



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

***DIFESA DEL SUOLO, VULNERABILITA' AMBIENTALE E PROTEZIONE
IDROGEOLOGICA***

Ciclo XXVII

TITOLO TESI

“Valutazione dei rischi ambientali con particolare riferimento alle zone colpite da problemi di dissesto idrogeologico e dal ripetuto passaggio di incendi boschivi.”

Settori scientifico disciplinari di afferenza

GEO 05

Presentata da: Dott. ing. Secci Romina

Coordinatore Dottorato Prof. Giorgio Ghiglieri

Tutor e relatore Prof. Gabriele Uras

Co Relatore Dott.ssa Annalisa Canu

Esame finale anno accademico 2013 – 2014

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per i dati forniti il dott. Giovanni Soro ed il sig. Marco Mocci del Comune di Villacidro. Si ringrazia per la collaborazione e l'ospitalità il dott. Salvatore Pistis e i signori Gianni Vacca, Marco Deiana, il geol. Carlo Piroddi del servizio geologico della Provincia di Cagliari. Si ringrazia inoltre l'Ente Foreste della Sardegna, l'ispettore Loddo del Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale della Sardegna. Il dott. Sergio Calcina e prof Gaetano Ranieri per la consulenza geologica. La dottoressa Annalisa Canu del CNR IBIMET di Sassari per il supporto tecnico logistico e i preziosi consigli. Il dott. Andrea Motroni, il dott. Bachisio Arca, i sigg. Luigi Noli, Mario Sitzia e Andrea Ventura per il lavoro svolto in campo. La mia famiglia per il supporto morale e il prof. Gabriele Uras per avermi sostenuto nella ricerca.

Un ringraziamento speciale va al prof. Peter Robichaud che ha dato un contributo sostanziale alla parte della ricerca in campo sull'area di Ittiri con i suoi consigli e con la strumentazione lasciata in dotazione.

1. ABSTRACT

Wildfires are one of the most widespread factors of ecosystem degradation around the world. The degree of change in both chemical and biological properties of soil induced by forest fires depends on the temperature and the persistence of the fire as well as on the soil moisture content of fuel.

This research, in a first step, deals the study of the stability variation of a hill slope crossed by a forest fire. The first site of investigation is located at western boundary of the rift of Campidano, south-western Sardinia, Italy, to the North-West of the urban area of Villacidro. The geological features are constituted by metamorphic rocks (Hercynian basement) overlying granitoid rocks with a sub-horizontal and weakly wavy contact surface. In order to perform the stability analysis, two geotechnical models were derived by the integration of the results of geotechnical surveys (NSPT measurements and direct shear tests) with electrical resistivity tomographies. Classical approach based on Limit Equilibrium Method is used to determine the safety coefficient. Furthermore, the effects of the forest fire on the slope stability have been discussed modifying the 2D models and introducing an ultra-shallow thin layer with the shear strength parameters determined on burned soil samples, collected after the fire crossing. In particular, this analysis has shown a marked reduction of safety factor at the interface between the burned soil layer and the underlying material for both geotechnical models, considering the infinite slope method with several saturation conditions of the shallow layer.

In this study also were determined the concentrations of geochemical components in the soils affected by forest fires. The fire-burn severity was medium, but the effect of geochemical variation on soil is evident. We observe the variation of total content of Mn that increase in soils affected by a forest fires, respect the control soils. Moreover the C,N and P contents of soil decrease in the time, according with most of the international bibliography. Mapping the values of the geochemical components it was possible to see their mobilization after the rains. With these data we will try in the future to build a model of mobilization of contaminants that is able to predict the decrease in the concentration of the element considering the time elapsed from the fire, the intensity of rainfall and slope.

In a third step the study aim is to develop methods for the analysis and the collection of field data, by means of a multidisciplinary approach, to evaluate land erosion

hazard. The second experimental area is located also in Mediterranean basin, on a steep slope in a hilly area of north-western Sardinia (Municipality of Ittiri, province of Sassari, Italy), where a human caused fire occurred in august 2013. The area is mainly covered by the typical Mediterranean vegetation.

Precipitations were recorded using tipping bucket rain gauge installed at the site.

Soil erosion rates from experimental plots were measured and estimated with silt fences technique taking into account different slopes and vegetation distribution. The study aims to compare the results obtained by ERMiT (Erosion Risk Management Tool) model application and post-fire sediment yields measured in the study area.

The application of the model shows that the area experienced most of erosion after the first rain events after fire occurring. Comparing experimental and model estimated data, there is evidence of ERMiT model overestimating in respect of sampled data for the first year. Future experimental data are needed to confirm this assumption and to contribute to calibrate ERMiT in a Mediterranean typical vegetation and climate environment.

Sommario

RINGRAZIAMENTI	2
1. ABSTRACT	3
2. INTRODUZIONE	8
3. STATO DELL'ARTE	10
4. PRIMO TEST SITE – VILLACIDRO – MONTE OMO.....	13
4.1. VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ DEL VERSANTE DOPO IL PASSAGGIO DEL FUOCO.	13
4.2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO AREA IN STUDIO.....	15
4.3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	17
4.4 INQUADRAMENTO PEDOLOGICO.....	27
4.5 ANALISI DELLE PIOGGE	28
5. SUGLI INCENDI.....	30
6. MATERIALI E METODI	32
6.1 MISURE GEOFISICHE.....	32
6.2 INDAGINI GEOTECNICHE	42
6.2.1 PROVA DI TAGLIO DIRETTO	44
6.2.2 ANALISI DI STABILITÀ DEL PENDIO.....	47
7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI RELATIVI ALLA STABILITÀ DEL PENDIO	51
8. GEOCHIMICA	52
8.1 LA GEOCHIMICA IN SARDEGNA	54
8.2 GEOCHIMICA DEGLI INCENDI	58
8.3 METODI DI ANALISI E CAMPIONAMENTO	61
8.4 TRATTAMENTO DEI CAMPIONI	62
9. ANALISI DEI RISULTATI PER IL SITO DI VILLACIDRO.....	69
10. SECONDO TEST SITE- ITTIRI.....	70
10.1 INTRODUZIONE	70
10.2 ANALISI TERRITORIALE.....	72
10.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA.....	73
10.4 INQUADRAMENTO PEDOLOGICO.....	75
10.5 ANALISI GEOCHIMICA DEL SITO DI ITTIRI	77
11. L'EROSIONE DEI SUOLI.....	78
12. EROSIONE POST INCENDIO.....	82

13.	MODELLI DI PREVISIONE DELL'EROSIONE	87
13.1	MODELLI EMPIRICI	87
13.2	MODELLO PSIAC	88
13.3	MODELLO GRAVILOVIC	88
13.4	MODELLO USLE	89
13.5	MODELLI FISICAMENTE BASATI	90
13.6	MODELLI CONCETTUALI	91
13.7	MODELLO ERMIT	91
13.7.1	PARAMETRI CLIMATICI	94
13.8	SUDDIVISIONE DEL TEST SITE IN PLOT	97
13.9	INDIVIDUAZIONE DELLE SILT FENCES	98
13.10	TIPO DI VEGETAZIONE E CONTENUTO DI ROCCIA	101
13.11	TESSITURA DEL SUOLO	107
13.12	TOPOGRAFIA, LUNGHEZZA DEL VERSANTE E PENDENZA	109
13.13	GRADO DI SEVERITÀ DELL'INCENDIO	109
13.14	CALCOLO DELL'INFILTRAZIONE	115
14.	OUTPUT DEL MODELLO	120
15.	SIMULAZIONI	124
15.1	SIMULAZIONE PER SINGOLE SILT FENCES E CONFRONTO DEI RISULTATI NEL TEMPO	125
15.1.1.	SILT FENCE N°1	125
15.2	SIMULAZIONE PER GRUPPI DI SILT FENCES E CONFRONTO DEI RISULTATI NEL TEMPO	127
15.2.1	SIMULAZIONE RELATIVA AL GRUPPO 1 DI SILT FENCES : PERIODO AGOSTO 2013	128
	PARAMETRI DI INPUT	128
	OUTPUT	128
15.2.2	GRUPPO 1 SILT FENCES: SIMULAZIONE RELATIVA AL MESE DI FEBBRAIO 2014.	130
	INPUT	130
	OUTPUT	130
15.2.3	CONFRONTO DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE PER IL GRUPPO SILT FENCES 1 PER I PERIODI AGOSTO- FEBBRAIO	132
15.2.4	SIMULAZIONE PER IL GRUPPO DI SILT FENCES N. 2: PERIODO DI AGOSTO 2013	132

DATI DI INPUT	132
OUTPUT	133
15.2.5 SIMULAZIONE RELATIVA AL GRUPPO DI SILT FENCES N. 2, PERIODO FEBBRAIO 2014	134
INPUT	134
OUTPUT	134
15.2.6 CONFRONTO GRUPPO SILT FENCES N.2: PERIODO AGOSTO-FEBBRAIO	135
15.3 CONFRONTO DEI DATI SIMULATI CON I DATI IN CAMPO.	136
16. LIMITI DEL MODELLO ERMIT	138
17. CONCLUSIONI E CONFRONTO DEI RISULTATI PER I DUE SITI IN ESAME.	139
18. BIBLIOGRAFIA	141

2. INTRODUZIONE

La presente ricerca è finanziata con una borsa MIUR per lo sviluppo di uno studio sulla valutazione dei rischi ambientali. Pertanto, coerentemente con le indicazioni del MIUR, la ricerca verte sullo studio dei rischi ambientali con particolare riferimento alle zone colpite dal ripetuto passaggio di incendi boschivi. Per tale ragione si è impostato lo studio su di un approccio di tipo multidisciplinare, prendendo in considerazione diversi aspetti della fenomenologia del post incendio. Obiettivo principale di questa ricerca è quello di trovare le correlazioni tra il reiterato passaggio di incendi, l'erosione del suolo ed il dissesto idrogeologico.

La problematica degli incendi boschivi e dei danni da essi causati è sempre di notevole attualità. Il territorio sardo ogni anno è flagellato da centinaia di eventi che per il 90% sono di natura dolosa. La ricerca è stata impostata prendendo in considerazione diversi aspetti degli effetti del post incendio. Sono stati studiati due siti diversi affrontando per ognuno di essi tematiche diverse comunque riconducibili agli effetti degli incendi. In particolare si sono considerati l'effetto del passaggio del fuoco sull'instabilità delle coltri di suolo superficiali, l'effetto dell'incendio sulla produzione di elementi potenzialmente contaminanti, quali metalli pesanti ed il fenomeno dell'erosione superficiale conseguente ad un incendio.

La ricerca è stata condotta su due differenti siti sperimentali e per tematiche diverse ma sempre riconducibili agli effetti degli incendi sul suolo. I due siti sperimentali hanno caratteristiche diverse e si trovano in due zone geografiche differenti, uno nel sud ed uno nel Nord Sardegna. Essi sono stati analizzati per due anni consecutivi a partire dall'immediato post incendio. In un sito sono stati monitorati i valori geotecnici e dimostrata la variazione delle caratteristiche intrinseche del terreno e della sua stabilità a seguito dell'esposizione al fuoco. Sono state misurate inoltre le variazioni dei trend degli elementi geochimici effettuando diverse misurazioni nel tempo e confrontando i dati ottenuti con i dati di letteratura. Nell'altro sito è stato applicato il modello ERMiT per la previsione dell'erosione. Questo modello di previsione dell'erosione specifico per il post incendio, sviluppato dall'USDA è stato utilizzato in questo studio per fare una stima probabilistica dell'erosione post- incendio per 5 anni ed i dati del software sono stati confrontati con l'erosione misurata in campo attraverso

il metodo delle silt fences, barriere antierosione sperimentate da lungo tempo negli Stati Uniti, ma di cui non si conosce altra applicazione in Italia.

I risultati trovati sono in linea con il trend della letteratura scientifica internazionale e consentiranno di tarare il modello per l'area Mediterranea.

3. STATO DELL'ARTE

Il numero degli incendi è aumentato drammaticamente in frequenza e portata nell'Europa Mediterranea dal 1960 ad oggi, il fenomeno è stato aiutato sia da un riscaldamento generale e dall'aridità delle regioni interessate, che dai cambiamenti socio - economici, tra cui lo spopolamento rurale, l'abbandono delle terre e il rimboschimento con specie maggiormente infiammabili. La ricerca su materie concernenti l' idrologia post- incendio e l'erosione del suolo, ha cominciato nel corso degli anni '80 in Spagna ed, è stata seguita da studi in altri paesi mediterranei europei insieme con Israele, raggiungendo ora un numero considerevole di studi (Shakesby, 2011).

A livello del bacino del Mediterraneo numerosi autori hanno affrontato l'argomento sia dal punto di vista degli effetti degli incendi sull'erosione del suolo, che dal punto di vista della ripresa vegetativa (Shakesby, et al.1993, Vacca et al. 2000). Altri hanno pubblicato i risultati di esperimenti per verificare gli effetti dell'erosione sia in laboratorio che in situ nella stagione estiva (Fister et altri 2012, Jebary et al. 2012) sottolineando che gli effetti dell'erosione superficiale dipendono sia dal grado dell'incendio e dalla copertura vegetale che dalle caratteristiche orografiche del sito. In generale l'incendio produce un'azione dannosa sulla superficie del suolo in quanto diminuisce il contenuto di materia organica e della lettiera. (Aznar et al., 2014; Badía et al., 2014).

Altri studi hanno messo in evidenza la correlazione tra il passaggio di un incendio e la modifica delle caratteristiche geomeccaniche del terreno (García-Ruiz, 2012) sottolineando come il fuoco predisponga in alcuni casi a fenomeni di scivolamento superficiale della coltre detritica e anche a fenomeni più gravi come i debris flow (Badía et al., 2015). Altri studi ancora documentano la modifica delle caratteristiche geochimiche dei suoli dopo il passaggio di un incendio (es. Olivella 2006, Ollesch 1999, Bovio, Meloni,Zerbini, 2007).

Un altro aspetto che varia in seguito al passaggio del fuoco è la variazione dei tenori di carbonio, azoto ed il mercurio. Per quanto riguarda le sostanze nutritive contenute nel terreno, gli effetti dell'incendio sono diversi a seconda dell'elemento considerato. I cambiamenti indotti nel suolo sono fortemente correlati con l'intensità del fuoco, che risulta generalmente essere alta negli incendi spontanei che si verificano nella

stagione secca estiva. Il Servizio per la Conservazione delle Risorse Naturali del Dipartimento di Agricoltura degli Stati Uniti classifica gli incendi sulla base della loro intensità per stimare l'avvenuto riscaldamento del suolo (Robichaud, 2000), facendo riferimento alle sue condizioni fisiche e allo stato della vegetazione. Tale classificazione utilizza degli indicatori facilmente rilevabili, rispetto ai quali si fanno delle previsioni sulla dinamica del post-incendio. Vengono individuati incendi di bassa, media o alta intensità. La profondità e lo spessore dello strato idrofobo sono direttamente correlati all'intensità degli incendi e alle caratteristiche locali del suolo. Il sottile strato idrofilo che sovrasta lo strato idrofobo è soggetto, soprattutto nelle aree con ripidi pendii, a una notevole erosione superficiale.

Generalmente gli incendi forestali danno luogo a un incremento di idrofobicità nel caso di basse temperature raggiunte sulla superficie del suolo o a una sua eliminazione nel caso di elevate temperature superficiali.

Indagini condotte in Portogallo sulla variabilità spaziale dell'idrofobicità del suolo di pinete e di foreste di *Eucalyptus* hanno evidenziato che i composti organici rilasciati durante l'incendio non avevano comportato ulteriori effetti idrofobici rilevabili e che le temperature raggiunte risultavano comunque insufficienti ad eliminare l'idrofobicità superficiale. La riduzione della sostanza organica incorporata al suolo, nel caso in cui si verifici in siti aridi, semi-aridi o forestali, può risultare critica in quanto rappresenta una riserva fondamentale nel bilancio dei nutrienti, in modo particolare dell'azoto, relativa allo specifico sito. La quantità di sostanza organica consumata dal fuoco dipende dal contenuto di umidità del suolo, dalla quantità e dalla durata del riscaldamento e dalla quantità di sostanza organica disponibile per la combustione. La misura dell'infiltrazione superficiale risulta fondamentale per poter fare valutazioni sull'idrofobicità del terreno.

Per quanto riguarda la valutazione dell'erosione post incendio un 'modello' generale di erosione post-incendio era già stato abbracciato negli anni '80 da una serie di ricerche condotte principalmente negli Stati Uniti (Swanson, 1981). Questo modello (Fig . 1) mostra una quantità di sedimenti in aumento con un picco durante i primi temporali post-incendio quando il terreno tende ad essere più vulnerabile all'erosione. Le produzioni di sedimento tendono diminuire nel tempo e ciò è dovuto in gran parte alla rigenerazione della vegetazione (ad esempio Inbar et al , 1998; Fox et al., 2006), fino a ritornare a valori tipici di terreno incombusto.

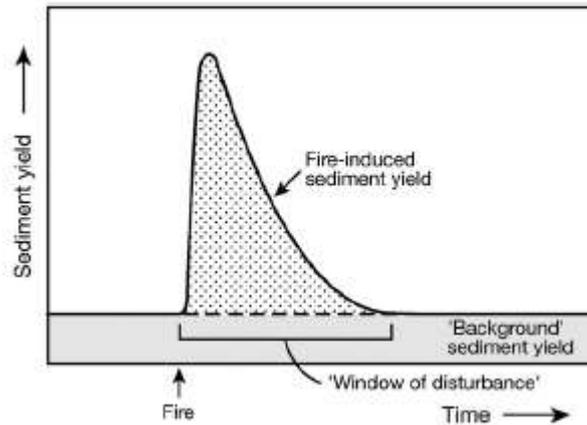


Figura 1 Modello di erosione post incendio (Swanson, 1981).

In Sardegna non si hanno molte sperimentazioni in questo senso e soprattutto non ci sono state in precedenza applicazioni del modello ERMIT. Questo studio si propone pertanto di studiare tutti questi aspetti e di monitorarne gli effetti nel tempo. Questa scelta è stata fatta sia per vedere se gli studi effettuati dall'USDA possano avere un riscontro anche nell'area Mediterranea o se le condizioni pedo-vegetative siano così diverse da influire sui risultati generali sia per verificare se gli studi effettuati in Sardegna mostrino gli stessi valori di quelli riscontrati in questa ricerca.

4. PRIMO TEST SITE – VILLACIDRO – MONTE OMO

4.1. Valutazione della stabilità del versante dopo il passaggio del fuoco.

La valutazione della stabilità dei versanti può essere trattata mediante un approccio di base, fondata su tecniche di modellazione, sulla base di leggi fisiche e meccaniche dell'equilibrio delle forze e dei momenti. Diversi studi hanno documentato la suscettibilità franosa di versanti attraverso l'integrazione dei risultati di indagini geotecniche. Tuttavia, un'analisi preliminare richiede effettuare test di laboratorio specifici per determinare i principali parametri del comportamento meccanico dei terreni, unitamente ad un'attenta analisi delle caratteristiche geomorfologiche del sito (Duncan, 1996). Questo studio si occupa anche dell'analisi della variabilità spaziale della stabilità di versante attraverso lo studio di modelli meccanici del pendio, attraverso i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di indagini geofisiche. In una prima fase, molte informazioni sono state prese dal database GIS, in particolare, il modello digitale del terreno per i dati di elevazione (Dalla Fontana et al., 2005), per analizzare con un grado di maggiore complessità l'informazione topografica. Dopo l'acquisizione delle informazioni topografiche, geometriche e meccaniche è stato possibile applicare modelli deterministici, in cui il meccanismo di collasso del terreno è stato semplificato utilizzando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb e adottando una legge costitutiva basata su un comportamento plastico-rigido. Anche questo studio si propone di valutare gli effetti prodotti dal passaggio degli incendi sui fenomeni di instabilità suscettibilità. In realtà, è noto che il passaggio del fuoco ripetuto predispone a fenomeni di erosione (Shakesby 2011; González-Pelayo et al 2006, 2010) e alla conseguente desertificazione (Fernández et al 2010).. Tuttavia, non è chiaro l'effetto diretto dell'incendio sui parametri meccanici di suoli. L'impatto degli incendi sull'erodibilità del suolo dovrebbe operare attraverso la materia organica e, pertanto, dipende fortemente dalla severità dell'incendio. L'erodibilità del suolo è quindi poco influenzata da incendi a bassa severità, ma aumenta notevolmente dopo incendi di particolare severità. I soprassuoli percorsi da incendio sono resi in varia misura idrorepellenti (Varela et al. 2010).

Inoltre, i flussi di detriti sono di solito associati a frane superficiali e sono generati principalmente da forti piogge su versanti caratterizzati da vegetazione bassa o

scarsa, che possono indurre fenomeni di instabilità sulle zone più acclivi del versante (Blijenberg 1998). Diversi lavori mostrano che i materiali mobilitati da frane superficiali sono la principale fonte di sedimenti detritici e che possono generare flussi di detriti o possono indurre flussi superficiali con trasporto solido elevato (Johnson e Rodine 1984; Blijenberg 1998. Lorente et al 2002, 2003; Beguería 2006; Bathurst et al 2007). Le colate detritiche aumentano percentualmente , favorendo i fenomeni di erosione nelle zone più elevate, specie sui versanti colpiti più volte da un incendio negli anni precedenti (Cannon et al 2001a, 2001b, 2010;. Gabet 2003; Parise e Cannon 2011, García-Ruiz et al. 2012). L'erosione dovuta agli incendi aumenta progressivamente il volume di sedimenti trasportati verso valle. Sono stati condotti molti studi in Spagna (zona Pirenei) che hanno mostrato la correlazione tra la formazione di colate detritiche e il passaggio precedente di un incendio. Inoltre, questo lavoro fornisce la base per la pianificazione territoriale sostenibile perché l'instabilità di versante è un fenomeno naturale o indotto che può generare rischi (Varnes 1984; Fell 1994; Glade 2005; Chacón et al., 2006), e, pertanto, occorre considerare tali processi in una pianificazione territoriale sostenibile.

4.2. Inquadramento geografico area in studio

L'area è situata in Sardegna nel Comune di Villacidro, foglio IGM 547 III, Carta tecnica Regionale della Sardegna n.547090, precisamente in località Monte Omo.



Figura 2 Inquadramento territoriale del test site di Villacidro

La descrizione geologica dell'area è stata desunta da uno studio dettagliato fornito dal Comune di Villacidro e dalla carta geologica della Sardegna. Il sottosuolo dell'area circostante il centro abitato di Villacidro (rilievi di Cuccureddu, Cuccuru Frissa e Monte Omo) può essere schematizzato con una struttura fondamentale costituita da rocce granitoidi su cui poggia la roccia incassante metamorfica. Questa ossatura di base è

poi ricoperta da depositi superficiali di versante, caratterizzati da potenza variabile, solitamente ridotta a qualche decimetro nella parte più alta dei versanti e con valori massimi in corrispondenza della fascia pedemontana (mediamente 4-5 m). Tuttavia, in determinate zone, le indagini geofisiche hanno permesso di evidenziare la presenza di spessori maggiori rispetto a quelli ipotizzati in studi effettuati precedentemente nella stessa area (così come in corrispondenza del tracciato stradale mostrato in figura 129 in cui lo spessore stimato è di circa 16 m). La circolazione idrica all'interno delle formazioni lapidee è ristretta alle porzioni maggiormente fratturate e comunque soltanto in corrispondenza della fascia superficiale del substrato roccioso. La probabile assenza di importanti flussi idrici sotterranei è inoltre corroborata dalla mancanza di manifestazioni sorgive perenni e stagionali lungo i versanti est e nord del rilievo di Cuccureddu e sud di M.te Omo. Nonostante ciò in presenza di particolari condizioni meteoriche è possibile che si instauri una discreta circolazione sotterranea in corrispondenza dell'interfaccia tra il substrato roccioso e la coltre detritica superficiale, o in corrispondenza delle zone caratterizzate dalla presenza della fascia di arenizzazione delle rocce granitoidi. Per tener conto di tali elementi il fattore di sicurezza, relativo al modello del pendio indefinito, è stato determinato in diverse condizioni di saturazione dell'orizzonte detritico superficiale, ipotizzando la presenza di un flusso in direzione parallela alla superficie di scorrimento del materiale



Figura 3 Individuazione del versante di Monte Omo in cui sono state fatte le misure geofisiche.

