate per la costruzione di un parcheggio sotterraneo nonché della porzione collinare a monte del relativo sbancamento e degli edifici limitrofi. In entrambi i casi la realizzazione delle reti di monitoraggio ed il monitoraggio stesso, con controllo in remoto della stazione totale, sono stati condotti in emergenza. Tale condizione operativa permette, qualora sussistano le necessarie condizioni logistiche, di avere in tempo reale e nell'immediato post-evento indicazioni sulle caratteristiche cinematiche del fenomeno di instabilità. Tali indicazioni, opportunamente integrate con altre tipologie di dati man mano acquisibili, forniscono un importante supporto per la gestione in emergenza di situazioni ad elevato rischio per la valutazione del rischio residuo. Successivamente alla fase di emergenza il sistema di monitoraggio può continuare a fornire dati utili per la progettazione, la realizzazione ed il controllo di interventi strutturali di stabilizzazione o, per alcune tipologie di instabilità, divenire con il supporto di un idoneo modello di analisi dei dati un intervento non strutturale [9].

Introduzione

I dissesti oggetto della presente nota costituiscono due esempi di monitoraggio in condizioni di emergenza, l'uno in ambiente montano, la frana di Serra di Buda ad Acri (CS), e l'altro in un ambito più strettamente urbano, il dissesto di Via Newton a Roma.

La frana di Serra di Buda ha rappresentato una sorta di laboratorio sperimentale per la messa a punto di un intervento operativo in un contesto tipico di emergenza di Protezione Civile.

Il sistema di monitoraggio predisposto consente la determinazione degli spostamenti superficiali del corpo di frana, grazie al controllo in remoto e gestione in tempo reale della strumentazione, e alla capacità di acquisizione in continuo dei dati con loro trasmissione ad un centro di elaborazione. Tale sistema, costituito da una strumentazione topografica servoassistita, è stato installato a partire dall'ottobre del 1999 successivamente alla segnalazione da parte della Regione Calabria di preoccupanti segni d'instabilità all'ingresso

dell'abitato di Acri (CS), lungo un tratto del versante attraversato dalla principale via di accesso al paese (SS 660).

La sperimentazione di tale sistema, in una fase di emergenza, ha permesso di valutare le potenzialità della strumentazione utilizzata e di proporre l'impiego di un analogo sistema di monitoraggio anche nel caso di un'area residenziale nella zona sud occidentale di Roma dove i dissesti, manifestatisi nell'autunno del 2001, sono riconducibili a cause antropiche a seguito dello sbancamento di un versante per la costruzione di un parcheggio sotterraneo.

In ambo i casi il sistema di monitoraggio è stato opportunamente progettato e realizzato per alloggiare la Stazione totale in un punto di osservazione ottimale rispetto al versante da controllare, in posizione adeguatamente stabile e protetta da eventuali intrusioni. Un software dedicato permette il controllo automatico delle misure con sistema polare, la memorizzazione, l'elaborazione e la visualizzazione dei dati acquisiti dalla stazione. Il software consente in particolare di organizzare il monitoraggio per diversi set di punti con scansione temporale variabile e misure multiple. Al termine di ogni ciclo di misura sono automaticamente calcolate le correzioni angolari e le p.p.m. della distanza rispetto ad un ciclo iniziale di riferimento; successivamente sono apportate le correzioni alle misure rilevate sui punti di monitoraggio e rese immediatamente visibili sul monitor della stazione remota. I dati elaborati vengono successivamente rappresentati graficamente in forma sintetica riportando, in particolare, il valore delle variazioni medie giornaliere delle tre coordinate N, E e quota.

Un computer (tipo *notebook*), residente nel medesimo edificio in cui è posizionato il geodimetro, provvede al controllo dello strumento e trasferisce i dati acquisiti al centro di elaborazione dati (Sede APAT di Via Curtatone a Roma) tramite modem GSM. Una batteria tampone entra in funzione nel caso venga meno l'alimentazione di rete.

Completano le reti un congruo numero di *target* ubicati all'interno delle aree in frana e da un minimo di quattro punti di riferimento esterni a questa.

Inquadramento geo-ambientale

I due siti presi in considerazione ricadono in contesti geologico e ambientali alquanto diversificati, l'uno caratterizzato da materiali originariamente rocciosi, ma interessati da profondi ed intensi processi di alterazione e/o degradazione, e con morfologie aspre in cui l'elemento a rischio è rappresentato dalla principale

via di collegamento tra il paese di Acri e la città di Cosenza, l'altro, diversamente, tipico di un ambito densamente urbanizzato lungo un versante debolmente acclive (dislivello di circa. 15 metri) impostato su depositi continentali prevalentemente argillosi.

Il paesaggio nel quale si inserisce la frana di Serra di Buda è tipico del dominio geologico calabro del versante occidentale del Massiccio della Sila. I termini litologici affioranti sono costituiti da unità cristallino metamorfiche paleozoiche (Unità di Polia-Copanello) coinvolte da una serie di vicissitudini tettoniche che ne hanno caratterizzato la loro edificazione in un sistema tettonico a falde di ricoprimento. Il versante coinvolto dal fenomeno, caratterizzato da un'elevata energia di rilievo correlabile al sollevamento tettonico manifestatosi nell'ultimo milione di anni, è solcato al piede dal T. Calamo ed è caratterizzato da una topografia piuttosto accidentata con pendenze che a tratti superano largamente i 30°. L'ammasso roccioso che costituisce il versante di Serra di Buda si presenta alterato in affioramento ed in profondità è caratterizzato da ampie zone completamente degradate. L'intero versante è stato ripetutamente coinvolto da numerose fenomenologie di dissesto. In occasione dell'ultimo dissesto (dicembre 1998), tipologicamente riferibile ad uno scorrimento, dopo una breve interdizione della circolazione stradale, le Autorità preposte hanno accordato il transito imponendo la presenza di un presidio permanente e affidato lo svolgimento di indagini conoscitive al CNR-IRPI di Cosenza.

La rete di monitoraggio di Acri

La rete di controllo degli spostamenti superficiali realizzata per il monitoraggio della frana di Serra di Buda è stata dunque installata nell'ottobre 1999 ed è rimasta operativa fino a luglio del 2002 (Bonci et al., 2002; Gullà et al., in corso di stampa). La rete è costituita complessivamente da 4 prismi installati in aree stabili, che forniscono ne costituiscono il datum di riferimento, e da 9 punti ubicati lungo il versante interessato dall'instabilità e lungo il tracciato della SS 660. Le condizioni logistiche ed ambientali e la necessità di proteggere la strumentazione hanno guidato la scelta di alloggiare il geodimetro sulla Torre civica del paese, posta sul versante opposto all'area indagata, ad una distanza variabile tra 700 e 1000 metri. Dopo un primo anno di acquisizione dei dati con cadenza oraria, a partire dall'ottobre del 2000 le misure sono state effettuate ad intervalli di sei ore secondo una sequenza che prevede dapprima la lettura sui

punti esterni e successivamente sul set di punti di misura.

La tipologia di monumentazione dei prismi è stata vincolata dalle caratteristiche del sito pertanto sono stati messi a punto sia prismi su pilastro e palo sia su staffa ancorata ad edifici o a muri di sostegno.

Le informazioni desunte dal monitoraggio hanno evidenziato la prosecuzione confermato il proseguire dei movimenti negli anni successivi alla fase parossistica (intervallo 2000-2002) con velocità medie variabili da valle verso monte (0,02 cm/g per il punto 1 e 0,01 cm/g per il punto 7). Per quanto concerne il modulo degli spostamenti cumulati nel periodo di monitoraggio, si può assumere che il volume instabile abbia subito complessivamente uno spostamento medio di 11cm in circa 880 giorni, con una velocità media di circa 0.01cm/giorno. Per quanto attiene, invece, la variabilità stagionale delle misure si osservano i massimi valori nel giugno del 2000 (0,08 cm/g) per poi diminuire nell'inverno successivo (0,01 cm/g) e nuovamente aumentare nella primavera del 2001 (0,04 cm/g); dal mese di giugno 2001 fino al termine del monitoraggio le velocità sembrano stabilizzarsi intorno a valori non superiori a 0,02 cm/g anche con brevi periodi di stasi (Gullà et al., in stampa-b).

Conclusioni

Le esperienze condotte sulla frana di Serra di Buda hanno consentito di mettere a punto utili indicazioni metodologiche per il monitoraggio in emergenza degli spostamenti superficiali di pendii instabili con il rilievo topografico automatizzato. E' stato possibile verificare la possibilità di approntare, in condizioni di emergenza, le due reti di monitoraggio in un arco di tempo molto breve e quindi acquisire in remoto ed in continuo misure sull'andamento degli spostamenti superficiali, in tempo quasi reale, proficuamente utilizzabili per gestire la condizione di rischio determinata dall'instabilità di pendio. La precisione raggiunta è centimetrica nel caso di Acri, ove la stazione era posizionata ad una distanza di circa 1 km dall'area in frana, mentre è millimetrica nel caso della città di Roma, dove le condizioni logistiche più favorevoli hanno permesso di installare la stazione totale ad una distanza massima di circa 150 m. In questo secondo caso tale caratteristica ha reso possibile individuare e segnalare prontamente, e con adeguata affidabilità l'aumento delle velocità di spostamento prodotto da un incremento della spinta dell'acqua a monte della paratia e seguire, in tempo reale, l'evoluzione del fenomeno a seguito dell'intervento sulla condotta idrica.