4.3. Inquadramento geologico

L'assetto geologico dei rilievi collinari di Cuccureddu – Cuccuru Frissa e di monte Omo è piuttosto semplice poiché esso è costituito, sino ad una quota media s.l.m. variabile tra 450 e 470 m, da una "ossatura" fondamentale di granito (Unita U9 e U10) su cui poggia, secondo una superficie di contatto ondulata ma con geometria sub orizzontale con leggera pendenza verso sud, la roccia incassante metamorfica (Unita U11). I versanti sono inoltre ricoperti da depositi clastici più o meno legati il cui spessore, generalmente ridotto a qualche decimetro, solo in prossimità della fascia pedemontana raggiunge i 4-5 m. Nell'area in studio sono presenti a nord le Arenarie di San Vito costituite da alternanze irregolari, da decimetriche a metriche, di metarenarie medio-fini, metasiltiti con laminazioni piano-parallele, ondulate ed incrociate, e metasiltiti micacee di colore grigio. Intercalazioni di metamicroconglomerati poligonali. Al centro abbiamo la presenza di rocce intrusive costituite da leucosienograniti biotitici a grana grossa, bianco-rosati, da equigranulari a moderatamente inequigranulari, a tessitura isotropa e litofacies di bordo da porfiriche a microgranulari che fanno parte del complesso granito ide del Sulcis Arburese. Nella zona più a sud invece sono presenti depositi di versante legati a gravità. In particolare detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati risalenti all'Olocene. Si riporta la carta geologica del particolare di Monte Omo in fig.4 di seguito.

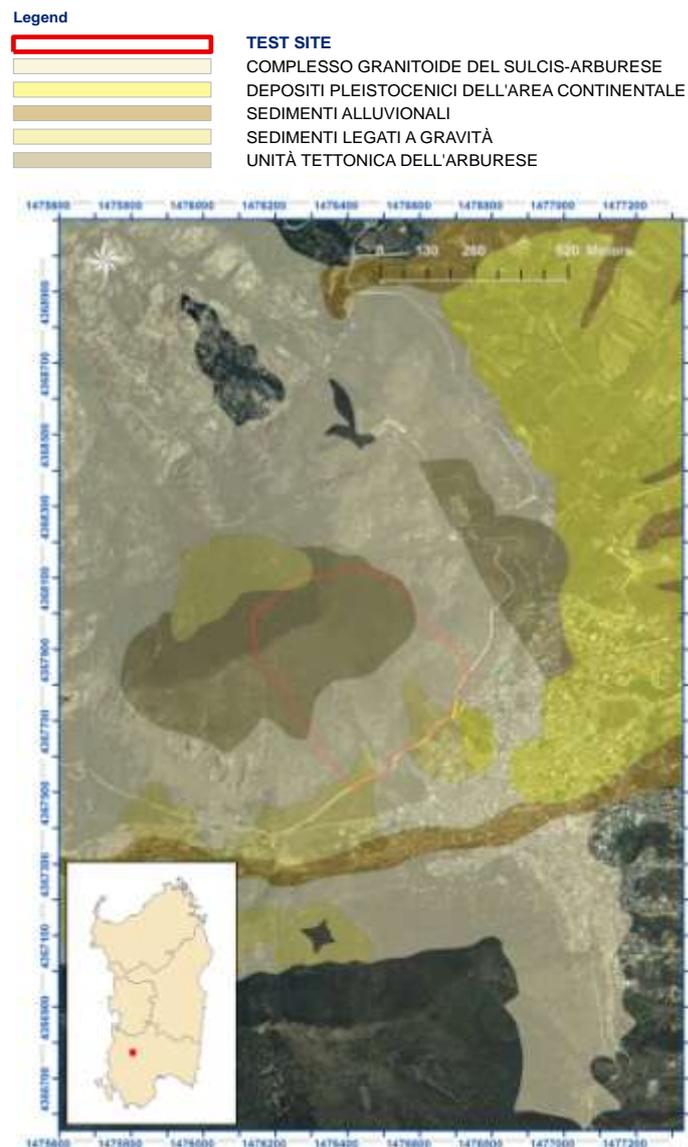


Figura 4 Inquadramento geologico dell'area di Monte Omo a Villacidro

Le caratteristiche del substrato geologico lapideo, sia esso in roccia granitica che metamorfica, fanno sì che esso si comporti come un mezzo poroso per fessurazione, anche se fondamentalmente impermeabile a causa della veloce chiusura delle discontinuità verso l'interno dell'ammasso roccioso. La sola circolazione idrica profonda e connessa con il complesso reticolo di fratture e superfici di discontinuità maggiori (faglie) che comunque non hanno fornito elementi tali da poter essere considerati favorevoli alla presenza di elevati flussi sotterranei. L'assenza di sorgenti perenni o stagionali nei versanti est e nord di Cuccureddu e sud di Monte Omo rafforza l'ipotesi dell'assenza di un flusso idrico sotterraneo importante verso l'abitato. C'è comunque da dire che durante particolari condizioni idrometeoriche è possibile

che possa instaurarsi una discreta circolazione idrica sotterranea di tipo temporaneo nell'interfaccia tra coltre detritica e substrato roccioso granitico con il coinvolgimento anche della parte più superficiale dell'ammasso roccioso interessato dai fenomeni di elevata arenizzazione. Non è raro infatti che durante e/o successivamente a periodi molto piovosi si attivino piccole venute d'acqua all'interno della parte più porosa e fessurata del granito capaci di dar luogo a fenomeni di elevata umidità nelle murature delle abitazioni addossate a tagli in roccia.



Figura 5 panoramica del versante incendiato di Monte Omo

Le vecchie fontane un tempo presenti lungo il piede del versante lungo la sponda sinistra del rio Castangias-Fluminera (ora lato nord del Viale don Bosco) intercettavano direttamente la falda di sub - alveo dello stesso rio anche se non si esclude la possibilità di ricariche direttamente dal versante attraverso sorgenti sotto copertura detritica. Tale assetto idrogeologico risulta importante per la valutazione della stabilità complessiva dei pendii aggiungendo ulteriori informazioni relative al comportamento delle acque meteoriche che, per lo più (a causa di un coefficiente di

infiltrazione piuttosto basso) si trovano a scorrere lungo il versante incanalandosi entro il poco evoluto reticolo idrografico o formando lame d'acqua. Sono infatti presenti 11 impluvi disposti grossomodo ortogonalmente ai crinali principali dei quali solo due (settore occidentale e centrale del versante sud di Monte Omo) possiedono un bacino idrografico "importante" caratterizzato dalla presenza di accumuli di detrito entro un fondovalle sufficientemente definito. Questi ultimi infatti, nel corso del tempo (e in condizioni climatiche molto diverse dalle attuali) hanno raccolto il detrito formatosi sulla superficie del versante in roccia metamorfica e trasportato dalle acque di dilavamento diffuso verso il basso. Attualmente, a causa dell'elevata permeabilità di questi depositi le acque meteoriche, una volta concentrate entro i coni detritici, percorrono la maggior parte del tragitto verso il fondovalle del rio Castangias-Fluminera, sotto la copertura detritica per poi venire alla luce in prossimità del piede della cornice rocciosa granitica. Se il flusso idrico è importante, si attivano fenomeni di trasporto di materiale clastico posto in prossimità delle quote inferiori favorendo il movimento complessivo verso il basso del cono detritico.

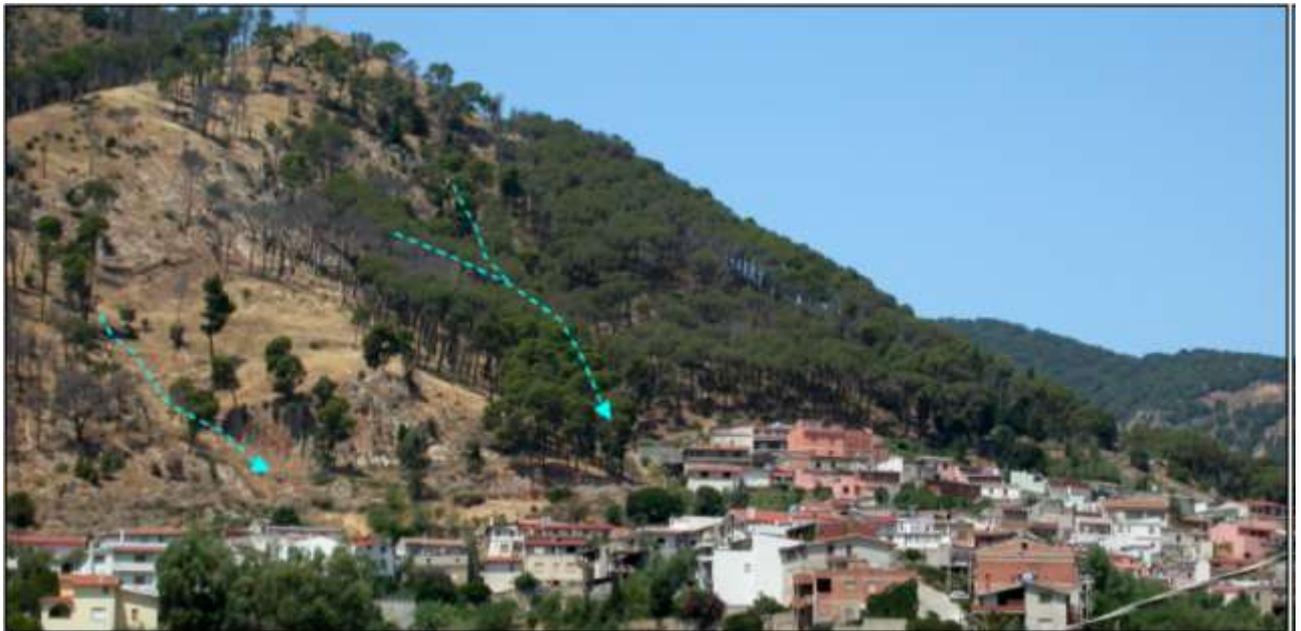


Figura 6 Linee di ruscellamento superficiale nel versante di Monte Omo.

Poiché i fenomeni di dissesto franoso più importanti si verificano nella cornice rocciosa granitica, i flussi idrici superficiali che si formano nella parte sommitale del rilievo e che si riversano su di essa possono determinare lo scalzamento al piede dei massi, piccoli smottamenti di detrito, la riduzione dell'attrito nelle superfici di contatto roccia/roccia,

sovrappressioni interstiziali entro le fratture etc. favorevoli al distacco, scivolamento e ribaltamento di blocchi rocciosi instabili. E' importante evidenziare che il prolungamento entro l'abitato dell'impluvio che attraversa Cuccuru Mudegu è rappresentato dalla via Monte Linas. Attualmente, le acque raccolte dall'impluvio, una volta raggiunta la barriera paramassi si incanalano nella strada panoramica di Giarranas per circa 150 m sino ad un pozzetto che ne permette il convogliamento entro una tubazione passante al di sotto del prolungamento della via Coxinas: ciò non esclude che, nella eventualità di un carico idrico significativo, le acque possano riversarsi direttamente entro l'impluvio naturale ora trasformato in strada.

Il settore di versante centro - orientale e orientale di Monte Omo presenta invece tre impluvi poco marcati, che solo nel tratto di versante compreso tra la base della cornice rocciosa e l'abitato, possiedono un alveo ben definito dall'erosione entro la coltre detritica. Naturalmente, le opere di drenaggio realizzate lungo la strada panoramica Giarranas, pur dimostrando una relativa efficacia durante acquazzoni di entità normale, non impediscono che, in occasione di piogge prolungate e intense le acque riprendano possesso delle naturali vie di deflusso rappresentate in particolare dalla via Coxinas e dal sistema di strade connesse con la via Pineta.

L'assetto idrografico del versante nord di Cuccureddu mostra invece la presenza di 4 impluvi poco marcati e con scarso sviluppo dei propri bacini imbriferi, che attraverso percorsi modificati in modo più o meno marcato dall'uomo, riversano le acque entro la viabilità urbana. Fa eccezione l'impluvio più occidentale che si sviluppa nel versante sottostante Cuccuru Frissa e che scarica le proprie acque direttamente sulla via Castangias.

Il versante est di Cuccureddu presenta due impluvi anch'essi poco estesi arealmente ma che in passato hanno determinato seri problemi alle abitazioni sottostanti. Per ovviare agli effetti negativi del ruscellamento sia diffuso sia concentrato e del trasporto detritico sulle case del rione Laccuneddas, è stato realizzato il canale di guardia che ne intercetta le acque e le trasporta nel sistema idrografico del rio Sant'Antonio mediante tombinamento sottostradale.

Relativamente alle problematiche specifiche oggetto di questo studio, l'analisi effettuata ha permesso di individuare diverse tipologie di dissesto per frana che rappresentano la naturale azione di modellamento dei versanti in roccia lapidea e della loro copertura detritica consentendo una più precisa delimitazione delle aree a

pericolosità geologica. Mentre alcuni di questi fenomeni risultano fondamentalmente indipendenti dall'azione dell'uomo, per altri l'antropizzazione dei luoghi ha determinato un marcato aumento dell'azione ed efficacia dei processi morfologici.

L'attuale assetto planoaltimetrico dei versanti al contorno dell'abitato e le irregolarità morfologiche in esso inglobate nel corso dell'espansione urbanistica rappresentano la "sorgente" dei fenomeni morfo-dinamici che possono creare condizioni di pericolo per la popolazione (crollo di blocchi rocciosi, trasporto di detrito e deflusso incontrollato delle acque meteoriche nella viabilità interna al paese).

In condizioni naturali (funzionalmente al clima locale), alcuni di tali fenomeni possono essere tenuti "sotto controllo" dalla copertura vegetale autoctona che, con il necessario infittimento e la normale crescita, crea una barriera capace di abbattere o ridurre significativamente sia l'energia cinetica sviluppata dai massi che rotolano nel pendio, sia l'azione dilavante ed erosiva delle acque di ruscellamento sui suoli. In caso di degrado generalizzato della vegetazione, come è attualmente evidente in quasi tutto il versante di Monte Omo che si affaccia sull'abitato e nei versanti nord e est di Cuccureddu-Cuccuru Frissa (incendi ripetuti, erosione dei suoli, senescenza delle specie arboree di impianto artificiale etc.), l'azione regimante e stabilizzante risulta ridotta o assente e perciò incapace di contrastare la tendenza ad un aumento della velocità dei fenomeni di dissesto.

Nel dettaglio sono state individuate le seguenti tipologie di frana per la cui rappresentazione cartografica si rimanda alla fig.7, contestualizzate con le condizioni dei luoghi nei quali si ha la loro prevalente attivazione:

A) - Frane da crollo, scivolamento e ribaltamento

Aree di versante con roccia affiorante (granito e/o metamorfiti) con grado di fratturazione generalmente elevato (almeno 4 famiglie di discontinuità) da subverticali a basso angolo, con assetto geostatico generalmente precario per fenomeni di detensionamento corticale e con presenza di numerosi blocchi rocciosi instabili, sottoposta a degrado da parte degli agenti atmosferici. Settori di cornice rocciosa naturale a conformazione irregolare, con tratti subverticali e talora aggettanti, di altezza localmente pluridecimetrica.

SCALA DELLE PROBABILITÀ CHE AVVENGA UN FENOMENO FRANOSO



A1 - Elevata probabilità



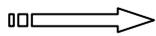
A2 - Moderata probabilità



A3 - Bassa probabilità



A4 - Aree di accumulo e distribuzione dei blocchi di frane pregresse e attuali



Possibili corridoi di rotolamento di blocchi



Limite di possibile espansione areale delle frane nel versante (per rotolamento, scivolamento, salto)

B) - Frane per lento movimento della coltre detritica



B1 - Aree di versante con acclività generalmente comprese tra 25° e 40°, talora oggetto di pregresse attività di sistemazione forestale mediante gradonatura, attraversate da recenti incendi (agosto 2007 – versante sud di Monte Omo e versante nord di Cuccuru Frissa versante est di Cuccureddu) e con coltre vegetale arbustiva e arborea, sia spontanea che di impianto artificiale, fortemente compromessa o totalmente distrutta. Aree di versante caratterizzate da riattivazione di diffusi fenomeni di trasporto detritico superficiale provocati da dilavamento idrometeorico (ruscellamento areale e incanalato). Areali con diffusi fenomeni di lento movimento dello strato detritico di copertura del basamento roccioso metamorfico e/o granitico (reptazione). Areali ad elevato rischio di denudamento per erosione dei suoli. Nei settori di versante posti a quota maggiore, possono riattivarsi fenomeni di alimentazione verso i conii detritici con trasporto di materiale clastico grossolano (B5). Possibile attivazione di fenomeni di rotolamento di clasti rocciosi di dimensioni variabili, generalmente inferiori ad una decina di decimetri cubici, ubicati sul versante o su affioramenti rocciosi di altezza < 5 m.

 **B2** - Aree di versante (acclività media compresa tra 25° e 35°) interessate da rimboschimenti di vecchio impianto a pino domestico, con scarso sottobosco e tendenza a forte diradamento della copertura arborea, con elevata percentuale di alberi con assetto fortemente inclinato e/o già ribaltati a causa di fenomeni di reptazione. Si osserva una forte riduzione dello spessore dei suoli con roccia subaffiorante e estesi fenomeni di dilavamento idrometeorico

 **B3a** - Aree di versante (acclività media 20° con picchi talora superiori a 35°) con rimboschimenti di vecchio impianto a pino domestico ancora in buono stato di conservazione e originaria densità di individui nonché scarso sottobosco. Si osserva una lenta riduzione dello spessore dei suoli con roccia sub-affiorante per locali fenomeni di dilavamento idrometeorico.

 **B3b** - Aree di versante periurbane e/o inglobate dall'area urbana, con acclività in genere inferiore a 20° interessate sia da attività agricola (attuale che pregressa) sia attualmente incolti e sottoposte a moderati fenomeni di dilavamento dei suoli.

 **B3c** - Aree di versante periurbane e/o inglobate dall'area urbana, spesso impostate su terreni di riporto eterogenei non stabilizzati, con acclività talora anche di 30-35°, caratterizzate da presenza di vegetazione arbustiva ed arborea generalmente promiscua, da fitta a rada, non più sottoposta a manutenzione ordinaria delle opere di sistemazione dei versanti (gradonature, terrazzamenti etc.) caratterizzate da locali fenomeni di lento movimento della coltre detritica superficiale (reptazione), erosione lineare e areale da parte delle acque di ruscellamento e con potenziali fenomeni di dissesto gravitativo in caso di collasso delle strutture di sostegno.

 **B4a** - Aree di versante su substrato generalmente roccioso (metamorfici e/o graniti) con acclività media di 30° con picchi talora superiori a 35°, con residui di rimboschimenti a pino domestico su gradonature, sia di impianto relativamente recente (decennio 1970-1980) sia più antico (prima metà del 1900) e in stato di conservazione da buono a mediocre. Scarsa presenza di sottobosco che favorisce l'attivazione di locali fenomeni di forte dilavamento idrometeorico sia concentrato che areale con lenta riduzione dello spessore dei suoli.

B4b - Aree di versante su substrato generalmente roccioso (metamorfici e/o graniti) con acclività media di 30° con picchi talora superiori a 35° caratterizzati da copertura arbustiva e arborea naturale (localmente associata a subordinati individui di Pino domestico) in ripresa vegetativa con effetti stabilizzanti della coltre detritica di versante nonostante la presenza di chiarie a prevalente macchia bassa. Laddove la copertura vegetale è più rada, si osserva una forte produzione di clasti provenienti dagli affioramenti di rocce metamorfiche che alimentano i coni detritici. Ulteriore fonte di detrito potenzialmente mobilizzabile è il sistema di gradonature dei rimboschimenti pregressi, da tempo abbandonato. Locali fenomeni di forte dilavamento idrometeorico sia concentrato che areale con lenta riduzione dello spessore dei suoli.

B5 - Aree di versante (acclività media 25-30°) con terreni detritici rimovibili (coni detritici) per effetto della gravità e del ruscellamento concentrato, spesso quasi del tutto privi di vegetazione (versante sud di Monte Omo). La mobilizzazione del materiale clastico nei coni di detrito principali sotto forma di colate di detrito (debris flows) è favorita anche dalla mancata manutenzione delle gradonature a secco realizzate nella seconda metà del 1900 e dalla adiacenza di aree attraversate da recenti incendi.

Predisposizione a dar luogo a flusso di detrito (colate di detrito o debris flows) in condizioni meteoriche critiche (piogge molto intense e durevoli) variabile da moderata ad elevata.

C) - Frane corticali complesse

C1a - Aree di versante molto acclive su coltre detritica di pendio ± addensata e legata, spesso rimaneggiata, localmente di genesi antropica (terreni di riporto) o su roccia molto fratturata e alterata, talora interessata da scarpate con pendenza anche >> 45° sino alla verticale, sia di genesi artificiale (tagli stradali, sbancamenti etc.) sia naturale (scarpate di erosione torrentizia, scarpate di faglia e/o strutturali) e di altezza plurimetrica, non protette da alcun intervento di consolidamento e/o sostegno, con elevata predisposizione al distacco di masse terrigene/detritiche per smottamento o altro tipo di frana più o meno complesso. I fenomeni franosi sono favoriti anche da disequilibrio nella crescita della vegetazione (spesso di specie arboree alloctone), dalla presenza di scarpate artificiali non stabilizzate, dalla assenza di sistemazioni idrauliche

per il controllo delle acque dilavanti, da fenomeni di ribaltamento delle specie arboree poste in prossimità della parte alta delle scarpate, da presenza di sovraccarichi, da disordine idraulico determinato da attività antropiche scorrette.

 **C1b** – Areali urbani e periurbani interessati da presenza di scarpate artificiali impostate su roccia granitica alterata e fratturata talora associata a coltre detritica, di altezza plurimetrica, generalmente sub verticali e talora con parti aggettanti, non protette da alcun intervento di consolidamento e/o sostegno, con elevata predisposizione al distacco di masse detritiche anche grossolane a causa dell'innescò di tipologie di frana più o meno complesse.

D) – Frane per sprofondamento

 **D1** - Aree interessate da pregressi interventi di scavo (gallerie, pozzi etc.) non completamente bonificati mediante riempimento delle cavità e soggette a fenomeni di sprofondamento causati dall'azione dilavante di acque sotterranee o da sovraccarichi.

E) – Aree non franose

 **E1** Aree interessate da pregressi interventi di colmata mediante l'utilizzo di terre di varia tipologia, non adeguatamente costipate e potenzialmente soggette a cedimento a causa di fenomeni di assestamento o per sovraccarico e localmente interessate da fenomeni di dilavamento sotterraneo a causa di scorretto o assente drenaggio. Fasce cordiere di rilevati in terre di riporto eterogenee di altezza plurimetrica.

 **F1** - Areali per i quali non sono stati rilevati fenomeni di dissesto franoso significativo per gravità o per altre cause naturali o antropiche. Aree con acclività generalmente modesta (< di 20°), urbane e periurbane, stabilizzate da interventi di sistemazione dei versanti, da opere di sostegno o da pratiche agricole ancora in atto. Areali con moderata potenzialità di innescò di fenomeni franosi nel caso di scorretto utilizzo del suolo o di interventi antropici significativi che prevedano configurazioni morfologiche differenti da quelle attuali. Aree di fondovalle ampio. Aree sommatali di

rilevi collinari allungati (dorsali) sufficientemente ampie e caratterizzati da modesta acclività.

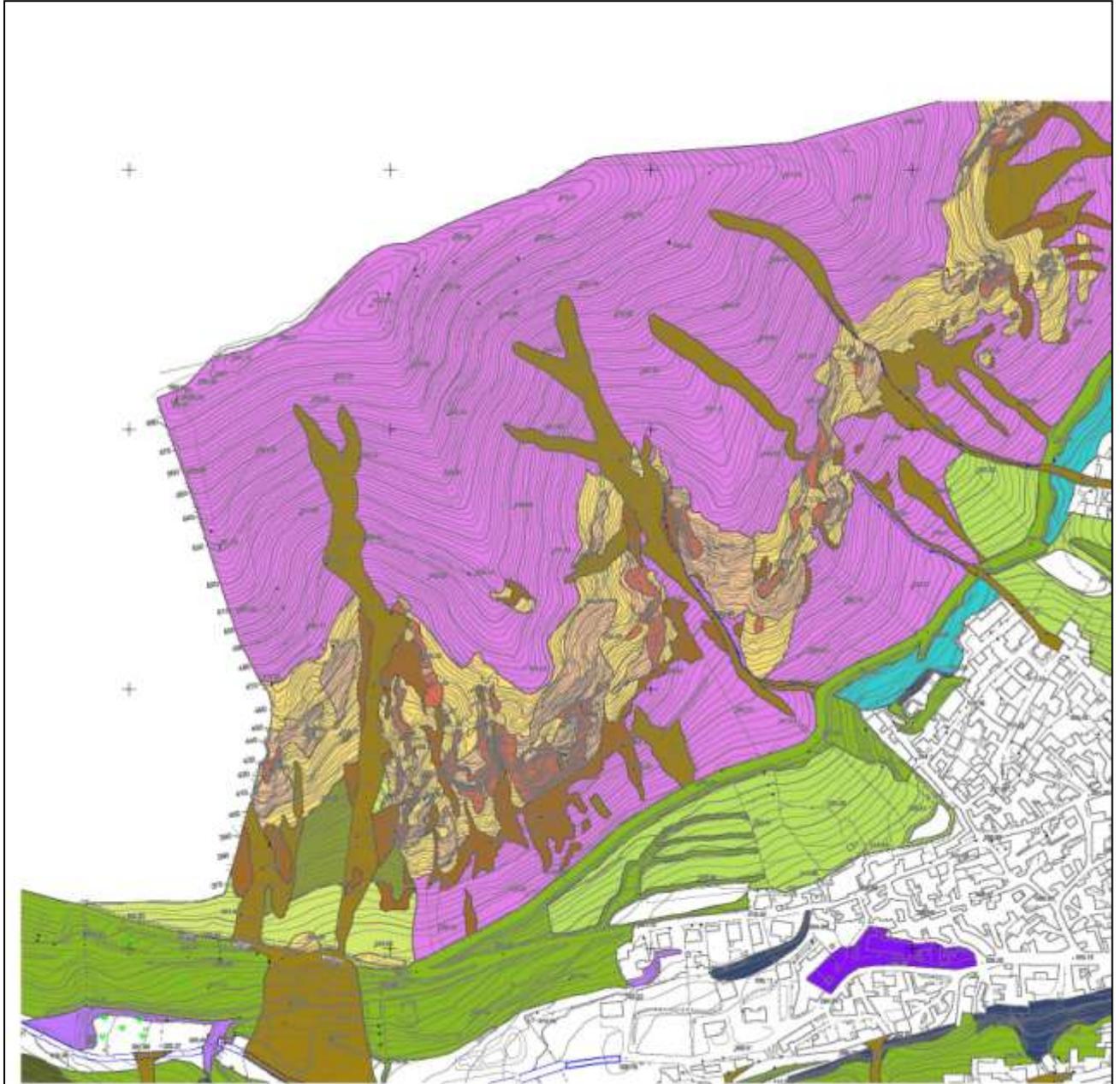


Figura 7 Carta della franosità dell'area nel Comune di Villacidro (fonte: studio per la redazione dei progetti preliminari degli interventi urgenti di mitigazione del pericolo idraulico e di frana presenti entro l'abitato – Villacidro (VS) – ATP professionisti vari)

4.4 Inquadramento pedologico

L'unità di paesaggio corrispondente è la B1 corrispondente ad aree con forme aspre e pendenze elevate, prevalentemente prive di copertura arbustiva ed arborea. I suoli

predominanti sono di tipo Xerochrepts, Rock outcrop, Lithic, Dystric e Eutric Leptosols. Questa zona è caratterizzata dalla presenza di roccia affiorante e suoli poco profondi con profilo A-C e subordinatamente A-Bw-C poco profondi, da franco sabbiosi a franco argillosi a forte pericolo di erosione. Pochi lembi di copertura vegetale si ritrovano sui versanti esposti a Nord e lungo gli impluvi. La fertilità è scarsa o debole, la sostanza organica è presente solo negli orizzonti superficiali sotto le aree boscate. Nonostante la scarsa capacità produttiva e gli abbondanti affioramenti rocciosi, su queste aree gravita ancora il pascolamento, che determina un ulteriore processo di involuzione. (Aru A., et al., 1991).

4.5 Analisi delle piogge

E' stata condotta l'analisi delle piogge per valutare i valori di evapotraspirazione reale attraverso il metodo dei topoieti. I dati di input sono stati tratti, per quanto riguarda l'ubicazione delle stazioni, i dati pluviometrici e i dati termometrici, relativi a ogni stazione ricadente nell'area, dal SISS (Studio sull'Idrografia Superficiale della Sardegna), che fornisce i dati dal 1922 al 1992, mentre la mappatura geologica, i limiti amministrativi, le curve di livello, l'idrografia sono stati estrapolati dal Geoportale del sito della Regione Sardegna. Con l'utilizzo di strumenti GIS specifici per l'analisi idrologica è stata determinata l'estensione del sub bacino di riferimento vicino a cui ricade anche la stazione meteorologica di Monti Mannu. Il metodo dei topoieti si basa sul principio di assegnare ad ogni stazione pluviometrica l'area circostante ad essa attraverso la costruzione di poligoni irregolari o TOPOIETI. Devono essere utilizzate anche le stazioni pluvio termometriche potenzialmente influenti poste al di fuori del bacino considerato. Sono state considerate tre stazioni meteo, Montimannu, Villacidro FC e Sanluri.

Il valore della precipitazione media (P_m) in un territorio suddiviso in n topoieti di superficie S_i , riferiti ad una stazione ove si sia registrata una altezza di pioggia P_i , è dato da:

$$P_m = \frac{\sum_1^n P_i * S_i}{\sum_1^n S_i}$$

Attraverso il software utilizzato è stato costruito uno shapefile del bacino della zona di studio e ne è stata misurata la superficie, dal calcolo attraverso i dati di piovosità e temperatura media mensile presi dal SISS, si è calcolato il valore della precipitazione

netta e dell'evapotraspirazione reale, con la formula di Turc, modificata da Santoro ed è risultata un'evapotraspirazione pari circa al 45%.

Bacino	Precipitazione netta	Temperatura	ET	ET
	<i>mm/anno</i>	<i>°C</i>	<i>mm/anno</i>	<i>%</i>
A	1097,3	15,15	493,54	44,98

5. SUGLI INCENDI

Gli incendi ripetutamente divampati nella zona di interesse negli ultimi dieci anni (Ultimo evento nel mese di agosto 2012) (fig. 8) hanno ridotto progressivamente la copertura vegetale, aumentando i fenomeni di erosione superficiale. Ciò è rilevabile in situ e attraverso l'analisi di ortofotocarte storiche. Nella figura 8 è riportata l'estensione territoriale degli incendi che hanno colpito l'area negli anni, a partire dal 2005 fino al 2013. In particolare due grandi incendi hanno raso al suolo la vegetazione di Monte Omo nel 2007 e nel 2012. Le prime indagini che sono state iniziate nel mese di settembre 2012, subito dopo l'incendio, mettono in evidenza diffuse forme di erosione superficiale, soprattutto dove la vegetazione è stata sradicata (fig. 9). Lo strato superiore del terreno, spessore di 20-50 cm, è composto principalmente da cenere, risultante dalla combustione della vegetazione. L'ultimo evento studiato nell'area che risale ad agosto 2012 ha avuto un'intensità moderata (Parsons et al. 2010) e ha prodotto ingenti danni alla copertura vegetazionale .

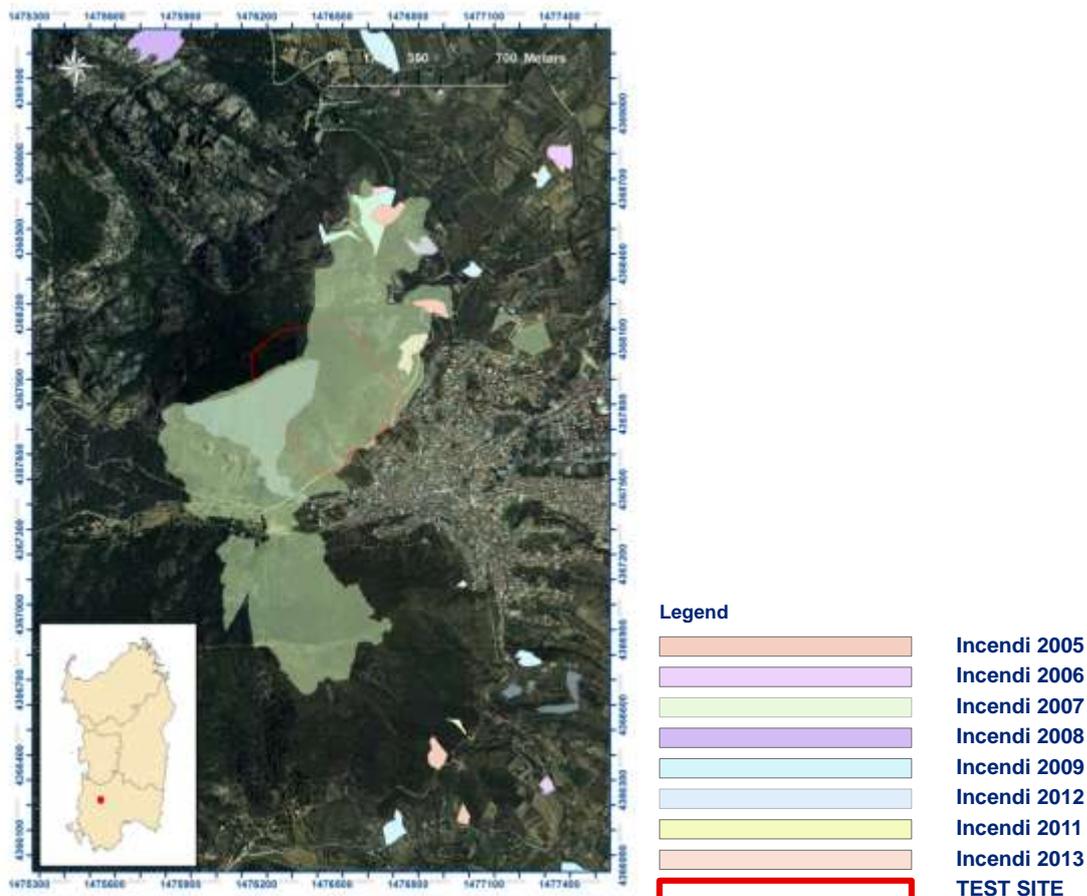


Figura 8. Perimetri delle aree incendiate dal 2005 al 2013.

La diminuzione dell'effetto di stabilizzazione dovuto alla vegetazione e le successive piogge torrenziali hanno accentuato l'instabilità dei fenomeni superficiali lungo gli impluvi. La figura 10 illustra alcuni fenomeni di collasso in corrispondenza di vari segmenti stradali. Prima che il fuoco attraversasse l'area, il suolo aveva proprietà di bassa plasticità (con indice di plasticità che variava da 5 a 10) sia a monte che a valle del pendio.

La determinazione dei limiti di Atterberg eseguita subito dopo l'incendio ha mostrato una riduzione dell'indice plasticità dei campioni raccolti nella parte superiore del pendio, probabilmente a causa della parziale combustione della matrice organica presente nel terreno. Viceversa, le stesse analisi effettuate su campioni di terreno prelevati a valle del pendio e della zona incendiata non hanno mostrato questa tendenza, mantenendo le caratteristiche invariate. Ulteriori test effettuati dopo il periodo delle piogge mostrano una significativa riduzione dell'indice di plasticità (indice di plasticità non determinabile) anche nelle parti a valle del versante, mettendo in evidenza il progressivo trasporto della matrice eseguita dal deflusso superficiale delle acque.



Figura 9 Effetti dell'incendio sul versante. A sinistra lo scavo lasciato dalle radici di un pino.



Figura 10 Fenomeni di smottamento avvenuti alle prime piogge dopo l'incendio in corrispondenza dei tagli stradali.

6. MATERIALI E METODI

Per determinare le caratteristiche meccaniche ed i parametri meccanici dell'area in studio sono stati utilizzati metodi di tipo geofisico e geotecnico. In particolare le tomografie elettriche di resistività sono state utilizzate per determinare gli spessori degli strati superficiali di terreno e definire la morfologia dello strato roccioso di base. Tali risultati sono stati poi confrontati con i non standard penetration tests e altre analisi di tipo non distruttivo.

I parametri meccanici dei suoli sono stati ottenuti da analisi di laboratorio effettuate su numerosi campioni prelevati in diversi periodi di tempo.

6.1 Misure geofisiche

La resistività elettrica ρ è una proprietà fisica intrinseca di qualsiasi materiale che si definisce come resistenza al passaggio della corrente di un cubo di lato unitario.

Il parametro resistività è influenzato da: tessitura e porosità, grado di cementazione, temperatura della roccia, contenuto argilloso, permeabilità, temperatura e salinità della soluzione acquosa che imbibisce la formazione.

Inoltre, a parità di condizioni litologiche, vi sono alcuni processi geologici che causano un'immediata variazione della resistività perché ne modificano la porosità. In generale molti di questi processi portano ad una riduzione della resistività. Essi sono: alterazione dell'argilla, dissoluzione, fratturazione della roccia, intrusione d'acqua salata, scollamento e/o alterazione superficiale. Causano un aumento della resistività il processo di solidificazione, la precipitazione di carbonato di calcio o la silicizzazione. Il metamorfismo può causare sia un aumento sia una diminuzione della resistività. Per questo motivo la resistività delle rocce e dei terreni non possono essere definite da un solo valore, ma da un intervallo più o meno ampio entro il quale esso può variare. Inoltre, come si vede dalla tabella seguente, i range di resistività delle varie litologie, spesso si sovrappongono comportando ulteriori problemi in fase di elaborazione dati e di identificazione della roccia. (Soldovieri, 2005 – tesi di dottorato)

Rocce e minerali metallici	Resistività (Ω m)
Sedimentarie	
Calcarea chalk	50 ÷ 150
Argilla (clay)	1 ÷ 100
Ghiaia (gravel)	100 ÷ 5000
Calcarea (limestone)	50 ÷ 10 ⁷
Marna (marl)	1 ÷ 100
Quarzite (quartzite)	10 ÷ 10 ⁸
Argilla (shale)	10 ÷ 1000
Sabbia (sand)	500 ÷ 5000
Arenaria (sandstone)	1 ÷ 10 ⁸
Ignee e Metamorfiche	
Basalto	10 ÷ 10 ⁷
Gabbro	10 ³ ÷ 10 ⁶
Granito	10 ² ÷ 10 ⁶
Marmo	10 ² ÷ 10 ⁸
Scisto	10 ÷ 10 ⁴
Ardesia	10 ² ÷ 10 ⁷
Minerali e minerali metallici	
Argento	1,6 · 10 ⁻⁸
Grafite (giacimento massivo)	10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³
Galena (Pbs)	10 ⁻³ ÷ 10 ²
Magnetite di giacimento	1 ÷ 10 ⁵
Sfalerite (ZnS)	10 ³ ÷ 10 ⁶
Pirite	10 ²
Calcopirite	10 ⁻³ ÷ 0,3
Quarzo	10 ¹⁰ ÷ 2 · 10 ¹⁴
Salgemma	10 ÷ 10 ¹³
Acque ed effetto del contenuto in sale	
Acqua pura	10 ⁶
Acque naturali	1 ÷ 10 ³
Acqua di mare	0,2
Sale 20%	5 · 10 ⁻²
Granito 0% di acqua	10 ¹⁰
Granito 0,19% di acqua	10 ⁶
Granito 0,31% di acqua	4 · 10 ³

Tabella 1 Valori di resistività di alcune rocce e minerali da A.E. Musset, M. Aftab Khan, "Esplorazione del sottosuolo una introduzione alla geofisica applicata". ed. Zanichelli, (modificata da Soldovieri)

I metodi geoelettrici consistono nella determinazione sperimentale dei valori di resistività elettrica che caratterizzano il sottosuolo. Immettendo nel terreno, attraverso due elettrodi, corrente continua o alternata a bassa frequenza, è possibile stimare la resistività elettrica presente nel sottosuolo misurando la differenza di potenziale che si determina ai capi di altri due elettrodi a causa della corrente immessa (metodo della resistività).

Immettendo nel terreno corrente continua (o corrente alternata a bassa frequenza in modo da trascurare i fenomeni di induzione magnetica), si genera un campo elettrico E (V/m), conservativo e per questo definito pari a:

$$E = -\text{grad}U$$

dove U è una funzione definita a meno di una costante, nota come potenziale elettrico (misurato in volt). Detta ρ ($\Omega \text{ m}$) la resistività elettrica del mezzo in ogni punto all'interno del semispazio considerato e J la densità di corrente (che rappresenta la quantità di corrente che si distribuisce su una superficie infinitesima di terreno ortogonale al movimento delle cariche), dalla espressione della legge di Ohm è possibile definire il campo elettrico corrispondente.

La misura della resistività elettrica di rocce e minerali può variare di 20 ordini di grandezza a seconda del tipo di roccia. Ad esempio, le rocce granitiche sono essenzialmente resistive, mentre la resistività dello scisto varia da 0,5 a 100 Ωm . La saturazione idrica aumenta la conducibilità dei depositi geologici e può influenzare significativamente la sua entità. Inoltre, diversi tipi di roccia hanno intervalli di resistività sovrapposti. La resistività elettrica è misurata ponendo un dispositivo quadripolare sulla superficie libera. Una coppia di elettrodi invia corrente e un'altra coppia di elettrodi è utilizzata per rilevare la differenza di potenziale. Negli ultimi anni, il miglioramento della tecnologia del computer, insieme allo sviluppo dei moderni strumenti di acquisizione dati che consentono la tecnologia multi-elettrodo gestione l'acquisizione dati multi-canale e la disponibilità di procedure di inversione numerica automatizzate, hanno favorito la diffusione delle tecniche tomografiche, permettendo di ottenere sezioni di resistività a partire da pseudo-sezioni di resistività. Il risultato è ottenuto da un calcolo iterativo, con progressiva minimizzazione di una funzione appropriata. La tomografia di resistività elettrica (ERT) per l'immagine del sottosuolo impiega schiere di elettrodi di superficie per misurare la distribuzione resistività nel suolo e nella roccia sottostante.

In questo studio, una ERT 2D è stata applicata per indagare la morfologia e la profondità del substrato nel sito di interesse. L'apparecchiatura per la misura della resistività è formata schematicamente da:

Un sistema per l'immissione di corrente nel terreno (batteria o generatore di corrente);

Una serie di elettrodi;

Strumenti per la misura dell'intensità di corrente immessa nel terreno mediante gli elettrodi e della differenza di potenziale tra gli elettrodi.

In particolare, per le acquisizioni è stato utilizzato il resistivimetro Syscal-Pro (Iris

Instruments) con 10 canali di acquisizione, con alta impedenza di input (100 M Ω), appositamente costruito per indagini di questo tipo. Ogni linea elettrica è composta da 48 elettrodi, con una equidistanza pari a 2 m. nella figura sottostante è rappresentato lo strumento utilizzato.



Figura 11 Strumento utilizzato Syscal pro (dal manuale d'uso)

Sono stati fatti due stendimenti verticali (L01 e L03) ed uno orizzontale (L02) visibili nella figura riportata in basso.

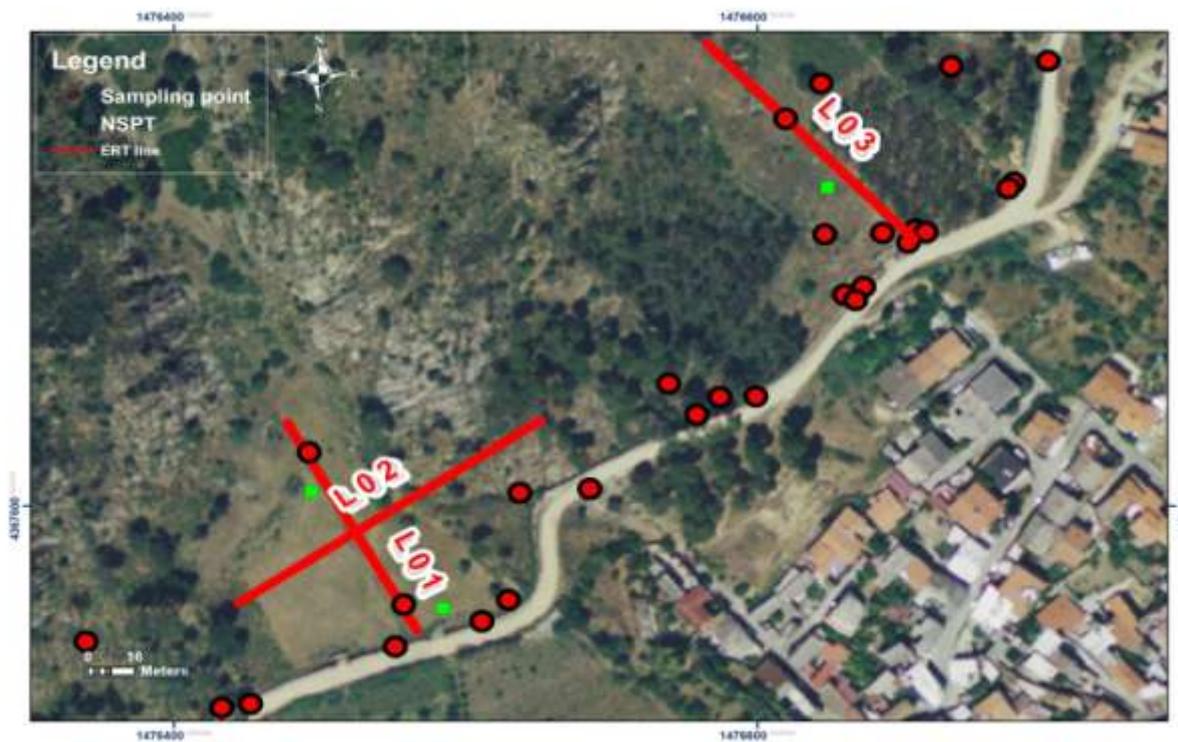


Figura 12 Stendimenti di elettrodi utilizzati per la misura della resistività del terreno, NSPT e campioni utilizzati per le prove di taglio diretto.