In definitiva si ritiene che i risultati conseguiti abbiano evidenziato la notevole flessibilità e semplicità operativa delle stazioni totali verificandone, quindi, la concreta utilizzabilità per la realizzazione in emergenza di reti di monitoraggio degli spostamenti superficiali di pendii instabili. I sistemi di controllo così predisposti, oltre a consentire una più razionale ed efficace gestione delle situazioni ad elevato rischio, nelle fasi successive all'emergenza possono essere proficuamente integrati in reti complessive di monitoraggio conoscitivo, per la progettazione delle necessarie misure di riduzione e mitigazione del rischio, e per alcune tipologie di instabilità concorrere alla realizzazione di interventi definitivi di monitoraggio di controllo dei fenomeni di instabilità (interventi non strutturali di riduzione e mitigazione del rischio).

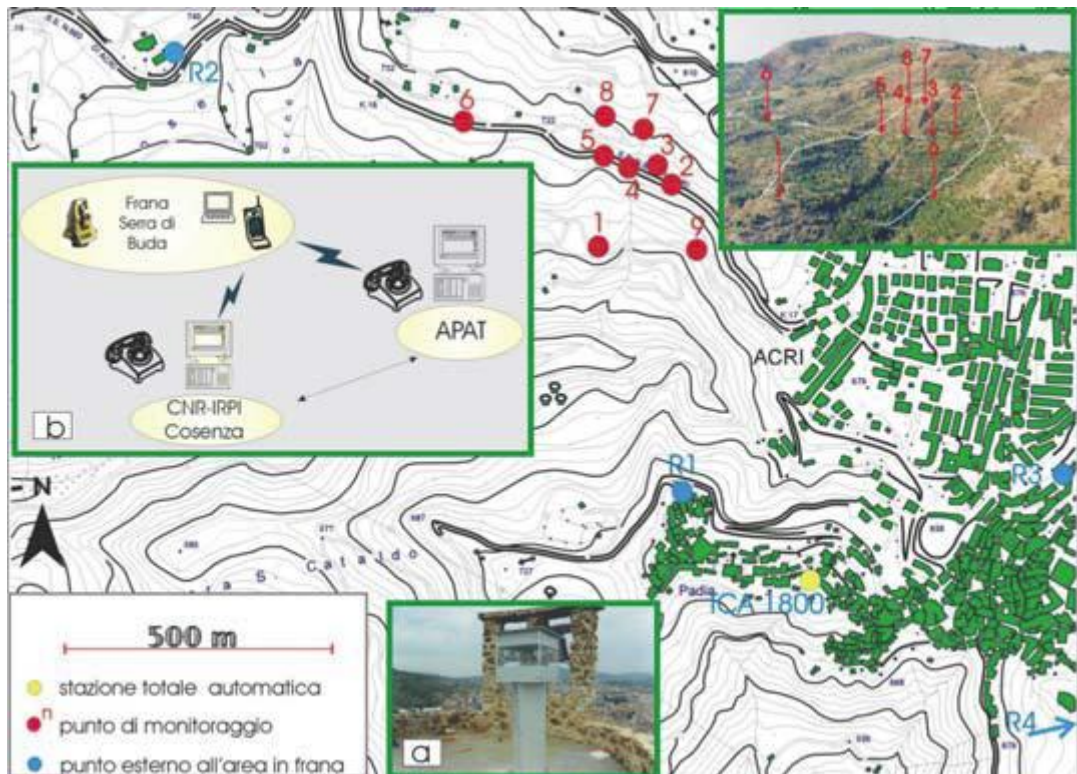


Figura 75. Rete di monitoraggio della frana di Serra di Buda (CS); a) stazione geodimetrica; b) sistema di trasmissione dei dati

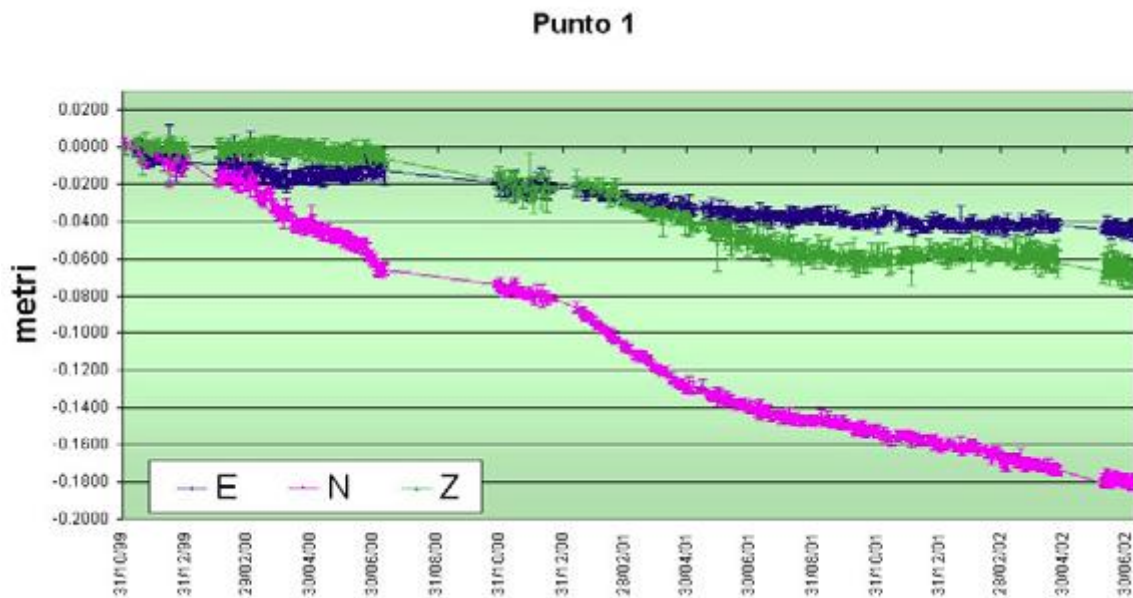


Figura 76. Rete di monitoraggio di Acri: spostamenti registrati nel punto 1 durante il periodo ottobre 1999 - luglio 2002

3.4.2 Interferometria per Acri e San Luca

Riassunto

Lo studio proposto nel presente lavoro si riferisce ai siti di Acri e San Luca, rappresentativi di due diversi contesti geologici, tipici dell'Arco Calabro. Processi morfologici ad elevata pericolosità e differenti evidenze geomorfologiche sono stati individuati nelle aree di studio.[10]

Essi sono connessi sia ai peculiari caratteri della Deformazione Gravitativa Profonda di Versante con associata la grande "frana di Serra di Buda" e numerose frane per scorrimento in prossimità dell'abitato di Acri, sia alle numerose frane roto-traslative e colate lente localizzate nel centro abitato di San Luca.

Il presente lavoro propone alcuni risultati ottenuti tramite l'applicazione di metodi geomorfologici innovativi e convenzionali, basati sull'analisi aerofotointerpretativa, dati storici e interferometria DIF-SAR. L'analisi delle foto-aeree è stata condotta a scala multitemporale tramite l'uso di fotogrammi ad elevata risoluzione. La tecnica delle immagini radar, connessa all'interferometria

differenziale (DIF-SAR), ha permesso di ottenere una serie di dati ERS SAR, con alta risoluzione ed una estesa copertura multitemporale, per analizzare e monitorare i fenomeni franosi dei versanti investigati. Le risultanze della metodologia di analisi adottata hanno testato e validato i dati Dif-Sar attraverso il confronto con metodi geomorfologici convenzionali. Il lavoro propone, infatti, i primi risultati per la stima dei vantaggi pratici e delle limitazioni di tale tecnica sperimentale applicata in aree caratteristiche di due diversi contesti geologico-evolutivi.

Introduzione

Nell'ultimo decennio l'impiego di tecniche sperimentali innovative per lo studio dei processi morfoevolutivi ha ottenuto validi risultati per il controllo e lo sviluppo del paesaggio, connesso ai differenti tipi di frane.

Lo studio di seguito proposto si riferisce ai siti di Acri e San Luca, situati rispettivamente in prossimità del margine occidentale del Massiccio della Sila e sul versante Ionico del Massiccio dell'Aspromonte. In tali aree, la presenza di una diffusa e complessa franosità ha condotto a ricerche multidisciplinari e alla messa a punto di un complesso sistema di monitoraggio. In particolare, il presente lavoro, partendo da una fase conoscitiva e di raccolta di dettagliati elementi geologici e geomorfologici sui siti in studio, propone la diagnosi e la verifica dei dati DIF-SAR, attraverso una complessa fase di analisi e sintesi dei relativi dati di output.