Lo studio è stato rivolto alla ricostruzione di diversi modelli 2D. Infatti attraversando il pendio longitudinalmente e trasversalmente, si è potuta effettuare una valutazione dello spessore dei sedimenti superficiali, associando le diverse gamme di resistività alla geologia del sottosuolo. Ogni linea elettrica consiste di 48 elettrodi, ugualmente distanziati e posizionati alla distanza di 2 m. Le sequenze di acquisizione sono state ottimizzate per accelerare l'acquisizione dei dati. Al fine di confrontare i risultati ottenuti con differenti matrici quadripolo, le misurazioni di resistività apparente sono state effettuate lungo ogni profilo utilizzando configurazioni sia dipolo-dipolo che Wenner-Schlumberger.

L'inversione dei dati di resistività apparente è stata preceduta da una serie di operazioni finalizzate ad eliminare il rumore delle misure (come il de-spiking, la rimozione di valori pseudo-resistività negativi, ecc), al fine di migliorare il processo di convergenza e di ridurre la differenza tra i dati sperimentali e i valori del modello di resistività calcolato alla fine dell'iterazione i -esima. I dati elettrici risultati dalla tomografia 2D sono stati invertiti utilizzando il metodo dei minimi quadrati. Questa tecnica mira a ridurre al minimo il range delle variazioni nei valori del modello di

resistività (metodo di ottimizzazione L2-norm), producendo un modello caratterizzato da variazioni di resistività lineari. Il metodo agli elementi finiti è stato utilizzato successivamente per risolvere il problema. Durante il processo di inversione le posizioni dei nodi sono state rettificate per tener conto del contributo delle irregolarità topografiche.

Il set di dati di misura è composto da circa 465 valori raccolti da tutte le pseudo sezioni 2D per la configurazione Wenner-Schlumberger e 570 i valori per la configurazione dipolo-dipolo. La convergenza tra i valori osservati e il modello resistività è stata ottenuta dopo cinque o sei iterazioni, come indicato dai valori dell'errore quadratico medio. Il modello di resistività 2D risultante, rispetto alla linea L01 mostrata in figura, evidenzia alcune importanti caratteristiche geologiche del sottosuolo. In particolare si riscontra la presenza di uno strato molto superficiale caratterizzato da valori di resistività superiore a 2.000 Ωm con uno spessore compreso tra 1 e 2 metri, probabilmente costituito da depositi eterometrici e clasti. Questi elevati valori di resistività sono probabilmente correlati alla presenza di materiali sciolti e asciutti nel primo strato del suolo superficiale. Il secondo strato mostra valori di resistività che vanno da 200 a 800 Ωm , in accordo con la presenza di zone caratterizzate da intensa alterazione del bedrock o dai coperture detritiche superficiali. A maggiori profondità gli strati sono caratterizzati da un gradiente di resistività più importante, associato con la transizione verso la roccia basale granitica (con resistività superiore a 2.000 Ωm).

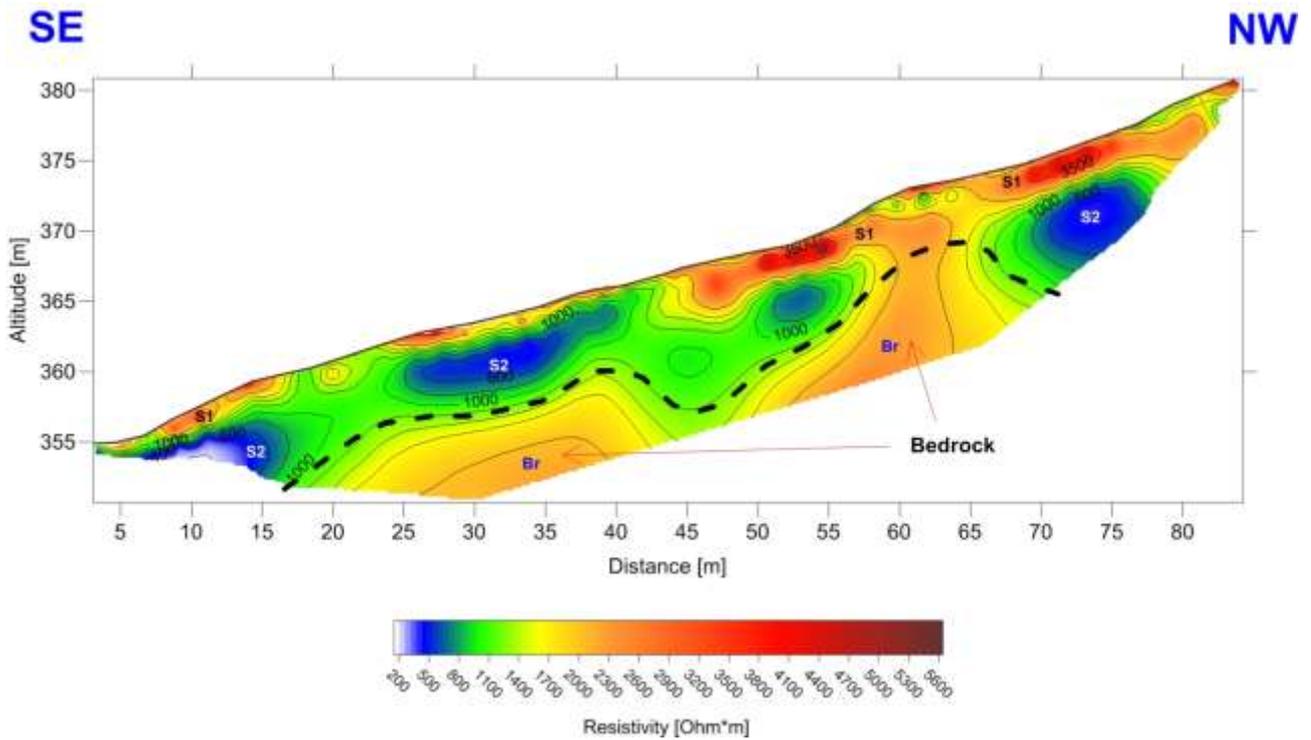


Figura 13 2D Electrical Resistivity Tomography with Residual RMS Error of 2.4 % Generated from Extended Survey Line L01 (Wenner-Schlumberger Array).

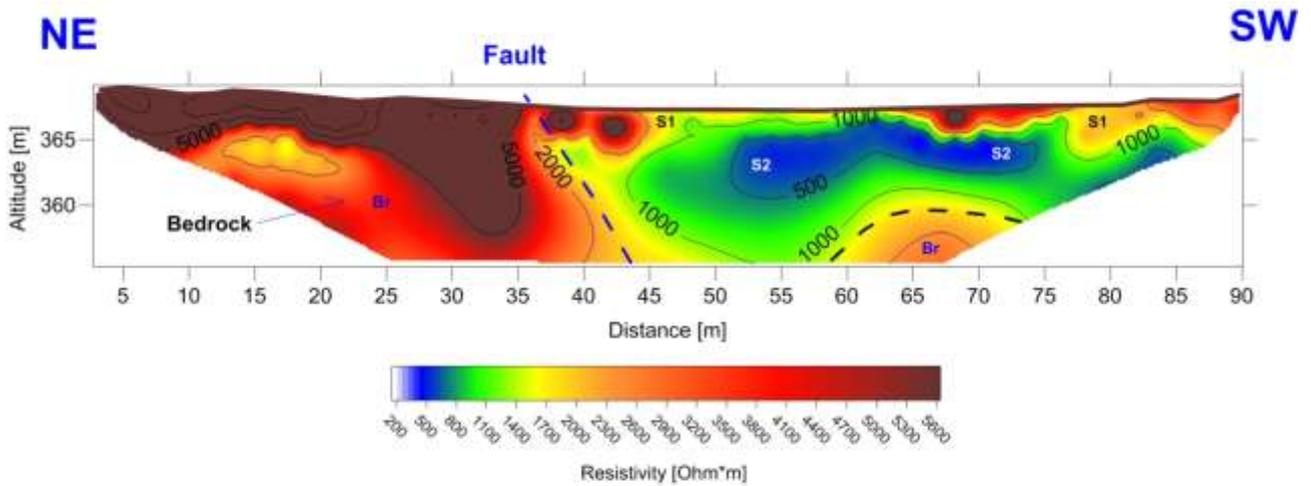


Figura 14 2D Electrical Resistivity Model with Residual RMS Error of 3.0 %, Generated from Line L02 (Wenner-Schlumberger Array)

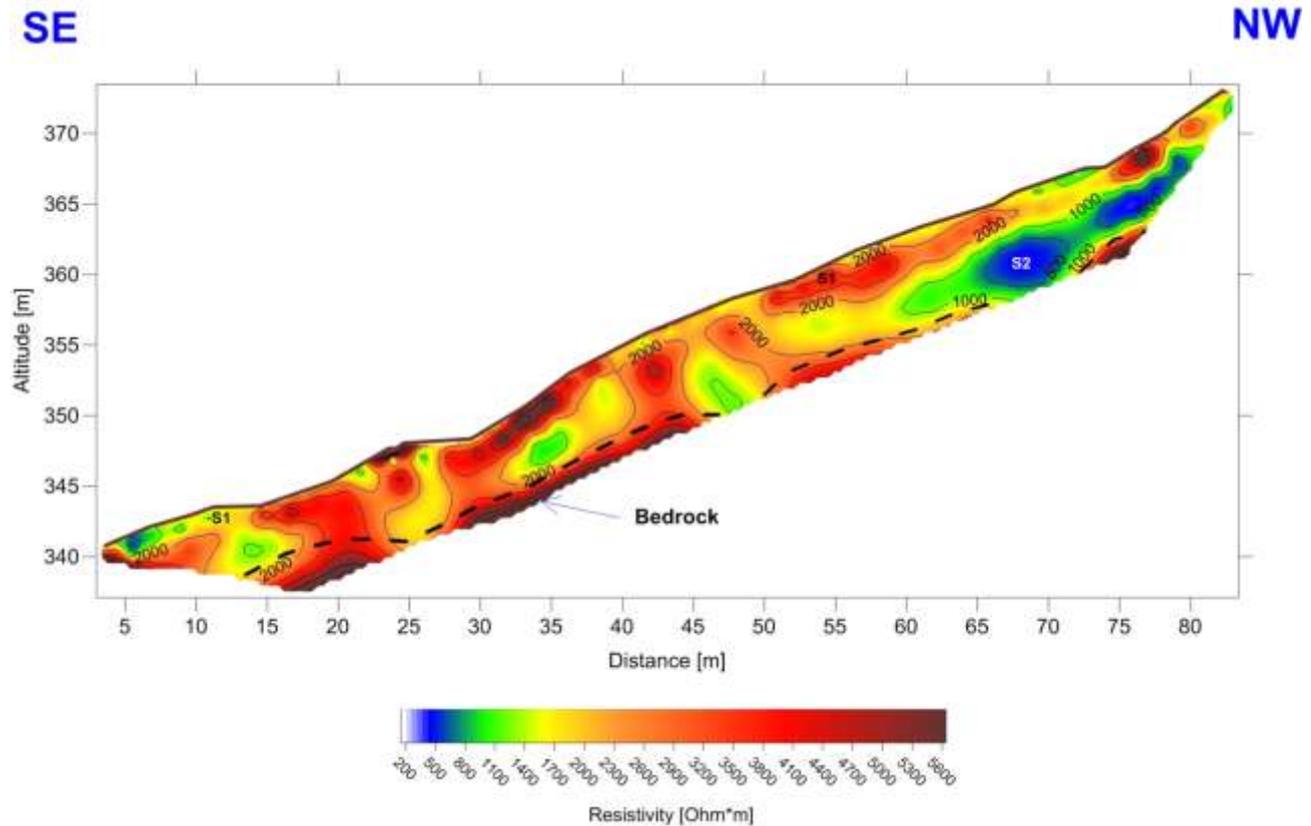


Figura 15 2D Electrical Resistivity Model with Residual RMS Error of 5.6 % for the Line L03 (Dipole-Dipole Array)

La linea nera tratteggiata tracciata nella figura 13 indica l'interfaccia presunta del suolo incoerente con il substrato roccioso granitico intatto. La maggiore profondità del substrato può essere osservata nella parte centrale del profilo elettrico. Il modello 2D lungo la linea L02, nel punto in cui interseca la linea L01 in corrispondenza dell'elettrodo 24, mostra un forte contrasto di resistività laterale. In corrispondenza della superficie, dalle osservazioni geologiche di questa anomalia di resistività si capisce che essa è legata alle caratteristiche strutturali del basamento di granito. In particolare, la linea blu tratteggiata, tracciata in figura 14, viene interpretata come errore normale. Anche in questo modello vi è lo stesso alto strato resistivo correlato con materiali grossolani e secchi con spessori da 0,5 a 2 metri. Il modello L03 tracciato in figura 15 invece mostra una distribuzione di resistività più complicata. In particolare, vi è lo stesso strato superficiale ad alta resistività con spessore variabile di circa 2-3 metri, invece il secondo strato è più resistente rispetto al caso precedente con valori minimi di resistività ad profondità maggiore (circa 500 Ω m). A profondità

compresa tra i 4 e gli 8 metri i valori di resistività superano i 2.000-3.000 Ωm , in accordo con la presenza substrato roccioso.



Figura 16 Visualizzazione 3D dei risultati delle tomografie elettriche.

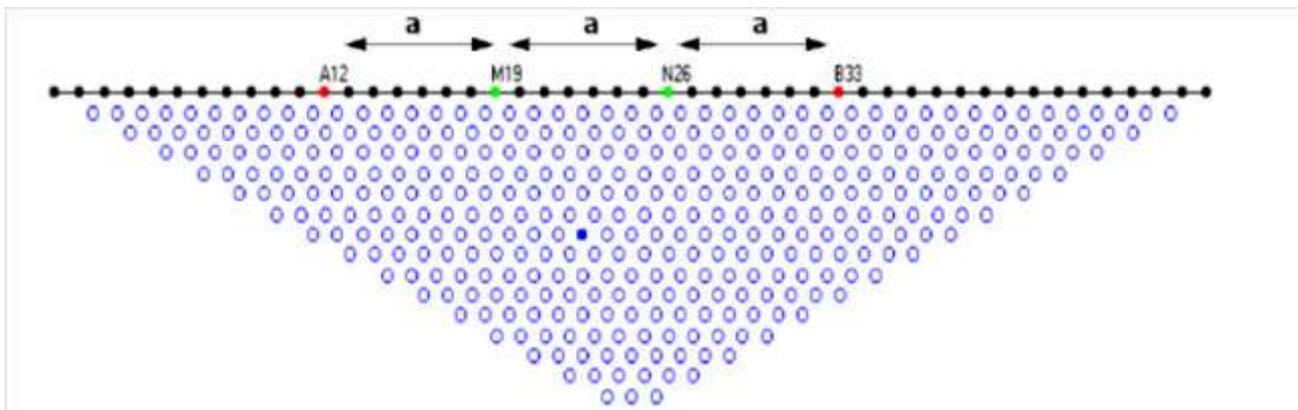


Figura 17 Esempio di quadripolo Wenner (Manuale Syscal pro)

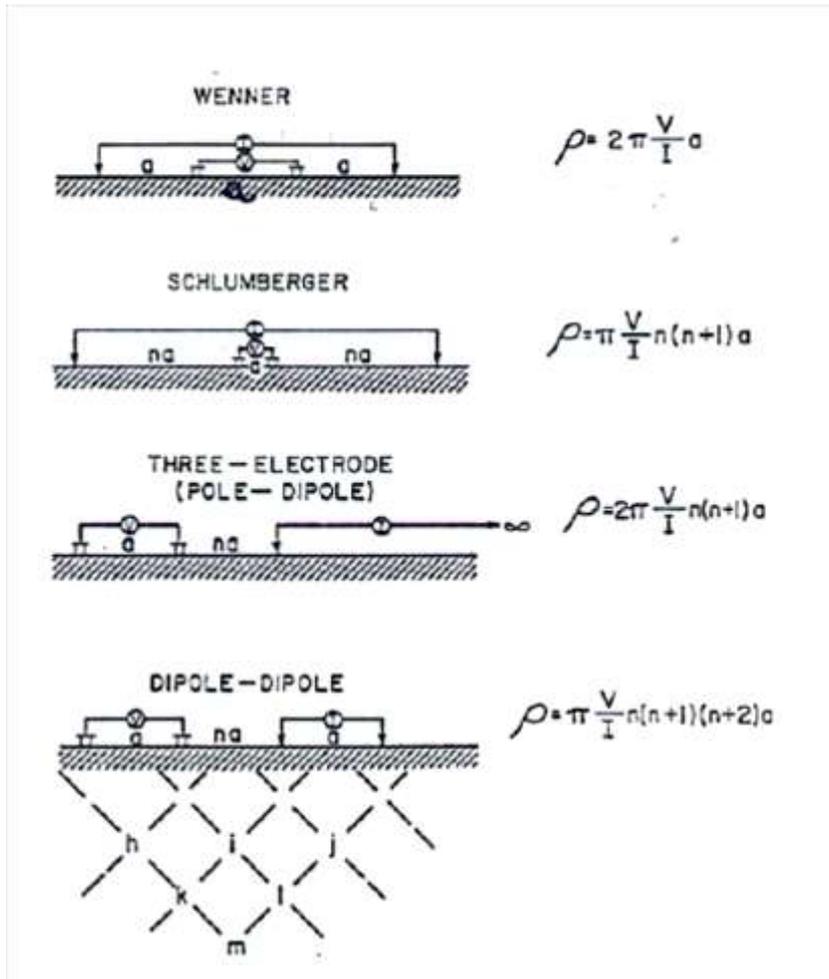


Figura 18 (da Santarato G.)

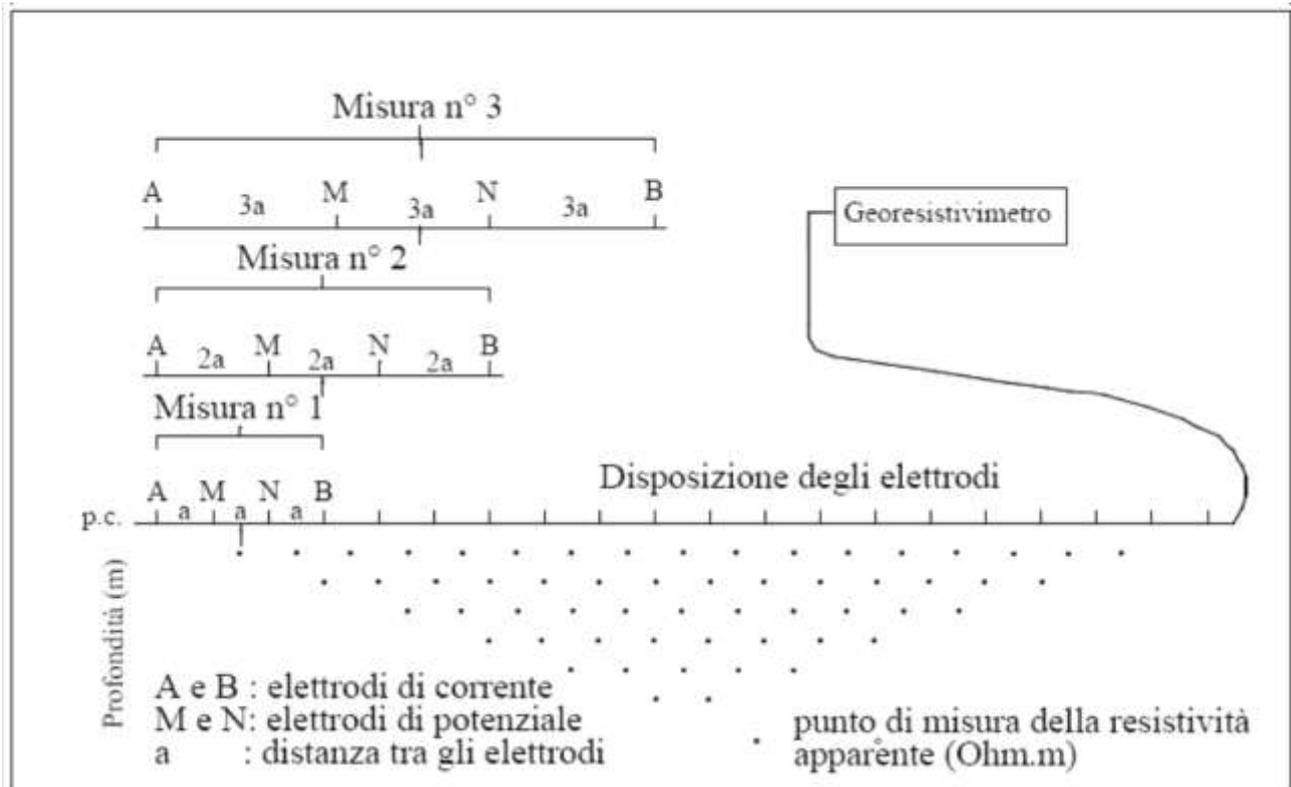


Figura 19 (da Santarato G.)

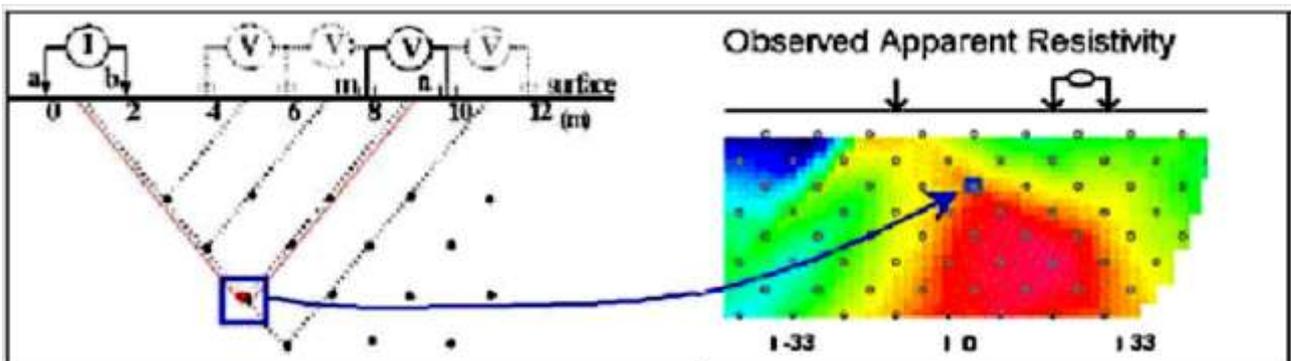


Figura 20 Come si ottiene una pseudo sezione con il software (da Santarato G.)

Questo quadro deve essere reinterpretato in modo da poter sostituire alle resistività apparenti la reale geometria della distribuzione ed i valori della resistività reale. (Santarato G. – Lezioni di geofisica applicata – Geoelettrica, 2008- dispense di lezione).

6.2 Indagini geotecniche

Nello stesso pendio state effettuate indagini geotecniche in modo da trovare le proprietà fisiche (parametri di comportamento meccanico) dei suoli. In particolare, sono stati eseguiti tre test di penetrazione dinamica non standard utilizzando un

penetrometro leggero (con massa di 30 kg e altezza di caduta 0,20 m). I campioni di terreno raccolti per le prove di laboratorio, sono stati utilizzati per l'analisi granulometrica e la classificazione del terreno. Inoltre, delle prove di taglio diretto sono state eseguite per definire i parametri di rottura del terreno (attrito angolo φ e coesione c'). Gli attributi dei campioni di terreno sono stati elaborati e sono riassunti nella tabella 2. In particolare, i campioni V01 e V02a sono stati presi nei punti S01 e S02 nella zona incendiata, a una profondità di circa 1,2 e 0,3 m dalla superficie. Il campione V02b invece è stato raccolto vicino al punto S02 nella parte superiore del pendio colpito, lungo la ERT L01. Inoltre, lungo il pendio dove è stata acquisita la ERT L03, sono stati raccolti due campioni, il campione V03 in un periodo precedente all'incendio e il campione V04 dopo l'incendio, nella zona bruciata. È possibile osservare che i dati relativi ai campioni di terreno presi dopo il passaggio del fuoco mostrano la riduzione del coefficiente di coesione con un aumento dell'angolo di attrito. In altre parole i materiali assumerebbero un prevalente comportamento di attrito rispetto alla condizione precedente. Tuttavia, questo effetto si limita solo ad uno strato molto superficiale con spessore di circa 0,5 metri. Il metodo del pendio indefinito impone la conoscenza di alcune caratteristiche del materiale. In particolare, i parametri che compaiono nel calcolo sono il peso di volume, l'angolo di attrito e la coesione del terreno costituente il potenziale corpo di frana, le caratteristiche geometriche (spessore della coltre detritica superficiale, inclinazione del versante), e le caratteristiche idrauliche (pressioni neutre agenti alla base del concio di terreno. Il fattore di sicurezza è stato determinato in condizioni di terreno asciutto e considerando che in caso di pioggia si formi un moto di filtrazione con linee di flusso parallele alla superficie di rottura. Inoltre, a causa dell'assenza di dati idrogeologici approfonditi, l'analisi è stata condotta simulando differenti profondità della superficie della falda temporanea.

Soil Sample ID	Friction Angle [°Sess.]		Cohesion [kPa]		Unit Weight [kN/m ³]		Depth [m]	Sampling Point ID
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post		
V01	34.0		16.39		19.02		1.2	S01
V02a	33.6		23.87		18.30		0.3	S02
V02b		36,1		12,06		19.35	0.3	S02
V03	32.0		25.78		18.16		1.0	S03
V04		36.0		11.01		18.00	0.3	S04

Tabella 2 Valori di coesione ed angolo di attrito pre e post incendio per i diversi campioni analizzati.

6.2.1 Prova di taglio diretto

L'apparecchio di taglio diretto è composto da due parallelepipedi a base quadrata, i quali possono traslare lungo una direzione orizzontale prestabilita. All'interno di questa scatola a base quadrata è alloggiato il campione di materiale, sulle cui estremità sono inseriti dei fogli di carta filtrante e due pietre porose per garantire il passaggio dell'acqua. Sulla parte sommitale del campione è presente un capitello metallico con una sede in cui è applicato un contatto sferico per la trasmissione delle tensioni assiali. La prova consiste essenzialmente in due fasi: durante la prima parte della prova viene applicato un carico assiale normale al provino, il quale è quindi soggetto ad un processo di consolidazione; durante la seconda fase, detta di rottura, il provino di terreno viene portato a rottura tramite l'applicazione di una forza di taglio. La prova viene ripetuta con un carico assiale crescente (100 - 200 - 300 kPa) almeno tre volte. La velocità della prova dipende dai materiali da analizzare al fine di garantire le condizioni di drenaggio del materiale. In particolare, valori di riferimento tipici proposti in letteratura sono 10-4 mm/s nel caso di provini di argilla, e 10-2 mm/s nel caso di sabbie. Tuttavia, la prova di taglio diretto presenta alcune limitazioni: in particolare, stabilisce a priori la superficie di rottura del materiale, l'area A del provino diminuisce durante l'avanzamento della fase di taglio, inoltre, la pressione interstiziale non può essere controllata. In figura 21 è riportato uno schema semplificato dell'apparecchiatura utilizzata.

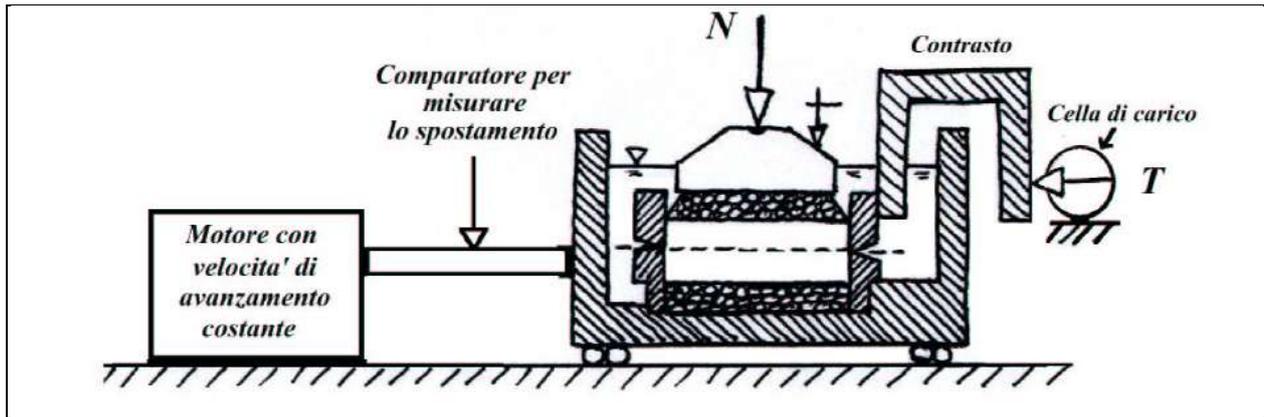


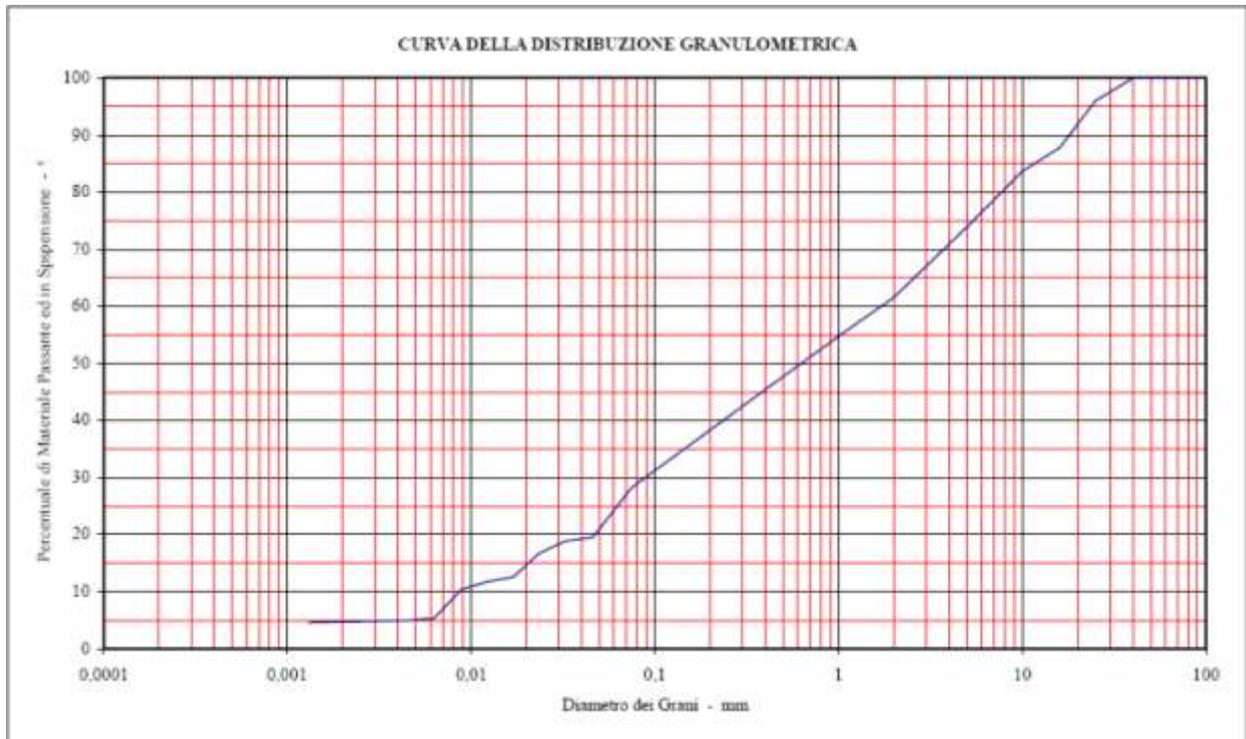
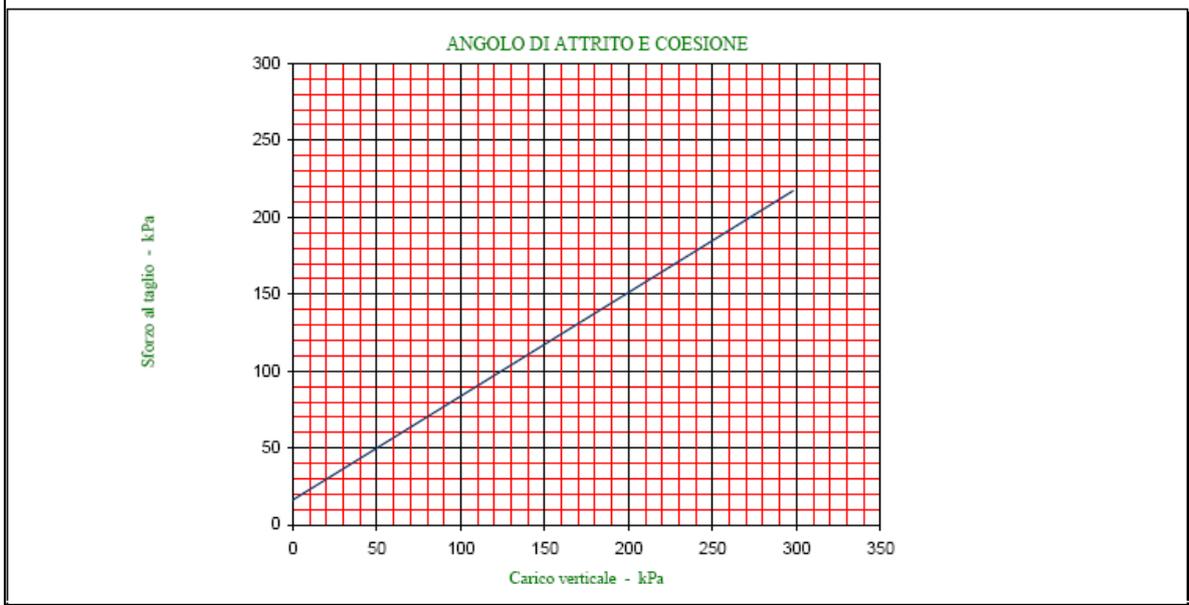
Figura 21 Schema della cella di taglio diretto

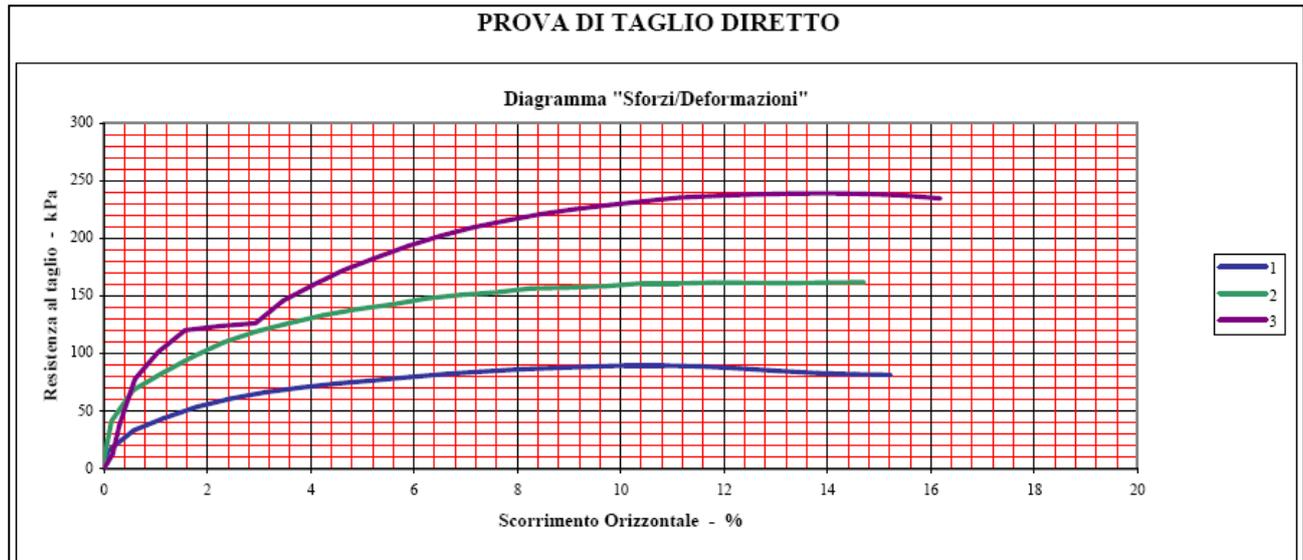


Figura 22 Apparecchio di taglio diretto utilizzato

LIMITI ED INDICI DI ATTERBERG (CNR-UNI 10014)				INDICE DI GRUPPO (CNR-UNI 10006)	
LIMITE LIQUIDO (%)	29	INDICE DI PLASTICITA	5	CLASSIFICAZIONE (CNR-UNI 10006)	A 4
LIMITE PLASTICO (%)	24	LIMITE DI RITIRO (%)	=====	CLASSIFICAZIONE (U.S.C.S.)	ML

Tipo di prova: non consolidata su provini ricostruiti		Velocità di scorrimento: 0,60 mm/min = 1,00 % della lunghezza del provino							
CARATTERISTICHE INIZIALI				CONSOLIDAZIONE					
Umidità iniziale	%	19,20	19,20	19,20	Carico verticale	kPa	=====	=====	=====
Densità naturale	kN/m ³	19,01	18,90	19,14	Variazione di volume	%	=====	=====	=====
Densità secca	kN/m ³	15,94	15,86	16,06	Peso di volume secco	kN/m ³	=====	=====	=====
Peso specifico dei grani	kN/m ³	=====	=====	=====	Indice dei vuoti	e	=====	=====	=====
Indice dei vuoti	e	=====	=====	=====	ROTTURA				
Grado di saturazione	%	=====	=====	=====	Carico verticale	kPa	101,99	200,06	298,12
Umidità a fine prova	%	21,19	20,97	21,94	Scorrimento orizzontale	%	=====	=====	=====
ANGOLO DI ATTRITO				° sess.	34,0				
COESIONE		kPa	16,39		Defomazione verticale	%	=====	=====	=====
					Sforzo al taglio	kPa	80,46	160,51	212,63





6.2.2 Analisi di stabilità del pendio

L'analisi statica del pendio è stata eseguita utilizzando il Metodo all' equilibrio limite. Questo approccio alla valutazione della stabilità è trattato assumendo il suolo rigido che segue una deformazione perfettamente plastica e con il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Per determinare la superficie critica a scorrimento circolare (corrispondente al fattore di sicurezza minimo FS), l'analisi della stabilità è stata eseguita per diversi cerchi concentrici con diverso raggio. Il valore minimo è trovato calcolando ogni determinato fattore di sicurezza FS in funzione del relativo raggio. Il numero così trovato è il coefficiente di sicurezza legato al centro comune dei cerchi considerati. Ripetendo la stessa procedura per le diverse posizioni del centro si può tracciare una mappa della variazione del fattore di sicurezza. Se questa superficie mostra minimi multipli significa che ci sono più possibili superfici di rottura critiche.

I dati risultanti dalla tomografia elettrica incrociati con quelli delle misure SPT, sono stati in grado di restituire i modelli del sottosuolo in 2D. Associando i parametri di resistenza al taglio ottenuti dai test di laboratorio con i rispettivi materiali, il fattore di sicurezza è stato determinato considerando una superficie piatta (metodo dei conci e del pendio indefinito) di scorrimento o circolare (metodi Fellenius e semplificato di Bishop) o di forma irregolare (metodo semplificato Janbu) . Inoltre, senza modificare le caratteristiche geometriche dei modelli, le simulazioni sono state ripetute inserendo i parametri meccanici ottenuti dai campioni del terreno prelevati dopo il passaggio dell' incendio, introducendo nei modelli uno strato molto superficiale con spessore circa 0,50 metri che risente dell' effetto del fuoco sul suolo. Questi metodi differiscono per le

varie ipotesi sulle forze agenti sui lati delle porzioni di pendio. In particolare, il metodo Fellenius o il metodo ordinario ignorano sia taglio interstiziale che le forze interstiziali e forze normali e soddisfano solo il momento di equilibrio (Fellenius 1936). Questo metodo è conservativo perché porta ad una sottostima del fattore di sicurezza rispetto alle soluzioni ottenute da altri metodi più accurati. Altri metodi applicati consistono in variazioni e filtri del metodo ordinario. Il metodo semplificato di Bishop (Bishop 1955) comprende forze normali interstiziali ma ignora forze di taglio interstiziali. Anche in questo caso solo il momento di equilibrio è soddisfatto. Considerando che il metodo semplificato Janbu (Janbu 1973) è simile al metodo Bishop perché comprende le forze normali e ignora solo le forze di taglio interstiziali. La differenza tra il metodo Bishop e il metodo Janbu è che il secondo soddisfa solo l'equilibrio della forza orizzontale, rispetto al momento di equilibrio.

Questi metodi sono stati applicati per determinare il coefficiente di sicurezza critico con un arco circolare di rottura. I coefficienti minimi di sicurezza trovati sono riportati nella Tabella 3. La figura 23 mostra le superfici critiche scorrimento ottenute per la tomografia lineare L03 con il Metodo Bishop.

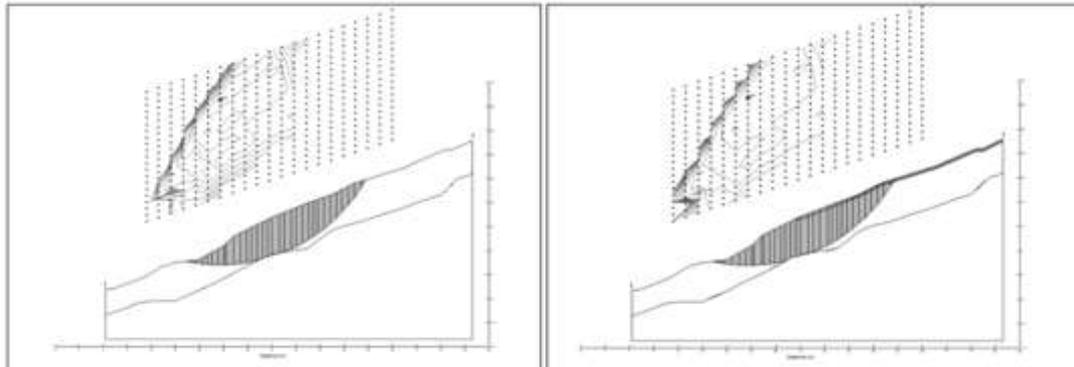


Figura 23 Arco circolare critico. Superficie di scivolamento per il modello L03 ottenuto con il metodo semplificato di Bishop. E' possibile osservare l'introduzione di uno spessore superficiale sottile che simula la presenza del suolo bruciato con parametri meccanici modificati dalla combustione dei componenti organici.

Tuttavia, i risultati ottenuti non mostrano un cambiamento significativo del coefficiente di sicurezza tra il modello originale e il modello modificato per tenere conto del materiale alterato dopo il passaggio del fuoco.

	Ordinario		Bishop		Janbu	
Fs minimum	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Model L01	3.083	3.049	3.962	3.906	3.700	3.652
Model L03	2.299	2.291	2.417	2.412	2.261	2.252

Tabella 3 Risultati relativi al coefficiente di sicurezza ottenuto con i diversi modelli.

Quando la pendenza si estende per una distanza relativamente grande ed ha un profilo di sottosuolo uniforme può essere analizzata come una pendenza infinita. La linea di rottura si presume parallela alla superficie del pendio e il metodo dell'equilibrio limite può essere applicato facilmente. Se un pendio saturo è caratterizzato da infiltrazioni parallele alla superficie topografica come mostrato in figura 24, la stessa teoria dell'equilibrio limite può essere applicata per determinare il coefficiente di sicurezza.

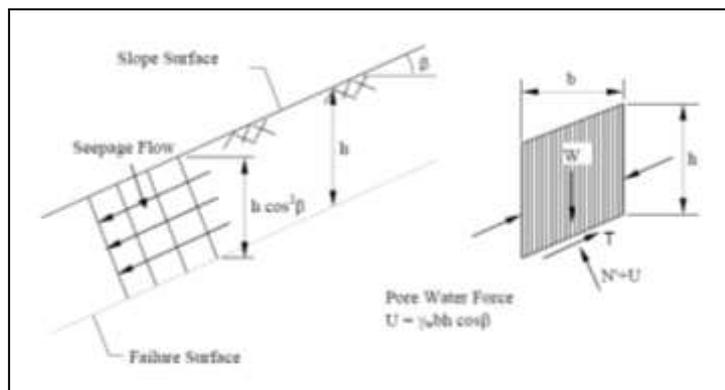


Figura 24 Modello del pendio indefinito con infiltrazione parallela alla superficie di scorrimento.

Tuttavia, in questa condizione FS dipende dai parametri c' e ϕ' che vengono utilizzati per indicare il coefficiente di coesione e l'angolo di attrito. Anche qui la linea delle infiltrazioni si presume essere situata ad un'altezza normalizzata m , sopra la superficie di rottura. In questo caso, FS assume la seguente equazione:

$$FS = \frac{c' + [(1 - m)\gamma + m\gamma']h \cos^2 \beta \tan \varphi'}{[(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] h \cos \beta \sin \beta}$$

dove $m=h_w/h$ e $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

γ and γ_{sat} sono rispettivamente il peso specifico unitario del suolo secco e del suolo saturo e γ_w è il peso specifico dell'acqua.

Questo metodo è stato applicato per stimare il coefficiente di sicurezza all'interfaccia tra lo strato superficiale, colpito dagli effetti del fuoco, e il materiale sottostante. Inoltre, al fine di considerare l'effetto topografico, il coefficiente FS è stato determinato in funzione della pendenza. Diverse condizioni di saturazione dello strato superficiale sono state assunte con flusso di infiltrazione parallelo al piano di scorrimento. I risultati ottenuti per entrambi i modelli L01 e L03 presentano elevati valori di coefficiente di sicurezza, compresi tra il 2,9 e il 21,8 per il profilo L01 e tra 2,4 e 14,5 per il profilo L03. Tuttavia, il confronto tra i valori di FS, calcolati prima e dopo l'incendio, presenta una riduzione significativa tra due condizioni diverse.