Quadro geologico

L'Arco Calabro è costituito da una serie di falde cristalline pre-Mesozoiche messe in posto nel Miocene inferiore (Messiniano) durante l'orogenesi alpina (Vai, 1992). In Calabria settentrionale tali falde, costituite da rocce granitiche, ofiolitiche e metamorfiche, sia di basso che di alto grado, sono sovrascorse sui terreni sedimentari della Catena appenninica; in Calabria meridionale, le unità granitiche e metamorfiche compongono i rilievi dell'Aspromonte e delle Serre.

L'abitato di Acri (600-750 m s.l.m.) è collocato in prossimità del margine occidentale della Sila Grande. In questo settore le faglie normali ad andamento N-S formano nel complesso un sistema a gradinata ribassato verso occidente, che culmina in una importante direttrice tettonica regionale. Lungo tale direttrice i litotipi cristallino metamorfici vengono sollevati e giustapposti ai depositi plio-pleistocenici, che colmano la depressione tettonica della Valle del Crati (Tansi &

Greco, 2001). L'area in esame (La Pietra et alii, 2004) è caratterizzata dalla diffusa presenza di gneiss e scisti biotitici intrusi da masse granitiche e granodioritiche (Paleozoico), appartenenti alle due Unità sovrapposte di Polia-Copanello e Monte Gariglione. Le rocce sono caratterizzate da un elevato grado di fratturazione ed alterazione. Sul basamento Paleozoico poggiano in trasgressione terreni sedimentari di età olocenica, costituiti da conglomerati fluviali antichi e conglomerati sabbiosi con sottili intercalazioni argillose, che affiorano prevalentemente nella depressione occupata dall'insediamento urbano di Acri. San Luca sorge nella parte bassa del bacino della Fiumara Bonamico. L'assetto geologico dell'area è caratterizzato da un importante contatto tettonico che abbassa il settore sud-orientale (Plio- Pleistocene). A nord-ovest del contatto affiora il Flysch di Capo d'Orlando (Miocene inferiore) su cui sorge il Centro storico, mentre a sud-est prevale la coltre alloctona delle Argille Varicolori, stratigraficamente in sovrascorrimento sul Flysch, su cui si sviluppa l'area in espansione. I depositi silico-clastici della serie miocenica sono costituiti da alternanze conglomeratico-arenacee e pelitiche, da mediamente a notevolmente cementate e fratturate. Le argille varicolori appaiono come un Mélange estremamente caoticizzato ed alterato nel quale sono collocati olistoliti e serie di sedimenti caotici clastici. Sulle argille poggiano lembi residui di un conglomerato terrazzato quaternario continentale. Al contatto tra le Argille ed il Flysch, su cui sorge parte del vecchio abitato, si individua un esteso accumulo di materiale detritico, formatosi a seguito di antichi movimenti franosi che coinvolgono il Flysch.

Caratteri geomorfologici dei siti in studio

La metodologia adottata per l'individuazione delle aree in frana si è basata sull'analisi di foto aeree a diversa scala nominale da 1:33.000 (Volo IGM 1954/55 e 1990-95) a 1:18.000 (Volo SCAME 1979-81) e 1:15.000 (Volo Calabria CGR 2001), sulla raccolta di informazioni dirette ed indirette e su un puntuale rilevamento geomorfologico di verifica.

Il territorio di Acri costituisce un ambiente in cui il modellamento del rilievo avviene mediante processi gravitativi di ampie proporzioni, a causa dell'elevata energia di rilievo, della topografia estremamente accidentata, con pendenze che superano largamente i 30°, e delle scarse proprietà meccaniche delle rocce affioranti. La maggior parte di tali processi tende a riattivarsi in concomitanza di eventi meteorici particolarmente intensi e/o prolungati o in caso di sollecitazioni

sismiche. Tali fenomeni coinvolgono le aree adiacenti il centro abitato e, in particolare, interessano le località Padia - San Cataldo, Calvario-Serra di Buda ed il Vallone San Leonardo, zone più rappresentative della franosità del territorio di Aciri sia per la tipologia che per l'attività dei fenomeni di instabilità presenti.

La frana complessa di Padia è da ricondurre ad uno scorrimento, a prevalente componente rotazionale, interessato alla base da fenomeni di crollo per lo scalzamento operato dal Torrente Calamo. Si tratta di un fenomeno piuttosto profondo che interessa tutto il versante. Il fenomeno franoso che si sviluppa lungo l'intero Vallone S. Leonardo è riconducibile nel suo insieme ad uno scorrimento, con componente traslativa predominante, in continua evoluzione. Attualmente l'attività si concentra prevalentemente nella zona di corona con scorrimenti superficiali di materiale detritico che alimenta una conoide nel fondovalle del T. Mucone.

Lungo il versante in destra orografica del Torrente Calamo è presente un importante fenomeno deformativo profondo (DGPV) a cui si associa una diffusa franosità. Fra i diversi fenomeni associati, è stato individuato un movimento profondo noto come "frana di Serra di Buda". Il fenomeno franoso è riconducibile, nel suo insieme, ad uno scorrimento con predominante componente traslativa. Le manifestazioni più evidenti del movimento si hanno sia nella porzione di monte della frana, sia nella fascia posta a minor quota. Nel settore di monte si rilevano, per circa 200 m, deformazioni e fratture in continuo sviluppo lungo l'importante asse viario costituito dalla S.S. 660, nonché alcune scarpate e nicchie di distacco. La parte inferiore del versante, in corrispondenza di una più accentuata pendenza del rilievo, è interessata, invece, da almeno due fenomeni franosi tipo crollo. La parte mediana è caratterizzata da morfologie sub-pianeggianti, che in alcuni casi corrispondono a terrazzi di frana talora in contropendenza.

L'assetto orografico dell'abitato di S. Luca è caratterizzato da due grandi settori con differenti lineamenti morfologici, separati da una zona di raccordo costituita dai depositi di frana. Si individua un settore a morfologia aspra (230-400 m s.l.m.), a nord del centro storico, caratterizzato da un'elevata energia di rilievo, da versanti acclivi (100%) solcati da valli strette e profonde, ed un settore collinare a sud-est, dove si sviluppa il nuovo centro abitato, con morfologia blanda (15%). Il primo settore è interessato da fenomeni franosi in roccia, quiescenti ed attivi. Le tipologie di movimento sono da ricondurre essenzialmente a crolli e/o scorrimenti roto-traslativi nei depositi sedimentari miocenici, con successiva canalizzazione del detrito, e a scorrimenti più o meno superficiali, che

interessano la coltre detritica della zona di raccordo. Questi ultimi sono ubicati prevalentemente lungo la zona del cimitero ed il lato sudovest del vecchio centro abitato. Riguardo all'abitato, i rilievi condotti, grazie anche alle analisi dei danni su alcuni edifici e all'esistenza di numerose fratture, indicano un meccanismo di rottura per scorrimento tendenzialmente con distacchi successivi ed in arretramento, con forte azione di richiamo verso monte. Il secondo settore è caratterizzato, invece, da un dissesto diffuso in cui si hanno in prevalenza fenomeni di scorrimento rotazionale e/o traslazionale evolventi a luoghi in colate lente. Questi sono in gran parte attivi ed in alcuni tratti la distinzione dei singoli corpi di frana è difficile per il ripetersi ed il sovrapporsi di fenomeni di dissesto ed interventi antropici. I margini di tale settore formano, spesso, ripidi gradini nei depositi conglomeratici miocenici che retrocedono per crollo e/o scorrimento per arretramento dei movimenti in massa nelle sottostanti argille, come avviene per i fenomeni franosi in località Carosello e Martorano. Relativamente a quest'ultimo, è stato individuato un esteso fenomeno principale a cui è associato un fenomeno secondario; entrambi sono attivi sin dal 1954, sebbene all'epoca, lungo la porzione destra della corona del fenomeno principale siano state posizionate delle gabbionate. A seguito dell'evento alluvionale del 1972, è stato realizzato un muro su pali a valle della corona principale, che ad oggi sembra aver favorito definitivamente la sua stabilizzazione a monte. Una ripresa dell'attività deformativa si localizza, invece, lungo il fianco destro del fenomeno principale ed in corrispondenza di quello secondario. Analoghi interventi sono stati condotti in località Calvario e Carosello. Nonostante la presenza di opere di mitigazione, le evidenze morfologiche e gli indicatori cinematici mostrano il notevole impatto da parte dei movimenti in massa ubicati nelle tre suddette località sull'abitato.

Interferometria DIF-SAR

La tecnica dell'interferometria differenziale (DIF-SAR) "classica" consiste nella realizzazione di un interferogramma (mappa della differenza di fase) da una coppia di acquisizioni SAR e nella successiva traduzione di questo in una "mappa" completa degli spostamenti. Tale tecnica si basa sui seguenti principi di base. La differenza di fase tra due immagini SAR complesse della scena in esame, acquisite dalla stessa posizione in tempi differenti, contiene due termini legati, rispettivamente, alla topografia e allo spostamento del suolo. Al fine di isolare il contributo relativo allo spostamento avvenuto tra i due istanti di acquisizione, la componente topografica viene stimata per mezzo di un DEM

(mappa numerica di elevazione) o di una coppia interferometrica tandem (intervallo temporale fra le due acquisizioni tale da poter assumere spostamento nullo).

L'accuratezza del risultato è strettamente legata alla qualità del DEM, alla precisione dei dati orbitali e alla condizione di utilizzare coppie interferometriche con baseline ridotte (differenza fra le posizioni dei sensori durante le due acquisizioni). Tanto è minore la baseline tanto più il contributo topografico è ridotto ed al limite per baseline nulla si osserva il solo spostamento. La geometria di osservazione di un SAR è caratterizzata da due assi principali: la direzione di volo e quella di vista. In particolare sui sensori montati sui satelliti ERS 1-2 queste due direzioni sono ortogonali (geometria zero-Doppler) e, inoltre, la direzione di vista presenta un'inclinazione media di 23° rispetto al nadir. L'oggetto della misura interferometrica è lo spostamento misurato lungo la linea di vista del sensore radar. Il segno positivo della misura interferometrica indica un allontanamento. Nel caso di aree piane, invece la misura si discosta di meno del 10% dal valore del movimento verticale.

Attraverso una catena completa di processamento per l'interferometria differenziale messa a punto dall'Agenzia Telespazio, sono state ottenute una serie di dati ERS SAR, con alta risoluzione ed una estesa copertura multi-temporale, permettendo di avere mappe di spostamento e di velocità lungo la linea vista. Oltre alla misura interferometrica, Telespazio ha fornito una sua possibile interpretazione come spostamento lungo la linea di massima pendenza (*slope*), per mezzo di un coefficiente legato all'angolo formato tra la direzione di vista del sensore e quella di massima pendenza del terreno. La scalatura è stata effettuata solo per terreni con pendenze superiori a 4° assumendo, invece, che la direzione di movimento dominante fosse quella verticale per terreni con pendenze inferiori. Sono stati inoltre mascherati i punti per cui l'angolo formato fra la direzione di vista e quella di massima pendenza fosse compresa fra 78° e 102° , in quanto le due direzioni sono quasi ortogonali e non è quindi possibile determinare lo spostamento lungo la massima pendenza a partire dalla misura lungo la linea di vista del sensore. La misura di spostamento effettuata con la tecnica DIFSAR è in ogni caso relativa.

Relativamente al criterio temporale, non si è andato oltre il 2001 per problemi d'acquisizione del satellite ERS-2. Le scene totali acquisite ed elaborate sono 77, rispettivamente 38 per San Luca e 39 per Acri. Per analizzare l'evoluzione

temporale degli spostamenti è stato necessario scegliere un insieme opportuno di coppie interferometriche, selezionando quelle con migliore coerenza.

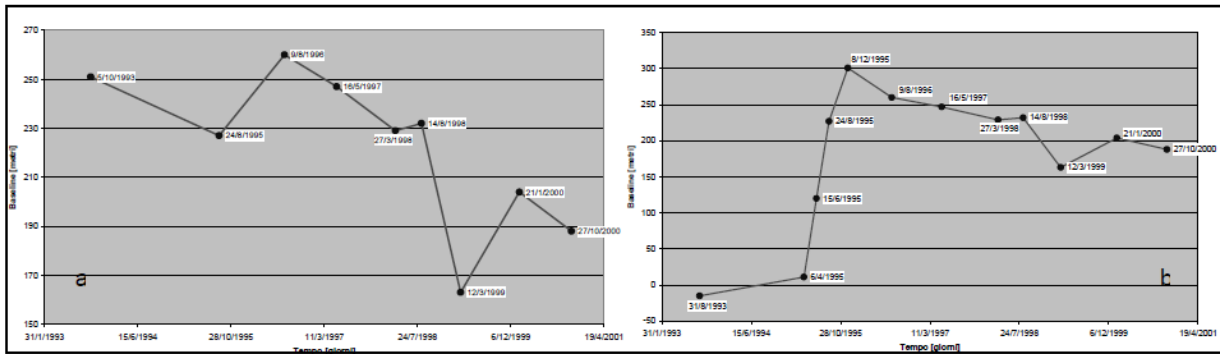


Figura 77. Coppie interferometriche utilizzate: a) San Luca; b) Acri.

Discussione dati

Dall'analisi fotointerpretativa e dei dati storici è emersa una condizione di attività dei dissesti siti in località Martorano, Calvario e Carosello già a partire dal 1954. Tale stato è ancora ben riconoscibile tramite l'analisi del volo 1978, in cui si individuano anche elementi morfologici in merito al dissesto sito nella parte sud-ovest dell'abitato e di crollo da Pietra Saracena, attivatisi a seguito dell'evento alluvionale del 1972-1973. Il procedere dell'analisi da fotointerpretazione ha evidenziato una perdita della significatività delle evidenze morfologiche per i dissesti in studio, ad eccezione di quelli siti in località Carosello e Martorano, ben riconoscibili fino al 2001. In tali siti, infatti, l'assenza e/o la parziale influenza antropica tendono a non mascherare o alterare i processi morfoevolutivi in atto.

Relativamente al fenomeno del vecchio centro abitato, sebbene di difficile individuazione tramite fotointerpretazione per l'intensa urbanizzazione dell'area, i dati di output dell'analisi DIF-SAR (lungo la linea vista) hanno confermato i dati storici ed i rilevamenti in situ. Si tratta di un fenomeno che mostra una distribuzione e valori delle deformazioni disomogenei all'interno dell'area in frana, connessi sicuramente alla presenza di diverse scarpate e ad uno stile successivo. Tale assetto è confermato da un generale arretramento dell'area in deformazione che, dalla porzione medio-bassa del versante (concentrazione delle deformazioni nel periodo 1993-1997) si propaga verso monte fino ad una ripresa dell'attività della scarpata principale (deformazioni di circa 1 cm a partire dal 1998).

Complessivamente, sono stati registrati un più alto tasso di deformazione tra il 1997 ed il 1998, che procede in modo costante fino al 2000, nonché maggiori deformazioni lungo il fianco destro e nella porzione mediobassa, lungo le scarpate secondarie.

Le mappe di deformazioni e velocità slope (1993-2000) hanno indicato un'attività concentrata in corrispondenza del fianco destro e nel medio-basso corpo di frana. Relativamente ai complessi fenomeni di Carosello e Martorano è stata verificata una congruenza dei dati ottenuti dai diversi approcci di analisi. In loc. Martorano, il fenomeno principale presenta a partire dal 1997-1998 deformazioni lungo il suo lato destro (scarpata e fianco) con un tasso tendenzialmente costante. Secondo l'interpretazione slope, esse arrivano fino a 6,5 cm.

L'attività deformativa, che mostra un rallentamento a fine 2000, tende ad aumentare progressivamente verso la porzione centrale dell'area in frana, probabilmente perché influenzata dal fenomeno secondario di colata superficiale ad essa associato. Analoghi risultati, sia sull'entità delle velocità che delle deformazioni, sono stati ottenuti anche per quest'ultimo. Sebbene si registri un tasso di deformazione costante a partire dal 1998, i massimi valori delle deformazione si hanno nel 1997-1998 e a fine 2000.

Quest'ultimo dato costituirebbe un effetto degli eventi alluvionali del settembre 2000. Lungo la linea di massima pendenza si registrano deformazioni ben distribuite in tutta l'area in frana.

Le mappe lungo la linea di vista in loc. Carosello hanno dato informazioni solo sull'area del coronamento, in particolare lungo il lato sinistro. Nonostante qualche picco di deformazione già tra il 1997-1998, deformazioni tollerabili si hanno in realtà nell'arco temporale 1999-2000. Analogamente, le deformazioni slope risultano concentrate lungo il coronamento.

I località Calvario, la tecnica DIF-SAR ha fornito dati confrontabili con le numerose segnalazioni in merito ad una ripresa dell'attività dei fenomeni (Archivio ABR, 2001). In corrispondenza del fenomeno più esteso sono state osservate deformazioni concentrate principalmente lungo il fianco destro (già a partire dal 1996) e nella parte medio alta del corpo di frana, a ridosso delle opere di mitigazione.

Dati ammissibili sul quadro deformativo complessivo si hanno a partire dall'arco temporale 1997-1998 come confermano i valori di deformazione massima registrati; le velocità di deformazione da 5mm/anno (1996- 1998)

arrivano a 10 mm/anno (1998/2000). Con l'avanzare del tempo (1998-2000) è stato osservato anche un progressivo coinvolgimento della zona di scarpata e corona di frana con velocità di circa 5 mm/anno.