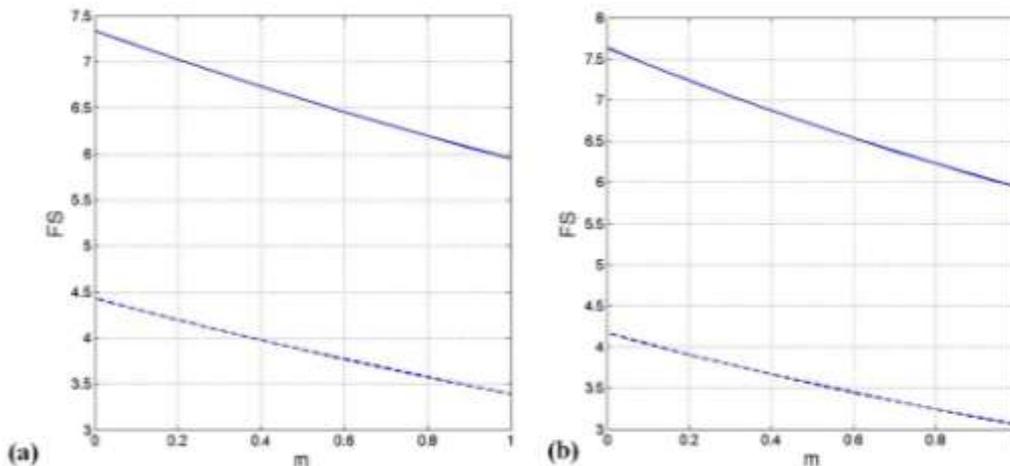


Figura 25 Variazione del fattore di sicurezza per lo stesso pendio al variare del parametro m prima (linea continua) e dopo il passaggio del fuoco (linea tratteggiata). (a) L01 Profile - (b) L03 Profile

È possibile osservare la differenza tra la funzione solida, che denota i FS prima dell'incendio per diversi valori di m e la funzione tratteggiata, che indica i FS calcolati utilizzando i parametri di resistenza al taglio del terreno bruciato. La Figura 26 mostra l'andamento della variazione relativa percentuale del fattore di stabilità in relazione alla pendenza del terreno. La variazione percentuale, calcolata secondo la seguente espressione:

$$\Delta FS [\%] = \frac{FS_{Pre} - FS_{Post}}{FS_{Pre}} \cdot 100$$

mostra la riduzione del coefficiente di stabilità nell'intervallo dal 37.5 al 44 % per il profilo L01 e dal 42.5 al 51.5 % per il profilo L03. Inoltre questo trend aumenta con l'aumentare della pendenza.

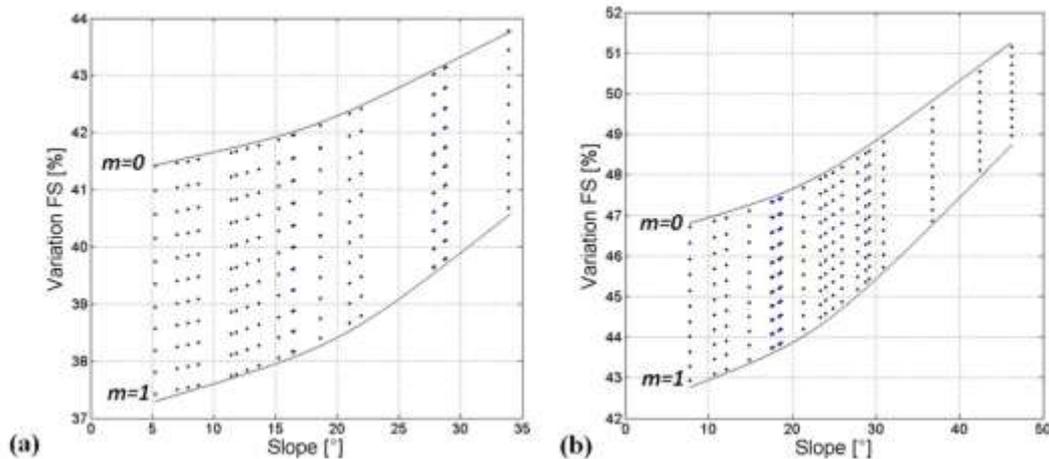


Figura 26 Percentuale di riduzione del fattore di sicurezza FS per differenti angoli di attrito tra valori di $m=0$ (suolo asciutto) ed $m=1$ (suolo saturo), considerando l'infiltrazione dell'acqua parallela alla superficie di scorrimento per i profili L01 (a) e L03 (b).

7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI RELATIVI ALLA STABILITÀ DEL PENDIO

I risultati del sondaggio geofisico indicano che lo strato superficiale del terreno si estende in profondità per un raggio di 2m di profondità ed è caratterizzato da elevati valori di resistività che indicano materiali secchi e detritici. Il secondo strato è all'interno di un range che varia tra 2 e 8 m con resistività variabile da 200 a 800 Ωm . Il terzo strato geoelettrico è il fondamento roccioso che presenta valori di resistività superiore a 2.000 Ωm . I risultati delle tomografie di resistività elettrica sono ben correlati con le prove penetrometriche dinamiche. Inoltre, le indagini di resistività 2D hanno fornito preziose informazioni sulla variazione laterale e verticale del basamento roccioso. Le caratteristiche del pendio sono state analizzate con prove geotecniche prima e dopo il passaggio del fuoco. I risultati delle prove di taglio diretto eseguite su campioni di suolo bruciati mostrano una riduzione parziale del fattore di coesione, rispetto al materiale originale, insieme con un debole aumento dell'angolo di attrito. In

particolare, il metodo del pendio indefinito si è dimostrato efficace nel sottolineare la riduzione del fattore di sicurezza all'interfaccia tra la superficie del suolo, colpito dagli effetti della combustione, e gli strati di base.

Da queste analisi elettriche e geochimiche è emersa una seppur modesta variazione dei parametri di stabilità in senso peggiorativo, certamente dovuta al passaggio dell'incendio, a parità di altre condizioni. Ciò conferma quanto già ripreso in diversi studi e sottolinea l'importanza di un monitoraggio costante e dell'applicazione di tecniche di sistemazione del versante per scongiurare il peggioramento della situazione di stabilità in un territorio già compromesso e per limitare il rischio di erosione superficiale.

8. GEOCHIMICA

Per valutare un altro aspetto degli effetti del passaggio di un incendio si è analizzato lo stesso versante dal punto di vista della variazione geochimica. La GEOCHIMICA come è stata originariamente definita da Goldschmidt ed in seguito da Mason, ha come oggetto la determinazione dell'abbondanza assoluta e relativa degli elementi chimici nella Terra, la loro distribuzione e migrazione. Questa scienza, che nasce nella prima metà del secolo XIX, per approfondire il suo campo di ricerca, è costretta a fare ricorso a numerose discipline quali la mineralogia, la chimica, la fisica ecc, in quanto si occupa di dispersione e di migrazione degli elementi nelle diverse geosfere, di isomorfismo, di paragenesi, di radiogeochimica ecc.

La prospezione geochimica si basa sul fatto che la maggior parte dei giacimenti (sorgenti) ed in particolare quelli metalliferi, possiede una aureola mineralizzata di dispersione primaria o secondaria. Pertanto lo studio, in una data regione, della presenza di certi elementi in diversi materiali (suoli, rocce, acque, piante, aria, batteri ecc.), permette di definire, per gli elementi ricercati, l'eventuale presenza di tenori anomali in rapporto al tenore di fondo dell'ambiente o di capire se un determinato evento, come nel nostro caso può determinare anomalie, variazioni ed in certi casi anche inquinamento.

Per gli stessi motivi, tale strumento è essenziale anche per la ricerca e la caratterizzazione di un territorio influenzato da attività antropica.

Le anomalie di concentrazione (positive) o di impoverimento (negative), possono derivare:

- da dispersione primaria attorno ad un corpo mineralizzato;
- da fissazione, sotto particolari condizioni fisico chimiche, di elementi che migrano in forme diverse da sorgenti arricchite;
- da variazioni nella natura delle formazioni geologiche presenti;
- dall'intervento antropico.

L'interpretazione di queste anomalie deve tener conto di tutti i dati geologici, strutturali, metallogenici, ecc. disponibili, della regione oggetto di indagine.

I diversi elementi analizzati nei campioni si trovano generalmente allo stato di tracce, con tenori che possono variare, a seconda del campione e della sua natura (suolo, roccia, acque, ecc.) da un milligrammo a qualche centinaio di grammi per tonnellata. Queste variazioni dei tenori e il loro bassissimo valore, necessitano di metodi analitici appropriati.

La Prospezione Geochimica presenta alcuni caratteri particolari che possono essere così riassunti:

- a) utilizza metodi diretti;
- b) costituisce un legame logico tra minerogenesi e metodi di prospezione;
- c) è meno costosa di molti altri metodi di ricerca;
- d) è estremamente polivalente (più elementi con lo stesso campione);
- e) utilizza i campioni per diversi scopi.

L'anomalia geochimica viene definita come la deviazione del contenuto in metalli (elementi) dalla norma (Reimann & Garrett, 2005; Marcello A. et al., 2008).

Alcuni elementi si comportano da traccianti (pathfinder) e come tali sono importanti per il prospektore che deve prenderli in considerazione, tenendo presente che essi debbono avere sempre caratteristiche analoghe agli elementi primari ricercati e, soprattutto, una relativa mobilità durante i processi geologici che hanno interessato la zona. Nella figura sottostante vengono riportate le più frequenti associazioni tra elementi in natura.

Gruppo	Associazione
Elementi generalmente associati	K-Rb Ca-Sr Al-Ga Si-Ge Zr-Hf Nb-Ta Terre rare, La, Y Pt-Ru-Rh-Pd-Os-Ir
Rocce plutoniche	
Associazione generale (elementi litofili)	Si-Al-Fe-Mg-Ca-Na-K-Ti-Mn-Zr-Hf-Th-U-B-Be-Li-Sr-Ba-P-V-Cr-Sn-Ga-Nb-Ta-W-Terre rare
Associazioni specifiche	
rocce ignee felsiche	Si-K-Na
Rocce ignee Alcaline	Al-Na-Zr-Ti-Nb-Ta-F-P-Terre rare
Rocce ignee mafiche	Fe-Mg-Ti-V
Rocce ultramafiche	Mg-Fe-Cr-Ni-Co
alcuni differenziati pegmatitici	Li-Be-B-Rb-Cs-Terre rare-Nb-Ta-U-Th
Alcuni depositi di contatto metasomatico	
Feldspati potassici	K-Ba-Pb
Molti altri minerali potassici	K-Na-Rb-Cs-Tl
Minerali ferromasiaci	Fe-Mg-Mn-Cu-Zn-Co-Ni
Rocce sedimentarie	
Ossidi di Fe	Fe-As-Co-Ni-Se
Ossidi di Mn	Mn-As-Ba-Co-Mo-Ni-V-Zn
Fosforiti	P-Ag-Mo-Pb-F-U
Argilliti nere	Al-Ag-As-Au-Bi-Cd-Mo-Ni-Pb-Sb-V-Zn

Figura 27 esempio di associazione geochemica degli elementi (dalle dispense delle lezioni di caratterizzazione geochemica del dott. Valera).

8.1 La Geochemica in Sardegna

I dati utilizzati per la costruzione della carta geochemica della Sardegna provengono da campionature la maggior parte delle quali realizzate in passato per scopi esclusivamente di ricerca mineraria, in cui le aree maggiormente antropizzate non

sono state prese in considerazione. Inoltre, le campagne di campionamento hanno interessato prevalentemente i terreni paleozoici e subordinatamente le vulcaniti terziarie, trascurando le formazioni sedimentarie terziarie e quaternarie ritenute non interessanti da un punto di vista minerario, dove, almeno in Sardegna, è più importante l'influenza antropica. D'altra parte, proprio per questo motivo, le carte rappresentano, per la maggior parte delle aree, un ottimo esempio di *stato geochimico naturale* del territorio esaminato. Le anomalie rilevate, come ad esempio nel caso dell'arsenico, sono da considerarsi in molti casi di origine naturale, dovute alle caratteristiche geologiche del sito e dell'area interessata dal campionamento, visto che si tratta di campioni *stratificati*. Talora i valori superano abbondantemente, a volte di alcuni ordini di grandezza, i *valori limite accettabili* stabiliti dal D.Lgs. 152/06 e s.m.i.. Questo fatto da solo rappresenta meglio di ogni altro l'importanza del presente lavoro nel campo della caratterizzazione territoriale, uno degli indici di sostenibilità più importanti e punto fermo della componente ambientale per l'applicabilità dello sviluppo sostenibile. Dai dati in nostro possesso risulta che solo una parte del territorio è stato studiato e molto c'è ancora da fare in questo senso. Infatti come riportato nella tabella sottostante risulta che per alcuni elementi molte aree non sono state ancora adeguatamente indagate.

Elementi copertura	Sassari % copertura	Nuoro % copertura	Cagliari % copertura	Sardegna %
As	15%	30%	41%	27%
Cd	--	16%	38%	14%
Co	44%	60%	62%	55%
Cr	38%	58%	61%	51%
Hg	--	08%	--	4%
Pb	41%	59%	64%	54%
Se	--	09%	--	5%
V	12%	37%	37%	26%

Tabella 1: Percentuale delle aree campionate in Sardegna.

Uno dei risultati più importanti messo in luce dall'analisi delle carte, riguarda la fluttuazione dei valori degli elementi esaminati con il variare della litologia e delle caratteristiche geogiacimentologiche del territorio. Eccettuati alcuni casi, peraltro ben localizzati, in cui l'intervento dell'uomo ha mutato l'equilibrio naturale, come, ad

esempio, nel caso dei lavori minerari, i valori sono sempre riferibili alle caratteristiche del litotipo prevalente presente nel bacino sotteso dal punto di campionamento. Questa considerazione suggerisce che, al momento del campionamento, gran parte del territorio esaminato o non era stato ancora interessato sensibilmente dall'attività antropica, oppure che questa attività si svolgeva senza influenzare i valori geochimici naturali (background) degli elementi presi in considerazione dallo studio.

Come già accennato, i dati provengono da campionature la maggior parte delle quali realizzate in passato per scopi esclusivamente di ricerca mineraria, in cui le aree maggiormente antropizzate non sono state prese in considerazione. Inoltre, le campagne di campionamento hanno interessato prevalentemente i terreni paleozoici e subordinatamente le vulcaniti terziarie, trascurando le formazioni sedimentarie terziarie e quaternarie ritenute non interessanti da un punto di vista minerario, dove, almeno in Sardegna, è più importante l'influenza antropica. D'altra parte, proprio per questo motivo, le carte rappresentano, per la maggior parte delle aree, un ottimo esempio di *stato geochimico naturale* del territorio esaminato. Le anomalie rilevate, come ad esempio nel caso dell'arsenico, sono da considerarsi in molti casi di origine naturale, dovute alle caratteristiche geologiche del sito e dell'area interessata dal campionamento, visto che si tratta di campioni *stratificati*.

Nelle figure sottostanti si riportano i tenori dei principali elementi e la carta geochimica della Sardegna.

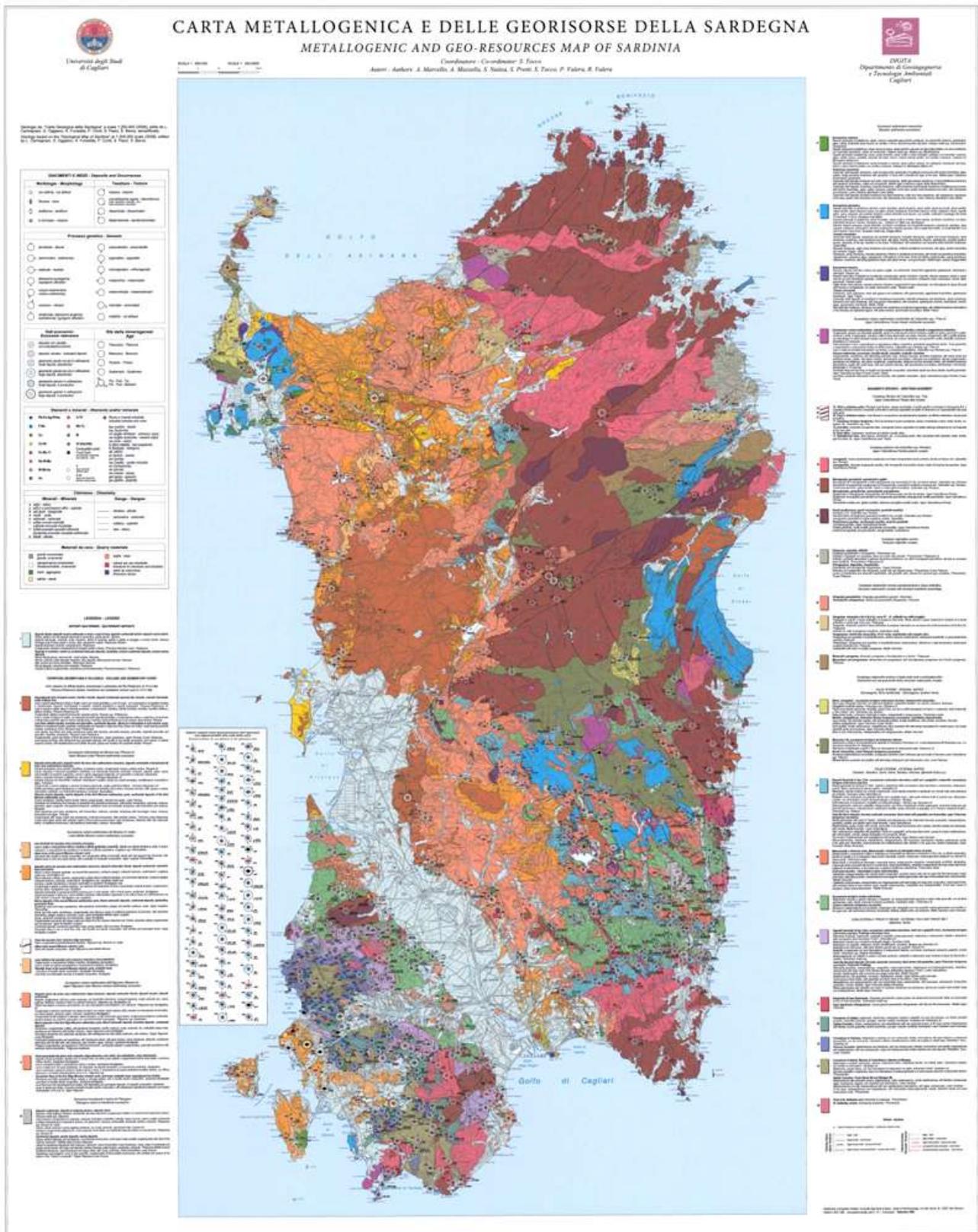


Figura 28 carta metallogenica della Sardegna.

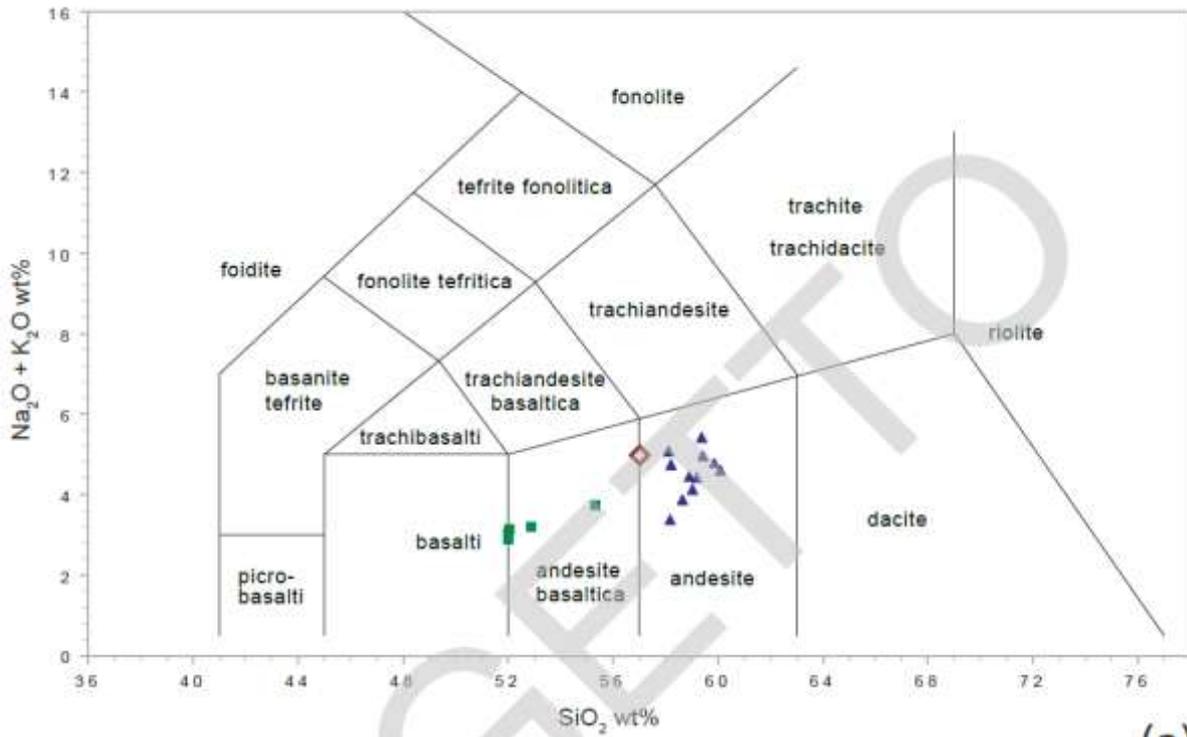


Figura 29 Diagrammi di classificazione delle vulcaniti oligo mioceniche foglio 547 Villacidro. Da progetto CARG.

Questi studi sulla Sardegna sono stati utilizzati come base per la nostra analisi. Dato che non era stato prelevato un campione di terreno per le analisi geochimiche che fosse antecedente all'incendio (così come era stato fatto invece per la geotecnica) sono stati presi come riferimento dei valori di fondo e per il confronto con le analisi post incendio, i valori dei dati dell'archivio dell'ex DIGITA (Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali) per gli elementi che risultavano più abbondanti o che mostravano una maggior variazione nel tempo, gentilmente forniti dal dottor Valera per le zone limitrofe all'area in studio.

8.2 GEOCHIMICA DEGLI INCENDI

E' noto che gli incendi modificano sostanzialmente non solo il paesaggio e la vegetazione ma anche le caratteristiche intrinseche dei suoli. Infatti si ha una modifica non solo a livello visivo ma anche chimico. Molti studi documentano la modifica delle caratteristiche geochimiche dei suoli dopo il passaggio di un incendio (es. Olivella 2006). Dopo un incendio, per esempio, si constata solitamente un innalzamento del pH sia per la demolizione termica degli acidi organici derivanti dal processo di

umificazione che per l'accumulo di ceneri alcaline. Questa variazione però avviene solo nello strato più superficiale di terreno.