Relativamente al fenomeno di colata superficiale di minori dimensioni, le mappe hanno evidenziato deformazioni nella zona del coronamento, con un forte richiamo a monte. Sebbene si registrino picchi di deformazione di circa 1 cm nel periodo 1997 - 1998, i dati di output evidenziano un'inconfutabile attività deformativa a partire dal 1998 - 1999, con velocità di deformazione di 7,5 mm/anno nell'arco temporale 1998 - 2000. Il trend deformativo cresce costantemente verso la fine del 2000 e potrebbe essere associato agli effetti degli eventi alluvionali del 2000. Le mappe slope in località Calvario non hanno dato risultati a causa dei problemi geometrici di acquisizione di cui sopra.

Relativamente ai dissesti siti nell'abitato di Acri, dati storici e soprattutto da fotointerpretazione indicano la sostanziale continua attività dello scorrimento che si sviluppa lungo il Vallone San Leonardo. Per tale frana infatti, più che di fasi parossistiche intervallate da periodi di stasi, si tratta di una maggiore o minore intensità delle stesse. Lo stato di attività del fenomeno viene confermato anche dai dati interferometrici che mostrano deformazioni concentrate lungo la zona di coronamento e tendenzialmente costanti nel periodo 1996-2000, con picchi nel 1998 e a fine 2000. Analogamente, le deformazioni slope risultano concentrate lungo il coronamento e nella porzione centrale dell'area in faran. Per quanto riguarda, invece, la frana di Padia-San Cataldo, occorre sottolineare che tanto l'analisi fotointerpretativa che l'esame delle fonti bibliografiche evidenziano una sostanziale attività della stessa nel corso degli anni, con particolare intensificazione tra la fine del 1998 ed il 2001. I fenomeni di riattivazione si concentrano particolarmente in prossimità della corona con scarpata principale quasi subverticale. Tali riattivazioni si concretizzano con lo scivolamento del materiale detritico ed il crollo di blocchi litoidi; esse sono anche testimoniate dalla presenza di blocchi rocciosi pericolanti, da vistosi abbassamenti (qualche decina di cm nell'arco di 2-3 mesi) di una sede viaria comunale, da lesioni ed evidenti fratture sulle abitazioni lambite dalla frana, nonché dal progressivo danneggiamento (1999) e rottura (2001) di alcune opere di consolidamento. L'analisi interferometrica, invece, non produce per questo fenomeno dati significativi. Ciò a causa di alcuni dei requisiti di base necessari per il processamento DIF-SAR, quali la geometria di acquisizione e la copertura boschiva. Solo nell'arco temporale 1997-2000 si registrano tracce di spostamento (0.2 cm) lungo

la fascia di potenziale influenza a monte dell'area in frana, con picchi di 0,4 cm nel 2000.

In merito all'attività della DGPV, le mappe di spostamento lungo la linea vista mostrano deformazioni a partire dal 1998 e nell'arco temporale 1999-2000; esse sono localizzate nella zona a monte della complessa area in deformazione (settore NE) dove i dati-slope risultano maggiori di 7,5 cm a fine 2000. Circa la franosità associata alla DGPV non si hanno dati per il loro elevato tasso deformativo. Tuttavia, relativamente alla "frana di Serra di Buda", le mappe di spostamento hanno fornito dati solo nell'area posta a monte del dissesto, associate al forte detensionamento indotto per la riattivazione della grande frana.

L'assenza di segnali all'interno di quest'ultima, sia lungo la linea vista che slope (no data > 13 mm/anno; Tab.1), è consequenziale alla mancanza di coerenza delle coppie interferometriche per la notevole velocità di trasformazione e deformazione della stessa, come evidenziano le segnalazioni ed i dati raccolti nell'arco temporale 1998-2000, consolidati dall'attività di monitoraggio successiva (ABR 2001; La Pietra et alii, 2005). Lungo la fascia di detensionamento, le deformazioni registrate lungo la linea di vista indicano che nei punti di maggior ampiezza il tasso di movimento osservato si aggira sui 2 cm in due anni con velocità di 5mm/anno (1998-2000). La stessa area è interessata, per un periodo di circa 1 anno (1998), da un'accelerazione del movimento, poi stabilizzatosi su velocità relativamente minori.

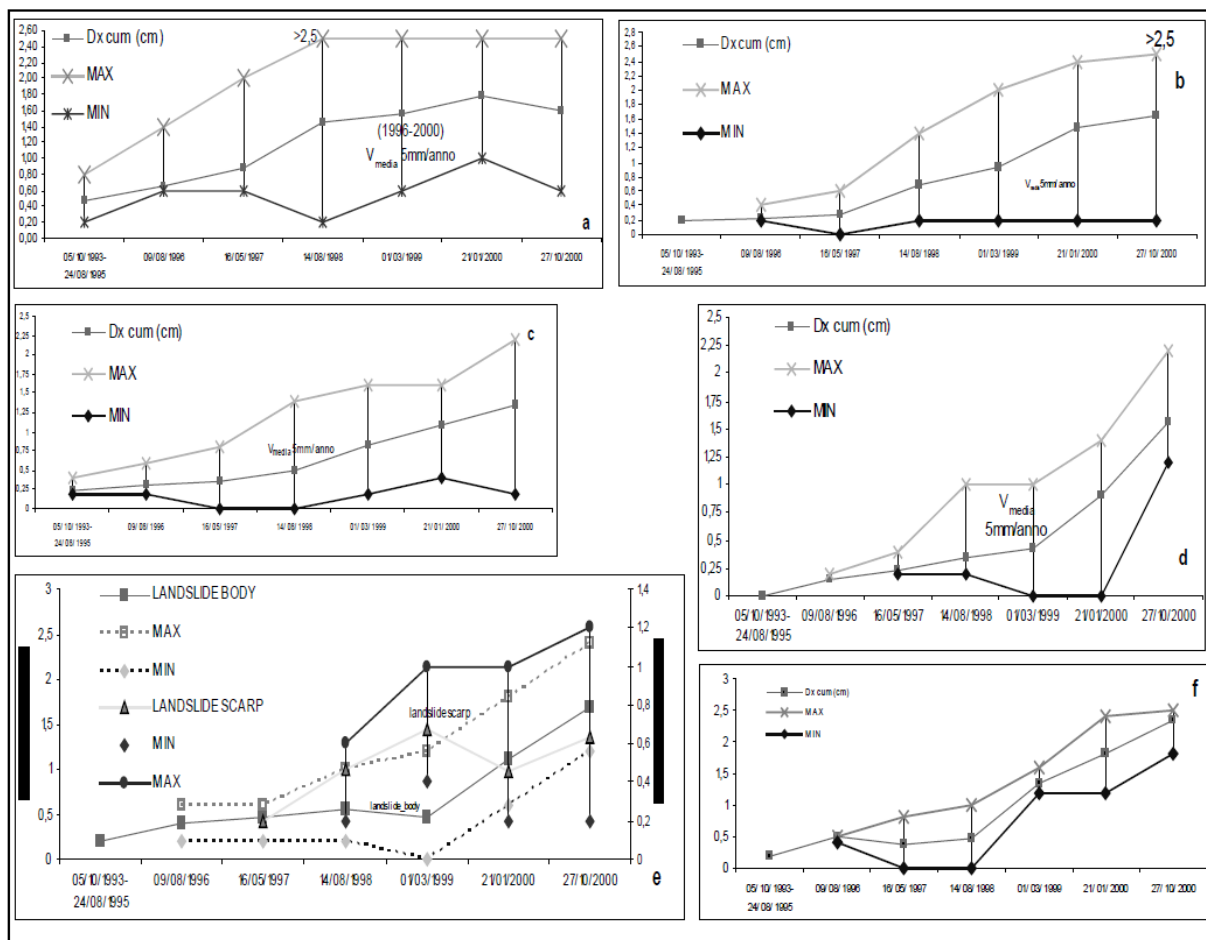


Figura 78. San Luca: dati di output lungo la linea vista; i valori di deformazione sono cumulati a partire dalla prima acquisizione (1993).

Conclusioni

Definito lo scenario morfoevolutivo dei siti in studio attraverso l'analisi di fonti dirette ed indirette, la complessità dei dati DIF-SAR ha evidenziato alcuni limiti connessi sia ai concetti base di acquisizione (presenza di vegetazione, acquisizione dati tramite le sole orbite discendenti, mancanza di superfici riflettenti, ecc.) come nel caso della frana di Padia-S. Cataldo, sia alla presenza di movimenti estremamente veloci in cui il tasso di deformazione influenza

negativamente la coerenza delle scene, come verificato nel caso della "frana di Serra di Buda" (velocità >13mm/anno).

Altrove, invece, in condizioni al contorno favorevoli, i risultati DIF-SAR ottenuti hanno consentito di condurre un'analisi storica dei dissesti, attraverso indicazioni, puntuali e complessive, circa la recente evoluzione spaziotemporale dei movimenti analizzati; tutto ciò ottemperando, contestualmente, al monitoraggio degli stessi. In particolare, in caso di acquisizioni temporali ampie sono state ottenute informazioni principalmente sui movimenti lenti, come per le colate o scorrimento-colate di S. Luca; i movimenti più pronunciati, come nel complesso fenomeno del centro storico di S. Luca o nella fascia di detensionamento a monte di Serra di Buda, sono stati registrati grazie alle acquisizioni temporali ristrette. Sebbene si tratti in entrambi i casi di misure relative, dove sono rispettati i requisiti di base e geometrici per l'acquisizione delle scene, i dati di output lungo la linea di massima pendenza confermano il trend deformativo quantificato lungo la linea vista, anche se raggiungono valori relativamente maggiori.

Al tempo stesso, le elaborazioni interferometri che condotte, integrate sempre e comunque da un approccio multidisciplinare e da un monitoraggio geotecnico, possono fornire un valido contributo sia per validare le ipotesi circa la morfodinamica dei versanti sia per la costruzione di modelli geologico-evolutivi degli stessi.

4. DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE FUNZIONALI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO FRANE

In riferimento all'attività 2.2.2 per la valutazione dell'applicabilità di SWAN per lo studio e il monitoraggio dell'evoluzione dei fenomeni franosi, le attività di ricerca possono riassumersi nei seguenti punti:

1. Definizione delle specifiche funzionali del sistema di monitoraggio frane, meglio spiegata nel prosieguo del paragrafo.
2. Studio del paper sul modello a automi cellulari SCIDDICA-SS₃ (M.V Avolio et al. SCIDDICA-SS3: A New Cellular Automata Model for Simulating Fast Moving Landslides WORLDCOMP '12 The 2012 World Congress in Computer Science Computer Engineering and Applied Computing (Las Vegas, Nevada, USA, 16-19 Luglio 21012) sviluppato dall'Università della Calabria (UniCal) ai fini della individuazione della

configurazione del sistema di monitoraggio SWAN attraverso un modello evolutivo del versante (in collaborazione con UniCal). Lo scopo è creare un dialogo tra sistema sperimentale e modello in cui il sistema riceve dal modello, che genera dati relativi all'area, direzione di propagazione frana, distribuzione dei depositi, velocità, spessore della frana, i valori dei parametri di configurazione, mentre fornisce al modello dati sperimentali circa il pattern spaziale degli spostamenti superficiali che servono a calibrare/validare il modello.

3. Identificazione delle differenze funzionali del sistema inclinometrico SWAN rispetto al sistema ottico sviluppato da UniCal nell'ambito dell'OR2 del progetto Early Warning (WP 2.4) puntando l'attenzione sul fatto che l'alta sensibilità del sistema ottico di UniCal consente il monitoraggio anche di frane caratterizzate da movimenti estremamente piccoli non rilevabili dal sistema SWAN (siamo infatti a sensibilità inferiori al millesimo di grado per il sistema ottico e il centesimo di grado per il sistema SWAN)
4. Identificazione delle specifiche funzionali di comunicazione dati e informazioni tra il sistema di monitoraggio frane SWAN e il CAED (Centro Acquisizione ed Elaborazione Dati) del progetto Early Warning, secondo lo schema per cui il sistema SWAN svolge in autonomia le operazioni di elaborazione dati fino alla individuazione di condizioni di criticità/allarme, in corrispondenza delle quali apre la possibilità al CAED di intervenire sulla configurazione di acquisizione del sistema (aumentandone ad es la frequenza di acquisizione per infittire il pattern di dati in corrispondenza dell'evento critico) e di accedere ai dati grezzi in modo da elaborarli e gestirli indipendentemente.
5. Identificazione della tipologia di dati complementari a quelli inclinometrici utili a rafforzarne e completarne il contenuto informativo al fine di completare il contenuto informativo proprio del dato inclinometrico.

Per quanto concerne il primo punto, dal punto di vista del progettista di un sistema di monitoraggio di rilievi franosi, è necessario identificare i valori di alcuni parametri base del rilievo franoso al fine di identificare le specifiche del sistema di monitoraggio da realizzare. È, infatti, dalla combinazione incrociata di tali parametri con talune caratteristiche generali del monitoraggio quali:

- la finalità del monitoraggio, ovvero se l'obiettivo è monitorare l'evoluzione del rilievo franoso oppure monitorare e segnalare situazioni di criticità o allarme più o meno imminente;

- la definizione della configurazione dinamica del versante che ne definisce l'evoluzione e/o condizioni di criticità o allarme;
 - la tempistica secondo cui gli allarmi debbono essere attivati
- che si fissano le caratteristiche funzionali e quindi strumentali, hardware e software, di un sistema di monitoraggio.

I parametri fondamentali di un rilievo franoso che determinano le specifiche di un sistema di monitoraggio frane sono stati individuati in:

- Estensione e posizione
Servono a definire l'estensione del sistema di monitoraggio e, quindi, il numero di sensori necessari, che a sua volta concorre a determinare il costo. Quest'ultimo parametro è ovviamente funzione anche della densità con cui vanno distribuiti i punti misura come pure della distribuzione spaziale della densità stessa, entrambi dati che dipendono da altre caratteristiche del rilievo franoso, quale la distribuzione spaziale della probabilità di frana.
- Profondità di frana
È il parametro che determina sia il tipo di grandezze da misurare, quindi i sensori e la profondità del punto misura nonché la sua configurazione entro il terreno.
- Cinematica
La velocità di evoluzione e di movimento della frana determina sia il tipo di monitoraggio, sia talune specifiche della sensoristica. Infatti una cinematica lenta imporrà un protocollo di monitoraggio differente rispetto a una veloce in termini di frequenza di acquisizione, di durata dell'acquisizione, di elaborazione ed interpretazione del dato. Analogamente nel primo caso ci si avvarrà di sensori dalle prestazioni di sensibilità spiccate, laddove nel secondo saranno curate le prestazioni in termini di tempo di risposta.
- Presenza e tipo di vegetazione
Specie nei sistemi di monitoraggio di tipo rete wireless, la presenza e la tipologia di vegetazione è un parametro che influenza fortemente le prestazioni del sistema in termini di efficienza di comunicazione, agendo da elemento attenuatore del segnale e imponendo, di conseguenza, talora, una rivisitazione della logica di rete in termini di capacità di autoriconfigurazione.
- Direzionalità della frana

Il fatto che una frana possa svilupparsi preferenzialmente lungo una certa direzione piuttosto che altre induce a orientare la progettazione del sistema di riferimento in modo da attivare sistemi di elaborazione dei dati che tengano conto di tale dipendenza sia in termini di interpretazione del dato che, di conseguenza, di attivazione degli allarmi.

- Distribuzione spaziale delle caratteristiche del rilievo
Analogamente al punto precedente, l'informazione geotecnica/geofisica circa le zone del rilievo che sono maggiormente interessate da fenomeni franosi e secondo certe direzioni, indirizza la progettazione del sistema e la sua realizzazione nella direzione di una definizione differenziata di taluni parametri del sistema, quali la densità e la distribuzione spaziale dei punti misura, la frequenza di acquisizione, etc.
- Parametri da cui dipendono i fenomeni di innesco (neve, gelo/disgelo, pioggia, presenza di acqua nel terreno (piano di slittamento), etc...)
Individuati tali parametri, diventa indispensabile associare una loro misura alle misure del sistema di monitoraggio e correlare i due tipi di misura sia al fine di settare i parametri di acquisizione del sistema di monitoraggio in funzione delle misure dei parametri di innesco, sia al fine di correlare le due fenomenologie annesse.
- Livello e tipo di antropizzazione della regione circostante
Determina soprattutto il tipo di allarme che deve essere previsto, ovvero se debba essere immediato, se debba essere correlato a una situazione di allerta o di pericolo imminente; il che, di conseguenza, determina anche la finalità di monitoraggio e quindi le modalità dello stesso.

A valle di tale inquadramento dei parametri di un rilievo franoso, che servisse come strumento per delineare gli ambiti e i limiti di applicabilità di un sistema di monitoraggio, si sono potute elencare le caratteristiche di un sistema di monitoraggio degli spostamenti su rilievi franosi da specificare

- Grandezza/e da monitorare (spostamenti, deformazioni, accelerazioni, etc...)
- Profondità del punto misura
- Specifiche del sensore
 - Sensibilità
 - Risoluzione
 - Portata
- Specifiche di acquisizione

- Durata dell'acquisizione
- Frequenza di campionamento
- Frequenza di acquisizione
- Trigger su evento
- Numero e distribuzione spaziale dei punti misura
 - Densità
 - Distribuzione della densità
- Modalità/finalità allarme
- Integrazione dati complementari inerenti i parametri di innesco (neve, gelo/disgelo, pioggia, presenza di acqua nel terreno (piano di slittamento), etc...)