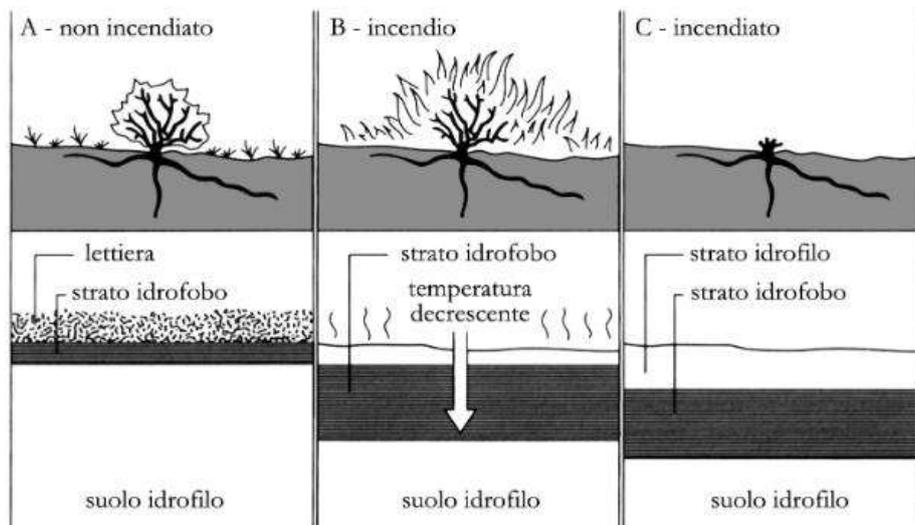


Figura 30 Modelli di sviluppo dello strato di suolo idrofobo dopo incendio nel chaparral californiano (da De Bano et al., 1977)

Procedendo in profondità diviene meno sensibile il divario rispetto alla zona non percorsa dal fuoco. Per questa ragione sono state fatte le analisi sul pH dei campioni prelevati in situ. Con il passare del tempo, mentre nello strato più superficiale non vi sono variazioni, in quello più profondo si constata un leggero aumento del pH per la percolazione dei prodotti di combustione trasportati dalle acque piovane. L'effetto alcalinizzante dell'incendio dura al massimo alcuni mesi, in quanto, per l'effetto delle precipitazioni, di solito si torna ai valori iniziali. (Bovio, Meloni, Zerbini)

Un altro aspetto che varia in seguito al passaggio del fuoco è il contenuto in carbonio che analogamente a quanto accade per il pH, aumenta subito nello strato più superficiale ed in un secondo tempo in quello più profondo. L'azoto ed il mercurio invece, vengono in parte volatilizzati e quindi nel terreno si nota una diminuzione del contenuto totale immediatamente dopo il fuoco. Con il passare del tempo l'azoto tende a riassumere i valori precedenti l'incendio. Dalla figura seguente si può anche vedere la differenza di quantità di azoto volatilizzato dai compartimenti del suolo secco, umido e della lettiera al variare della temperatura dell'incendio. Meno il suolo è umido e maggiore è la quantità di azoto volatilizzata, anche per temperature relativamente basse riferibili ad incendi di bassa entità. Analogo discorso per la lettiera, anche se in

questo caso per la volatilizzazione dell'azoto sono necessarie temperature maggiori, dell'ordine dei 700 - 800°C.

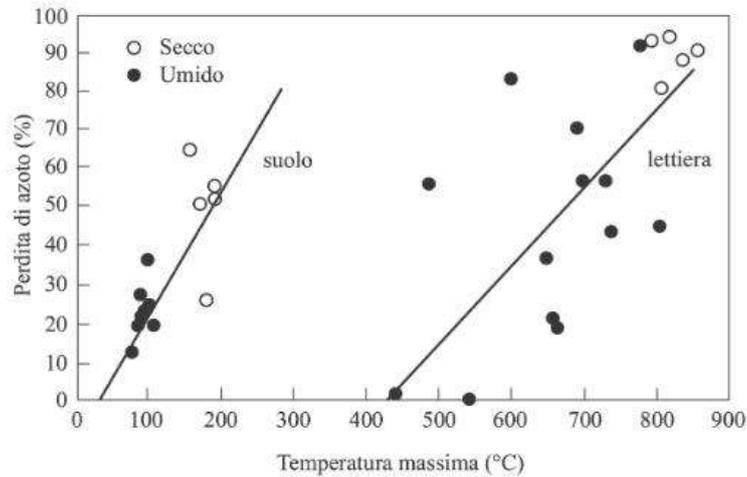


Figura 31 Volatilizzazione dell'azoto dai compartimenti del suolo e della lettiera in relazione alla temperatura massima raggiunta durante un incendio (da De Bano et al., 1977)

Per quanto riguarda le sostanze nutritive contenute nel terreno, gli effetti dell'incendio sono diversi a seconda dell'elemento considerato. Il potassio in genere tende ad aumentare di due-tre volte rispetto alla fase pre incendio, ma tende a ritornare al livello iniziale assai velocemente. Il fosforo in genere aumenta e si mantiene sopra il livello originario per tempi assai più lunghi rispetto agli altri elementi nutritivi. Si sono riscontrate situazioni in cui il contenuto in fosforo è rimasto più elevato per 4 anni dopo l'incendio. In alcuni casi invece, in versanti soggetti al pascolo e all'erosione superficiale in Sardegna il contenuto di fosforo è diminuito con il tempo (Ollesch, 1999). Nel sito in esame sono state effettuate delle analisi per verificare in che quantità e per quanto tempo queste modifiche siano attive. A titolo esemplificativo nella figura sottostante sono riportate le quantità medie di sedimento eroso per una pioggia pari a 60 mm/h. Si può constatare che più è scarsa la copertura vegetazionale, maggiore è la quantità di sedimenti erosi idrotrasportati.

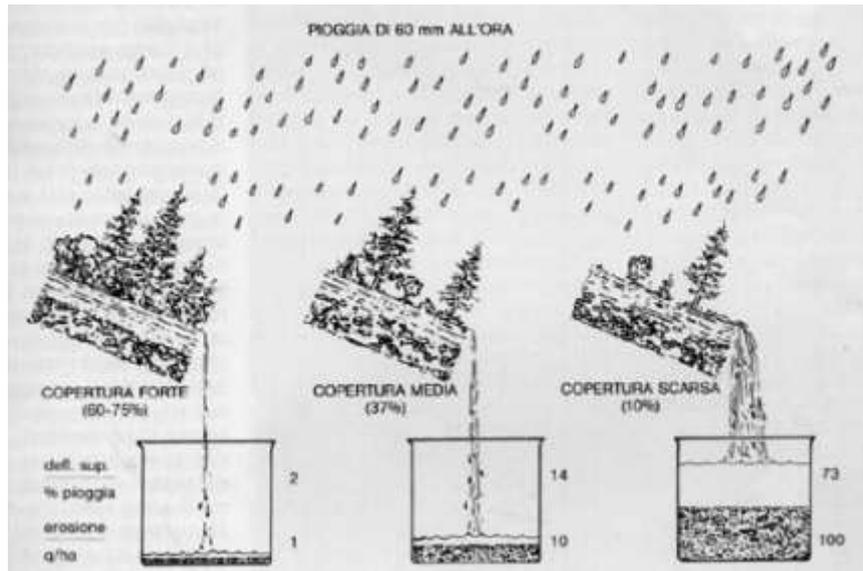


Figura 32 Quantità di sedimento eroso a parità di pioggia al variare della copertura vegetale.

8.3 Metodi di analisi e campionamento

I campioni di suolo analizzati sono stati prelevati a 10 cm di profondità, nello strato superficiale del terreno, lungo un impluvio, sono stati portati in laboratorio, essiccati, setacciati, quartati e macinati. Il residuo della quartatura è stato conservato nell'apposito archivio per eventuali studi successivi. Prima di iniziare il prelievo, si è provveduto a scorticare il terreno, togliendo lo strato più superficiale costituito solitamente da vegetazione e da sostanza organica. Quindi si è prelevato, mediante pala, il materiale, che è stato poi setacciato a secco, in loco, con un setaccio da 5 mm, per eliminare eventuali ciottoli e grandi radici. da ogni campione sono stati ricavati 1000 - 1500 grammi di passante.

Nella figura 33 sono riportati in rosso i punti di campionamento della prima campagna di prelievo e in nero quelli che sono stati aggiunti in un secondo momento per valutare anche suoli che non fossero considerabili stream sediment.



Figura 33 Punti di campionamento sul versante in esame.

8.4 Trattamento dei campioni

I campioni prelevati sono stati essiccati, lasciandoli negli stessi sacchetti di raccolta, in una stufa ventilata, per eliminare l'eventuale acqua e l'umidità, facendo attenzione a non oltrepassare i 40 gradi centigradi, al fine di non provocare la sublimazione degli elementi più volatili, quali il mercurio.

Successivamente si è passati alla setacciatura a secco, con un setaccio da 2 mm, per eliminare preventivamente sia i frammenti di resti organici, sia grossi grani

mineralizzati al fine di limitare "l'effetto pepita", e sia per avere un prodotto a granulometria omogenea rappresentativo del campione iniziale.

Quindi, sul passante, è stata eseguita la quartatura, fino ad ottenere un campione di circa 50 - 100 grammi, che è stato riposto in una bustina di plastica con la sigla corrispondente al campione.

I campioni così ottenuti sono stati sottoposti a macinazione, mediante mulino con giare di agata, che ha il vantaggio di non essere inquinante e di avere una buona velocità; la polvere prodotta, fine e omogenea e con una granulometria compresa intorno ai 150 mesh, è stata inserita in apposite bustine riportanti la sigla del campione ed inviata ad un laboratorio per le determinazioni analitiche. Le rimanenti frazioni provenienti sia dalla quartatura del campione tal quale, sia dalla quartatura dopo la macinazione, sono state archiviate per eventuali studi successivi.

Un laboratorio per le analisi chimiche ha effettuato l'analisi su diversi campioni prelevati subito dopo l'incendio e a distanza di sei mesi l'uno dall'altro per due anni consecutivi. I campioni sono stati inviati per essere analizzati presso il gruppo Actlabs in Canada che offre un servizio rapido ed economico rispetto a quelli a disposizione nel territorio sardo (<http://www.actlabs.com>). Il Gruppo Actlabs fornisce servizi di analisi e copre tutti gli aspetti di applicazioni di ricerca accademica per le funzioni di controllo di qualità di routine. I laboratori Actlabs forniscono servizi in molti campi, tra cui geochimico, petrolifero, industria mineraria, farmaceutico e ambientale. Il laboratorio Canadese a cui ci si è rivolti possiede dal 1998 una certificazione ISO IEC 17025. L'analisi di tipo Ultratrace 1 è stata effettuata su un campione di 0,5 g che viene digerito in acqua regia a 90 ° C in un microdigestore per 2 or . I campioni sottoposti a digestione sono diluiti e analizzati dallo strumento Perkin Elmer Sciex ELAN 6000 , 6100 o 9000 ICP / MS. Un controllo in - house è gestito ogni 33 campioni. Dopo ogni 15 campioni, è stato analizzato un campione duplicato di digestione. Lo strumento viene ricalibrato ogni 68 campioni .

Nella figura seguente vengono riportati gli elementi analizzati ed i parametri di calibrazione per ogni elemento espressi in ppm.

Code Ultratrace-1 Elements and Detection Limits (ppm)

Element	Detection Limit	Upper Limit	Element	Detection Limit	Upper Limit	Element	Detection Limit	Upper Limit
Ag	0.002	100	Ge*	0.1	500	S ⁺	1%	20%
Al*	0.01%	10%	Hf*	0.1	500	Sb*	0.02	500
As	0.1	10,000	Hg	10	10,000 ppb	Sc*	0.1	10,000
Au*	5 ppb	10,000 ppb	Ho*	0.1	1000	Se	0.1	10,000
B*	1	5,000	In*	0.02	500	Sm*	0.1	100
Ba*	0.5	6,000	K*	0.01%	5%	Sn*	0.05	200
Be*	0.1	1,000	La*	0.5	10,000	Sr*	0.5	5,000
Bi	0.02	2,000	Li*	0.1	10,000	Ta*	0.05	50
Ca*	0.01%	50%	Lu*	0.1	100	Tb*	0.1	100
Cd*	0.01	-	Mg*	0.01%	10%	Te	0.02	500
Ce*	0.01	10,000	Mn*	1	10,000	Th*	0.1	200
Co	0.1	5,000	Mo*	0.01	10,000	Ti*	0.001%	20%
Cr*	0.5	10,000	Na*	0.001%	5%	Tl*	0.02	500
Cs*	0.02	500	Nb*	0.1	500	Tm*	0.1	1,000
Cu	0.01	10,000	Nd*	0.02	5000	U	0.1	10,000
Dy	0.1	1000	Ni*	0.1	10,000	V*	1	1,000
Er*	0.1	1000	P*	0.001%	10%	W*	0.2	200
Eu*	0.1	100	Pb	0.01	5,000	Y*	0.01	500
Fe*	0.01%	50%	Pr*	0.1	1000	Yb*	0.1	200
Ga*	0.02	500	Rb*	0.1	500	Zn	0.1	5,000
Gd*	0.1	1000	Re	0.001	100	Zr*	0.1	5,000

Tabella 4 Elementi analizzati ed i parametri di calibrazione per ogni elemento espressi in ppm.

Analyte	Ti	S	P	Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Bi	Ca	Sc	V	Cr	Mn
Unit					pp											
Symbol	%	%	%	ppm	m	ppm	%	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
Detection limit	0	0.05	0.001	0.1	0.1	1	0.001	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.1	1	1	1
RS4	0.01	< 0.05	0.025	20.4	1.8	8	0.094	0.11	1.48	0.43	1.54	0.14	3.2	10	366	948
RS5	0.03	0.09	0.046	30.4	2.3	10	0.07	0.28	2.3	0.61	1.69	0.17	4.2	35	263	1090
RS6	0.02	< 0.05	0.048	34.5	2.1	8	0.066	0.26	2.24	0.49	1.23	0.14	3.8	32	203	1000
RS1	0.02	0.1	0.054	30.5	1.5	7	0.054	0.26	2.15	0.47	0.86	0.2	3.4	28	215	538
RS3	0.01	0.06	0.03	21.3	1.6	7	0.102	0.11	1.34	0.43	1.62	0.12	2.9	12	345	707

Tabella 5 Valori degli elementi geochimici analizzati nel sito in esame.

In generale si nota dalla formattazione condizionale della tabella l'elevato tenore dei valori di alcuni elementi per esempio del Mn del Cr. Sono stati analizzati 63 elementi chimici di cui solo una decina mostrano però sostanziali variazioni nel tempo dopo l'incendio. In particolare il contenuto di Mn, Zn, e B nei suoli percorsi dall'incendio mostra un incremento se confrontato sia con i valori di letteratura riferiti agli studi

regionali che con i valori stessi del sito e poi tende a dimezzarsi con il tempo già a distanza di dieci mesi dall'incendio. I risultati mostrano, coerentemente con le ricerche scientifiche sull'argomento, una modifica dei parametri geochimici sia nel tempo che nello spazio. In particolare alcuni elementi dopo sei mesi dall'ultimo campionamento hanno subito una diminuzione della loro concentrazione nella zona percorsa dall'incendio, ed un aumento nella zona a valle. Fatto questo riconducibile certamente al fenomeno della lisciviazione da parte delle acque superficiali. Dai risultati delle analisi di laboratorio l'elemento con i più alti valori espressi in ppm registrati è il manganese. Da analisi svolte negli anni precedenti dal DICAAR ed in particolare dal dott. Valera per la redazione dell'atlante geochimico della Sardegna, nella zona di Villacidro risulta che i valori misurati nel settembre dell'anno 2001 variano tra 159 e 169 ppm, mentre in un campionamento dei primi anni '70 si è registrato un valore compreso tra 400 e 696 ppm.

Nell'istogramma seguente vengono riportati i valori relativi ai campionamenti effettuati per tre anni di seguito per il Mn. E' visibile che il tenore dell'elemento due mesi dopo l'incendio è molto elevato fino ad arrivare a valori tra 1000 e 2000 ppm per poi ridursi dopo 10 mesi e tornare ai valori iniziali di circa 500 ppm. Successivamente però, dopo circa 8 mesi il valore per entrambi i campioni nominati RS3 ed RS4 tende ad aumentare nuovamente. Questo è compatibile con il fatto che nel frattempo l'area è stata percorsa nuovamente da un incendio di media intensità che può aver provocato un innalzamento del tenore dell'elemento.

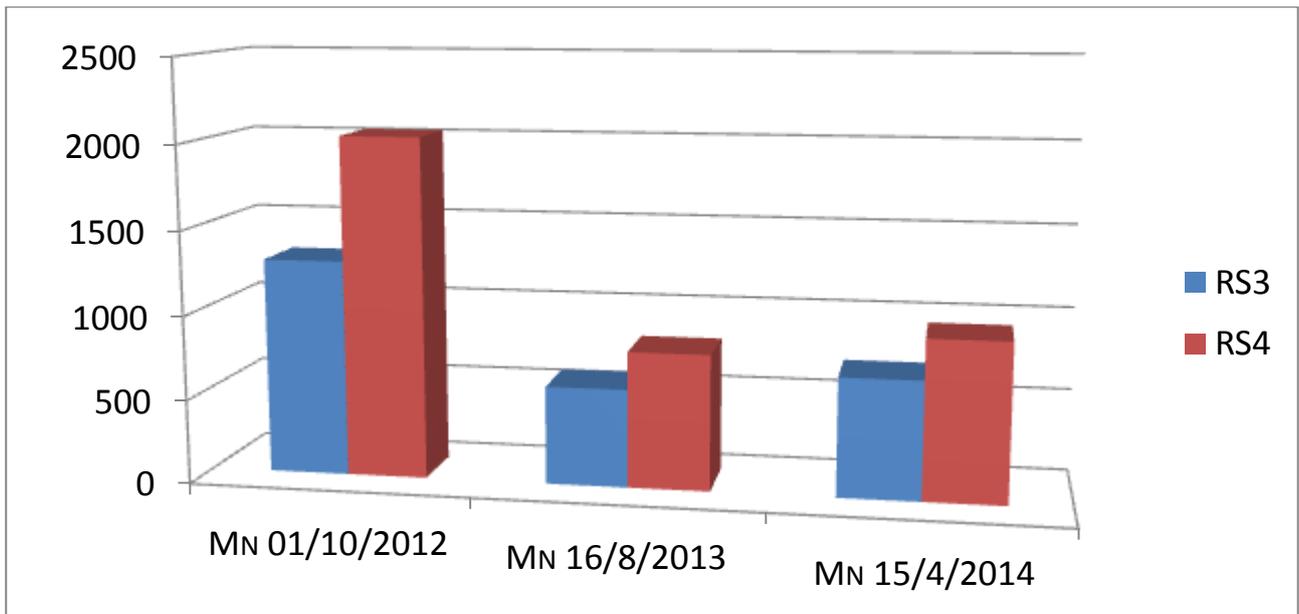


Figura 34 Variazioni del livello di Mn nel tempo.

Per ogni campione sono state fatte le analisi geochimiche di seguito per in tre anni. I campioni prelevati a monte (quelli con la numerazione che va dal campione 12 al 22 nella fig.33) hanno riportato una tendenza in diminuzione o stabile per quasi tutti gli elementi, ed un leggero aumento nel 2013 per il passaggio del secondo incendio dall'inizio della ricerca. I campioni a valle invece, (dal numero 1 al numero 12) hanno riportato nel tempo una sensibile variazione in aumento dei tenori di una decina di elementi. Nel seguito si riportano i dati relativi al campione n. 3 che non si discostano dai valori degli altri campioni a valle. dai grafici si nota che dal periodo di ottobre 2012, prossimo all'incendio, rispetto al mese di agosto 2013 si ha un dimezzamento dei valori di Al e K ed una sensibile diminuzione dei tenori di Ca e Mg. Questo effetto è dovuto senz'altro al dilavamento del substrato superficiale da parte delle acque meteoriche, infatti nel mese di novembre 2012 si sono verificate forti piogge e vi sono stati nell'area anche fenomeni di smottamento superficiale.

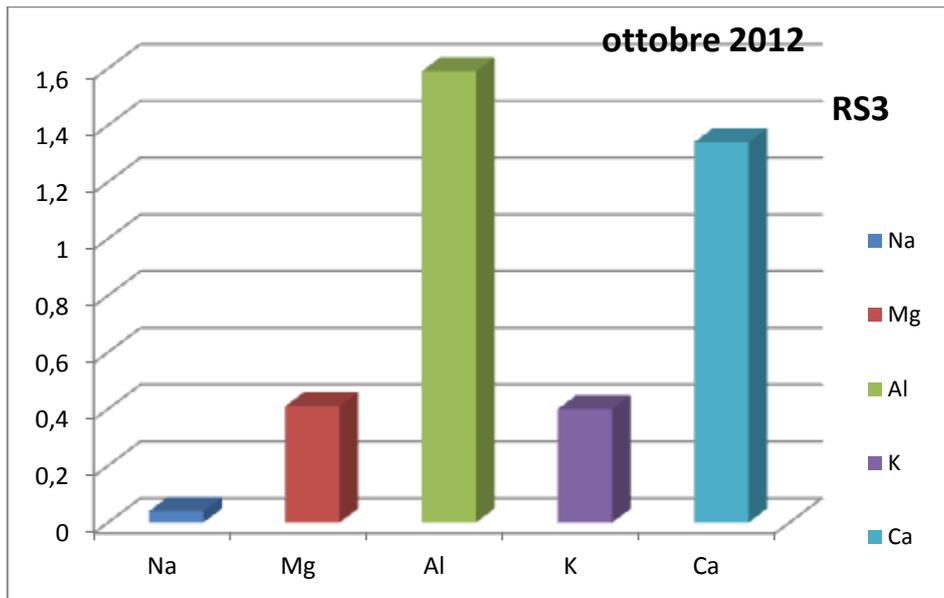


Figura 35 valori di alcuni elementi misurati per il campione n. 3.

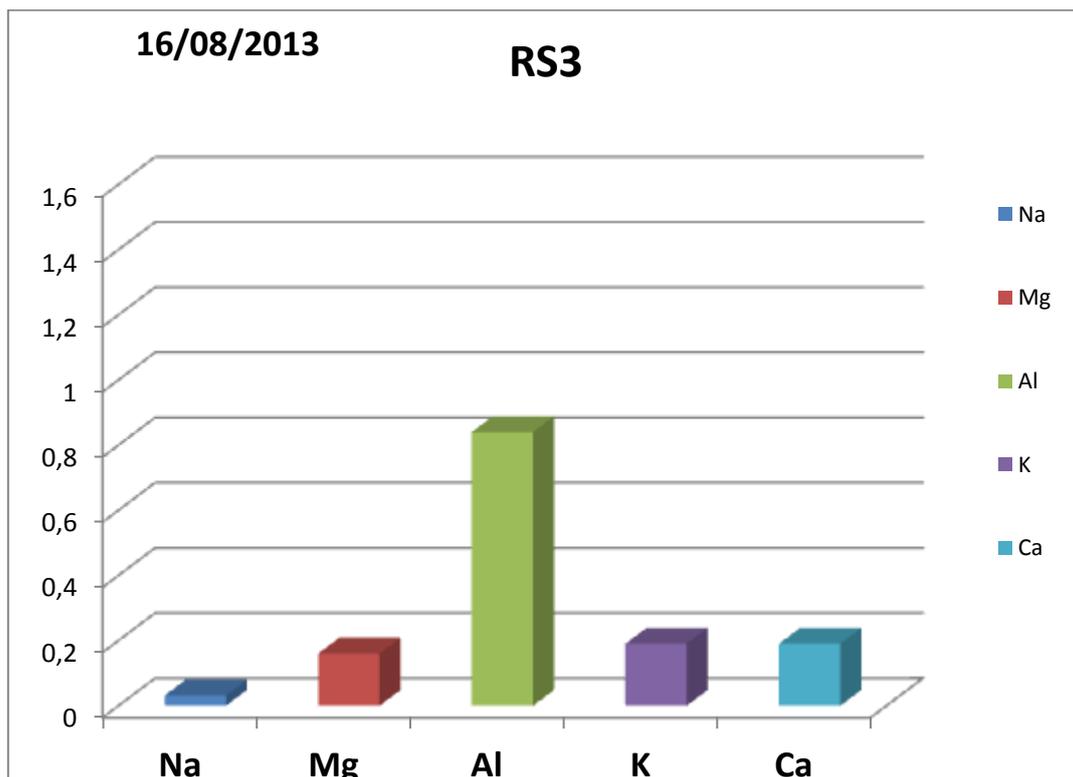


Figura 36 Valori degli stessi elementi misurati per il campione 3 a distanza di diversi mesi dall'incendio.