L'insieme di questi parametri è stato impiegato per la redazione di una scheda sintetica di specifica per ciascuno dei sistemi di monitoraggio da sviluppare nell'ambito dell'OR2, in cui sono stati inseriti i valori dei corrispettivi parametri per il sistema inclinometrico SWAN.

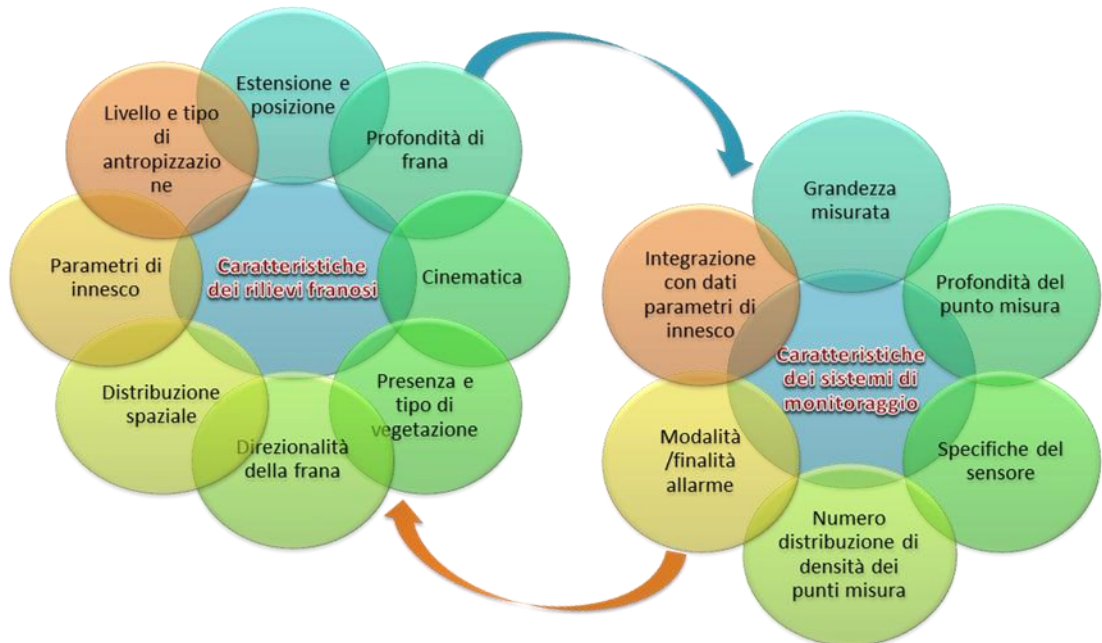


Figura 79. Schema delle relazioni tra le caratteristiche del sistema di monitoraggio e le caratteristiche del rilievo franoso

> 4.1 Identificazione differenze funzionali sistema inclinometrico SWAN- sistema ottico UniCal

Da un confronto col sistema ottico sviluppato da UniCal nell'ambito dell'OR2 del progetto Early Warning (WP 2.4) si è focalizzata l'attenzione sul fatto che l'alta sensibilità del sistema ottico di UniCal consente il monitoraggio anche di frane caratterizzate da movimenti estremamente piccoli non rilevabili dal sistema SWAN (siamo infatti a sensibilità inferiori al millesimo di grado per il sistema ottico e il centesimo di grado per il sistema SWAN)

> 4.2 Definizione della tipologia di dati complementari a quelli inclinometrici utili allo scopo di monitoraggio dell'evoluzione

Una prospettiva efficace ed economica per la mitigazione dei rischi da fenomeni d'instabilità meteoindotti a cinematisimo rapido è l'allertamento tempestivo, auspicabile soprattutto per infrastrutture a sviluppo lineare considerevole, laddove l'estensione dei pendii interagenti con l'infrastruttura è tale da rendere impraticabile interventi di tipo strutturale. I sistemi di allerta attualmente implementati si basano sostanzialmente sul monitoraggio delle precipitazioni, ovvero della principale variabile fisica "causa" del fenomeno d'instabilità. Ma è possibile immaginare un allertamento basato, oltre che sulle precipitazioni, anche sul monitoraggio di variabili fisiche "effetto", nella convinzione che la maggiore articolazione del sistema rappresenti la strada verso una maggiore accuratezza e affidabilità della previsione. Le precipitazioni totali sono il primo anello di una catena che può causare il collasso del pendio e che contiene, in sequenza, i volumi d'acqua assorbiti, gli incrementi di pressione della fase liquida contenuta nei pori, le deformazioni di tipo distorsionale. Queste ultime, prima ancora della rottura, danno luogo a spostamenti paralleli al pendio e variabili con la profondità che possono essere misurati a mezzo di inclinometri. Il sistema di allertamento si propone di costruire la previsione dell'incipiente instabilità interpretando il monitoraggio di "cause" ed "effetti" e puntando sulla misura di tutte le grandezze fisiche della catena appena menzionata. A tale scopo il sistema di allertamento dovrebbe essere orientate sul monitoraggio delle inclinazioni interne a coltri superficiali e sul monitoraggio dei volumi di precipitazione assorbita, del contenuto d'acqua e della pressione della fase

liquida nel terreno. Attività di ricerca collaterali si stanno sviluppando in tal senso al di fuori degli obiettivi del presente progetto.

> **4.3 Sviluppo di un modello evolutivo del versante per il setting della configurazione del sistema di monitoraggio per il confronto numerico-sperimentale**

Nell'intento di sviluppare un modello interpretativo dei dati sperimentali, in particolare nella determinazione di livelli di soglia di allarme e/o di preallarme dei dati inclinometrici, e di avere indicazioni su aspetti relativi al pattern di installazione, quali:

- numero di nodi sensori;
- distribuzione spaziale;
- densità minima;
- identificazione di zone a maggiore densità di punti misura;
- identificazione di direzioni privilegiate di misura dell'inclinazione;

sulla base dei dati di modellazione (OR4) o di analisi di scenario (OR1) e, al contempo, comprendere quali informazioni utili alla modellazione stessa siano disponibili dal sistema di monitoraggio inclinometrico SWAN, si è proceduto allo studio delle caratteristiche base del modellazione di tipo puntuale (OR4).

Tale modello puntuale è costituito da un modulo idrogeologico e uno geotecnico in cascata, dove quest'ultimo, al livello II, richiede la misura di una serie di grandezze per la quale si dà indicazione della strumentazione per il WP2.1 (inclinometri di profondità, celle di pressione, tensiometri, piezometri, sonde TDR).

Come già per la definizione delle soglie di allerta/allarme, si è considerato che il dialogo tra i dati sperimentali di monitoraggio degli spostamenti superficiali e il modello puntuale potrà avere luogo in sede di sperimentazione dove sarà possibile anche valutare, sulla base delle evidenze sperimentali, in che misura, da un lato, i dati sperimentali sugli spostamenti superficiali possono supportare gli algoritmi e quindi i risultati della modellazione e secondo quali schemi i dati della modellazione possono guidare la installazione in campo in termini di pattern di distribuzione spaziale dei punti misura, dall'altro.

> 4.4 Studio modello a automi cellulari SCIDDICA-SS3

Un modello numerico basato sugli automi cellulari consiste nella discretizzazione nello spazio e nel tempo di un dominio attraverso delle celle ognuna delle quali interagisce con quelle adiacenti secondo delle opportune leggi. Il principio fondamentale sul quale si basa tale approccio consiste nel fatto che la dinamica del sistema non è determinata da una qualche autorità centrale, ma viene decentrata a livello di interazioni locali.

Il dominio di calcolo si suddivide in un elevato numero di celle e a ognuna vengono assegnati degli stati, ovvero un numero n di variabili "fisiche" (massa, volume, temperatura, pressione degli elementi al loro interno . . .) e un numero p di variabili fittizie o di calcolo (livelli di energia). Le leggi sono tali da modificare gli stati delle celle e portarle verso una condizione di equilibrio. Tale condizione può essere ricercata all'interno di ciascuna cella aggiornando il valore dei suoi stati. In tal caso ogni cella deve essere considerata, temporaneamente, isolata dalle altre.

Un secondo livello di equilibrio riguarda il dominio nel suo complesso. In questo caso è necessario garantire il flusso di opportuni stati (massa, quantità di moto, energia ...) da una cella a quelle confinanti. Quindi, se tra due celle ci sono N celle, l'eventuale flusso di grandezze fisiche tra di esse può avvenire solo a partire dalla N -esima iterazione.

In realtà sono stati realizzati degli algoritmi che permettono di vedere confinanti due celle che fisicamente sono distanti. Si sovrappongono alle celle degli elementi più grandi, delle maxi celle, che mediano gli stati delle celle al loro interno. In questo modo si aggiunge un terzo livello di equilibrio ai precedenti. Oltre all'equilibrio interno e a quello tra le celle, bisogna garantire l'equilibrio tra le maxi celle. In questo modo si riesce ad inseguire fenomeni legati a velocità di propagazioni elevate, garantendo, però, i comportamenti più lenti.

Gli automi cellulari si distinguono in due casi, in base alle leggi utilizzate: Automi cellulari deterministici - Le leggi adottate sono deterministiche e, perciò, lo sviluppo del dominio può avvenire solo verso una ben precisa condizione di equilibrio finale.

Automi cellulari non deterministici - In questo caso le leggi sono non deterministiche. Gli stati delle celle possono evolvere verso diverse condizioni di equilibrio. Viene, perciò, assegnata una distribuzione di probabilità a delle possibili condizioni finali. L'implementazione avviene in parallelo per le differenti

condizioni e ad ognuna viene assegnata la probabilità con la quale potrebbe verificarsi.

In generale gli automi cellulari sono un modello matematico abbastanza semplice da garantire un'analisi di base, ma sufficientemente complicati da permettere lo studio di fenomeni complessi. La loro versatilità ne ha permesso l'impiego nei campi più disparati: fisica, biologia, chimica, fluidodinamica, etc.

Gli automi cellulari, nati come naturale implementazione di leggi fisiche in un elaboratore, si sono sviluppati sulla forza della loro semplicità e, di conseguenza, efficienza. Gli automi cellulari sono utilizzati soprattutto nello studio dei sistemi fisici rappresentabili da semplici leggi di interazioni interne.

Infatti, in tali casi, si ottiene un buon ordine di convergenza poichè, a differenza dei metodi basati su equazioni differenziali, con un metodo basato sugli AC è possibile esprimere le relazioni locali in modo esplicito e diretto. Quindi risulta evidente il risparmio di risorse nella risoluzione di questa tipologia di problemi quando gli schemi numerici si basano sugli automi cellulari piuttosto che sulle equazioni differenziali.

Gli automi cellulari, in alcuni casi, vengono implementati anche per la risoluzione di problemi in cui le interazioni interne non sono "semplici". Si tratta, ad esempio, di problemi di natura fluidodinamica.

Se si considera la famiglia di automi cellulari in oggetto in questa tesi, atta a studiare fenomeni legati a flussi di detriti, è evidente che la loro efficienza li ha resi, in qualche caso, preferibili ai metodi basati sulle equazioni differenziali.

Tra i vari metodi numerici basati sugli automi cellulari ci si concentra sulla famiglia di metodi denominati SCIDDICA. L'interesse verso questa famiglia di metodi risiede, oltre che nel legame che hanno con le applicazioni di interesse in questa tesi, nella grande varietà di fenomeni che riescono a riprodurre.

Si fa riferimento alle interazioni con l'acqua (infiltrazioni, evaporazione ed erosione), o alla possibilità di considerare il movimento di uno strato di detriti sopra un altro. Il metodo numerico su cui si basano gli ultimi lavori nell'ambito dei flussi di detriti è SCIDDICA (Simulation through Computational Innovative methods for the Detection of Debris flow path using Interactive Cellular Automata) ideato presso l'università di Calabria [28] le cui basi affondano nei lavori di Cruden e Varnes del 1996. Pronunciandolo come 'sci:ddre:ca', si ottiene l'acronimo per il termine in dialetto siciliano che significa scivola.

Il modello SCIDDICA fu introdotto da Di Gregorio e Serra nel 1999 presso l'università di Calabria. Le prime edizioni furono applicate al monte Ontake in

Giappone per simulare la valanga del 1984. La scelta si basò sull'ampia disponibilità di dati sperimentali prima, durante e alla fine della valanga stessa. Il fenomeno fu generato da un terremoto di magnitudine 6.8 della scala Richter, in seguito al quale un'estesa zona del vulcano Ontake si è liquefatta dando origine al flusso di detriti con velocità media pari a 25 m_s. L'interesse di tale applicazione è la possibilità di riprodurre la capacità dei detriti di risalire pendii e di sormontare ostacoli sfruttando unicamente l'energia cinetica.

Tale capacità verrà ripresa nella sezione 3.3.1 quando si introdurrà lo stato delle celle Qr Vennero fatte ulteriori simulazioni in seguito al terremoto avvenuto nella zona di Tessina in Italia nel 1992. Dopo 15 giorni di pioggia che accumularono 160 mm di acqua, si generarono le prime valanghe e raggiunta la valle si trasformarono in complessi flussi di detriti. Il domino della simulazione è discretizzato in 296x410 celle. La viscosità è stata imposta in base all'altezza a partire da leggi empiriche, per riprodurre le variazioni della tipologia di flusso. La durata temporale di uno step dell'algoritmo, calcolata con confronti a posteriori, è di circa 40 minuti. L'obiettivo di tale lavoro è di ottenere una taratura del codice in grado di simulare futuri smottamenti nella stessa zona, che d'altronde viene colpita ciclicamente da alluvioni (quelle storicamente registrate sono avvenute nel 1960, 1962, 1963, 1973, 1987, 1988 e 1989).

Altre applicazioni riguardano la simulazione del flusso di detriti alle pendici del complesso di Pizzo D'Alvano, Sarno, Italia, generato dalle piogge eccezionali del 1998. Centinaia di slavine conversero verso valle generando un unico e complesso flusso di detriti. La velocità media, ricavata a partire da registrazioni e misurazioni, risulta medio alta. Ciò produsse una forte erosione del terreno arricchendo ulteriormente la portata del flusso di detriti. In tale applicazione è interessante la capacità di riprodurre flussi con elevate velocità e fenomeni di erosione. Poiché i rilevamenti sperimentali prima dell'erosione sono scarsi, è stato fatto un dettagliato studio sulla morfologia della zona circostante per estrapolare i dati necessari a tarare l'algoritmo.

In generale i metodi SCIDDICA si basano sul concetto di riprodurre un generico fenomeno attraverso l'individuazione di fenomeni descrivibili con semplici leggi semi-empiriche tipiche degli automi cellulari. La differenza principale dagli altri schemi basati sugli automi cellulari, risiede nel campo di applicazione e nel livello di complicazione introdotto. SCIDDICA, infatti, è implementato per riprodurre fenomeni legati al movimento di detriti prodotti da alluvioni o terremoti. Il livello di complicazione cresce notevolmente se si

considerano i fenomeni legati alle infiltrazioni, all'evaporazione e allo scorrimento di uno strato di detriti "leggero" sopra un altro più "pesante". Il movimento dei detriti si può considerare di natura totalmente gravitazionale e quindi la condizione di equilibrio, obiettivo finale degli automi cellulari, è quella di redistribuzione di massa in tutte le celle. La modellazione delle leggi di interazione seguì uno sviluppo nelle varie edizioni di SCIDDICA. Si prevedono delle semplici interazioni interne a ciascuna cella, in seguito alle quali si calcola il flusso di massa tra le celle confinanti. Il comportamento della roccia è considerato statico.

Versioni del 1999, O Furono aggiunte delle leggi che permettessero di considerare i fenomeni legati all'energia cinetica contenuta dalla materia. Si mantenne un approccio statico ma si considerarono anche i fenomeni dinamici. Questo approccio ricorda la residualizzazione statica dei modi ad alta frequenza, tipica dello studio della dinamica.

Versioni successive, S Venne introdotto il concetto di mobilization, ossia erosione della roccia e conseguente aumento della portata del flusso di detriti.

SCIDDICA S2 Vennero aggiunte delle leggi interne ad ogni cella per tenere conto della dispersione di energia a causa dell'attrito con il fondo e a causa di dissipazioni interne.

SCIDDICA S3 L'ultima versione permette di attivare le celle contenute nel dominio in modo asincrono, ossia diviene possibile ritardare il calcolo di outflow proveniente da una cella rispetto a quello proveniente dalle altre. In questo modo si può tenere conto di fenomeni quali la disomogeneità della roccia.

Un ulteriore sviluppo si riscontra sulla scelta della forma delle celle con cui si è discretizzato e pannellizzato il dominio:

Celle Quadrate, SSQ Tale scelta permette di ottenere veloci riscontri numerici in quanto le celle confinanti sono ridotte a 4. Può essere usata nella fase di taratura o comunque di progetto iniziale.

Celle Esagonali, SHEX Le celle esagonali introducono un maggiore onere di calcolo perchè ciascuna cella comunica con altre 6. Ciò nonostante l'uso di celle esagonali permette di ottenere una migliore rappresentazione del sistema reale perchè in questo modo l'algoritmo prevede un numero maggiore di possibili direzioni del flusso di massa. Nelle seguenti sezioni verrà presentato nei dettagli il metodo SCIDDICA S3H EX , ossia la versione S3 con celle esagonali SHEX . In seguito se ne proporrà una possibile implementazioni.