Ad aprile 2014 invece nel grafico di fig.37 si nota una tendenza all'aumento dei valori di Al, K e Na. La spiegazione può essere trovata nel passaggio di un incendio alla fine del 2013 che ha fatto aumentare i tenori delle sostanze nutritive o al trasporto degli elementi da monte a valle da parte delle acque meteoriche, infatti i campioni a monte

presentavano più alti valori di Na, K, e Ca, per la maggiore presenza di sostanza organica nel suolo.

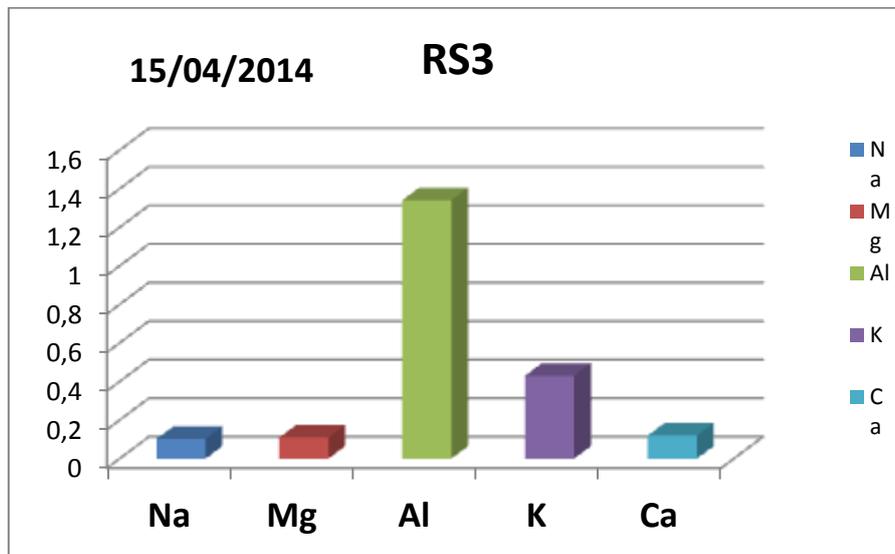


Figura 37 Valori di alcuni elementi misurati per il campione 3 nel mese di aprile 2014.

9. ANALISI DEI RISULTATI PER IL SITO DI VILLACIDRO.

Dalle analisi effettuate emerge che diversi sono gli effetti degli incendi sul suolo di Villacidro. Innanzitutto è emerso che il passaggio dell'incendio ha modificato le caratteristiche geotecniche del soprassuolo determinando il peggioramento delle condizioni di instabilità e ciò è dimostrato anche dai fenomeni succedutesi alle piogge che hanno determinato microfrane da scivolamento e crolli in prossimità dei tagli stradali. Inoltre si sono evidenziati fenomeni di erosione superficiale dovuti alla scomparsa delle essenze forestali che erano state impiantate per rimboschire l'area.

In secondo luogo si è dimostrato che l'incendio ha determinato anche una modifica della composizione geochimica del soprassuolo causando l'aumento dei tenori di alcuni elementi e delle sostanze nutritive del terreno. In particolare, per tutti i campioni analizzati si è registrato un aumento anomalo dei livelli di Mn, espressi in ppm. Tenore che è risultato molto più elevato dei tenori di fondo registrati negli anni '70 e ricavati da bibliografia.

10. SECONDO TEST SITE- ITTIRI

10.1 Introduzione

In questo secondo sito si è deciso di applicare diversi criteri di ricerca rispetto al sito precedentemente studiato e ciò è stato possibile grazie alla collaborazione con il CNR IBIMET di Sassari che ha messo a disposizione personale, materiale e strumentazione per condurre la ricerca in campo.

Lo scopo delle indagini effettuate ad Ittiri, nella zona di Monte Untulzu è quello di confrontare i dati di un modello di simulazione dell'erosione con i dati raccolti in situ attraverso delle barriere antierosione. A tal fine è stato fatto un inquadramento del sito dal punto di vista idrologico, geologico e pedologico e sono state effettuate misure infiltrometriche e di pH. Anche in questo sito come a Villacidro, sono stati raccolti ed analizzati dei campioni di suolo per valutare gli effetti dell'incendio a livello geochimico. I risultati mostrano un notevole aumento dei nutrienti ed un contenuto di alcuni elementi molto elevato rispetto ad altri.

Per quanto riguarda il fenomeno dell'infiltrazione superficiale essa è stata misurata subito dopo l'incendio, a distanza di un anno, sia d'estate che dopo le piogge autunnali. Le misurazioni sono state effettuate con il mini infiltrometro MDI (Mini Disk Infiltrometer) (Decagon Devices Inc., 1998) per valutare il grado di severità dell'incendio, il grado di idrofobicità e la sua variazione temporale. Due misure in particolare sono state effettuate utilizzando l' MDI: il tempo tra il contatto del suolo e la formazione della prima bolla d'aria nel tubo dell'infiltrometro, che misura il tempo in cui inizia l'infiltrazione e la quantità di acqua che si infiltra nel terreno nel primo minuto. Questo valore fornisce una velocità di infiltrazione relativa. Il tasso di infiltrazione relativa (più precisamente, il tasso di infiltrazione a tensione specifica, in questo caso 3 mm) misurata con l' MDI è inversamente proporzionale alla WDPT (water drop penetration time) (Lewis et al. 2006) cioè al tempo che impiega una goccia che viene fatta cadere sul terreno ad infiltrarsi.

Tramite queste misure è stato possibile determinare la conducibilità idraulica dello strato insaturo. Sono stati elaborati i grafici della velocità di infiltrazione e confrontati per i diversi periodi di campionamento e per le diverse plot sperimentali.

Infine si è effettuato il monitoraggio del rischio di erosione superficiale post incendio attraverso l'applicazione del modello ERMiT (Erosion Risk Management Tool) e i

risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori di erosione del suolo misurati in campo.

10.2 ANALISI TERRITORIALE

L'area sperimentale è situata nel nord ovest della Sardegna, (comuni di Ittiri - Sassari, 40° 33'N; 8° 31'E), l'area è stata percorsa a luglio 2013 da un incendio di origine dolosa che ha interessato una superficie molto estesa. La zona infatti è spesso attraversata da incendi di diversa entità, tra cui quello avvenuto il 12 luglio 2013 in località "Sa Pala e Su Chercu" all'interno del territorio di Monte Untulzu, in cui si colloca il sito sperimentale. L'incendio ha interessato un'area di 285614,4 m² e distrutto boschi e pascoli.

Nella zona circostante la vegetazione è costituita prevalentemente da Gariga Mediterranea, ma la zona interessata dall'incendio e oggetto di studio è costituita da una sughereta in purezza (*Quercus suber*).

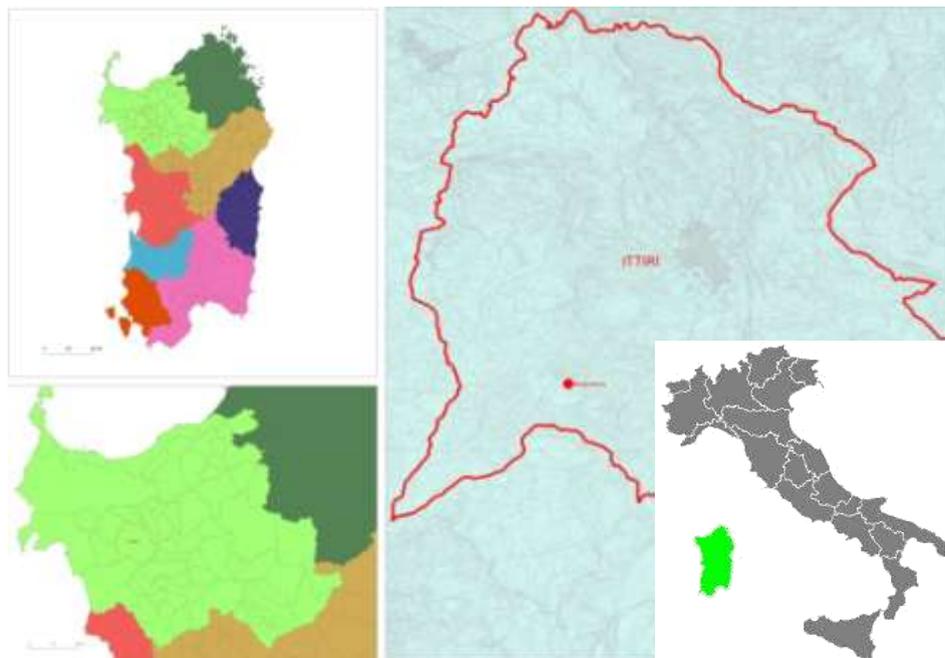


Figura 38 - Inquadramento geografico dell'area. In alto a sn la Sardegna suddivisa in province, in basso a sn in verde è rappresentata la Provincia di Sassari ed il Comune di Ittiri in rosso, all'interno del quale ricade l'area in esame.



Figura 39 In rosso individuazione di Monte Unturzu, localizzazione del test site.



Figura 40 Vegetazione dell'area sperimentale

10.3 Inquadramento geologico dell'area

La zona oggetto di studio ricade nell'unità geologica di Villanova Monteleone e appartiene al Distretto vulcanico di Capo Marrargiu.

Essa è costituita da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, a chimismo riodacitico, da saldati a mediamente saldati, con strutture vitro clastiche e/o eutaxitiche, con cristalli liberi di Pb, Sa, Cpx, Am, Bt, rara Ol.

Tra la Planargia a sud, il Marghine ad est, il Sassarese a Nord e la bassa Nurra a Nord –Ovest, si inseriscono i complessi paesaggi vulcanici del Monteleone. Si tratta di paesaggi caratterizzati da rocce vulcaniche derivate in gran parte dal ciclo effusivo dell'Oligocene, composte prevalentemente da trachiti, trachi-andesiti, andesiti, fonoliti, intercalate da formazioni tufacee. Durante i vari cicli vulcanici sono fuoriuscite colate a chimismo differente, che hanno dato luogo a rocce di diversa durezza e con differente resistenza all'erosione, per cui si è creata una morfologia molto varia. Nelle vulcaniti sono diffuse le forme a cupola e dosso. Altre forme di grande interesse sono le *mesas*, formate dalle coperture ignimbratiche originatesi dalle colate più fluide, a completare questo complesso di forme vulcaniche si aggiungono i *crateri* e i *coni*. Il rilievo vulcanico è caratterizzato da una pendenza generale verso oriente, dove termina sui paesaggi miocenici che si sviluppano sulla sinistra del fiume temo; ad ovest sulla costa, si ha invece una caduta più ripida, caratterizzata da un andamento a *cueta* che si estende talora in fronti veramente imponenti. I rilievi movimentano il paesaggio con elementi di grandezza e composizione differente, che raggiungono i 700 metri di altitudine, alternati a depressioni.

Nel complesso le scarpate si sviluppano secondo due direzioni fondamentali, verso Nord-Est e verso Nord-Ovest, ma nel dettaglio si hanno numerose eccezioni a questa regola. Tra Villanova Monteleone e gli altopiani calcarei dell'area del sassarese, si estende un paesaggio estremamente complesso e molto arido, dominato da *cuetas* tufacee e trachitiche, il cui fronte è rivolto verso Nord-ovest, e che si sviluppano in linee parallele con direzione Sud-Ovest/Nord-Est. All'inizio, a Sud-Est, sono abbastanza nette e alte, ma poi diminuiscono in altezza e appaiono meno in risalto. Una interessante linea di *cueta* inizia a Pala Baratta e raggiunge Monte Unturzu, alla cui sommità si staglia una scarpata continua allungata da Sud-Ovest a Nord-Est.

Oltre che da vulcani, il paesaggio è caratterizzato da altopiani disposti a più stadi, demoliti dai corsi d'acqua, che hanno scavato ampie e profonde valli, oltre a estese depressioni. Il centro di Ittiri è installato su un altipiano di calcari mioceni ingombri di placche vulcaniche, con andamento pianeggiante, situate ad un'altitudine di 400-440 m. Quest' area si infossa nei tufi vulcanici teneri. Nell'area di Ittiri, troviamo una

situazione complessa con rilievi trachitici che si elevano a quote superiori rispetto ai calcari miocenici.

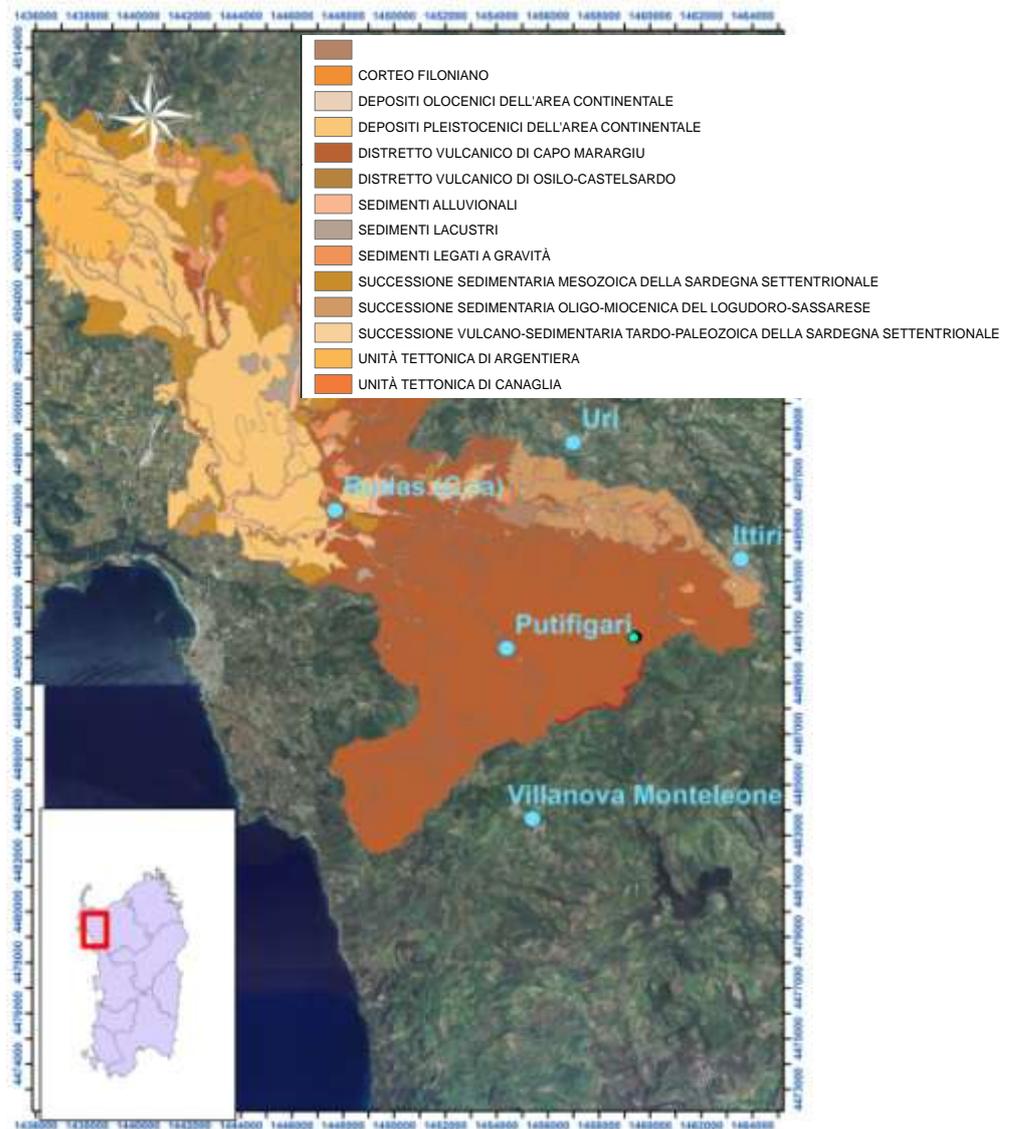


Figura 41 Inquadramento geologico

10.4 Inquadramento pedologico

La zona ricade per la maggior parte nell'unità 15 della Carta dei Suoli della Sardegna. L'unità è caratterizzata da morfologie aspre con un susseguirsi di rilievi e brusche rotture di pendio, alternate ad aree sub pianeggianti. I suoli predominanti sono di tipo Rock outcrop e Lithic Xerorthents e come suoli subordinati compaiono suoli di tipo Xerochrepts (fig.44). I suoli hanno profilo A-C ed A-R, sono di debole spessore e sono in associazione ad ampi tratti di roccia affiorante. La fertilità è molto bassa e risulta debole la capacità di trattenuta idrica. L'erosione è molto diffusa ed intensa perché queste aree sono spesso colpite da incendi, sono soggette al sovra pascolamento e

lavorazioni senza sistemazioni idrauliche e, frequentemente in condizioni non idonee. Il pericolo di ulteriore degradazione è elevato anche perché la pedogenesi è lenta a causa della scarsa alterabilità della roccia madre. L'area in studio fa parte del macrobacino del Rio Barca rappresentato nella fig. 43 di colore rosa. In rosso è individuato il sub bacino di competenza in cui ricade il test site.



Figura 42 Bacino del Rio Barca, in rosa, ed in rosso individuazione del sottobacino di appartenenza.

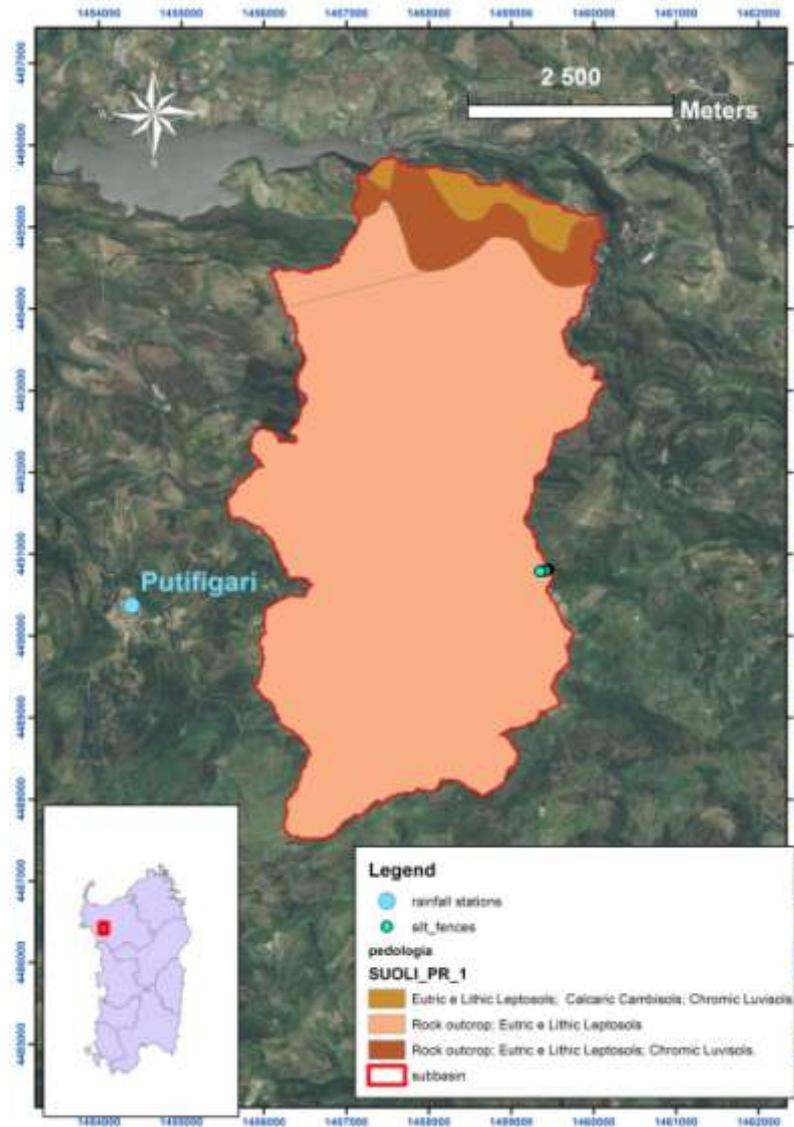


Figura 43 Inquadramento pedologico dell'area.

10.5 Analisi geochimica del sito di Ittiri

Per il sito di Ittiri sono state svolte le stesse analisi geochimiche e con le stesse modalità del sito n. 1 di Villacidro, già illustrate precedentemente. Si riporta nella tabella 6 il risultato per il terreno compreso tra la silt fence n.1 e la silt fence n.2.

Analyte Symbol	Be	B	Na	Mg	Al	K	Bi	Ca	Sc	Cr	Mn
Unit Symbol	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm
Detection limit	0,1	1	0,001	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,1	1	1
Analysis Method	AR-MS										
SILT 2 31/08/2013	0,4	17	0,082	0,33	1,29	0,27	0,15	1,38	2,8	91	1450
SILT 2 5/2/2014	0,4	9	0,079	0,23	1,29	0,22	0,11	0,57	2,6	53	738

Tabella 6 Risultati delle analisi geochimiche effettuate subito dopo l'incendio e dopo 8 mesi nel terreno prelevato tra le prime due silt fences.

I risultati, analogamente al caso di Villacidro, mostrano elevati tenori di Mn. Il valore registrato nel periodo immediatamente successivo all'incendio si dimezza dopo le piogge e risulta molto più elevato dei valori di fondo presenti in bibliografia. Per quest'area risulta dal database del DICAAR, ex DIGITA della facoltà di ingegneria di Cagliari, un tenore di fondo di Mn variabile (valori misurati nel settembre dell'anno 2001) fra 1100 e 1280 ppm, mentre in un campionamento dei primi anni '70 si è registrato un valore compreso tra 6000 e 8000 ppm, ma la strumentazione utilizzata non era precisa come quella odierna. E' evidente che il passaggio del fuoco ha influito sulla determinazione della quantità degli elementi e questo è dimostrato anche dal fatto che, coerentemente con altri studi sull'argomento, i valori di molti elementi si dimezzano con il tempo. Altri elementi invece, come il Be e l'Al, che sono meno sensibili al calore, rimangono praticamente invariati.

11. L'EROSIONE DEI SUOLI

L'erosione del suolo consiste nella perdita dello strato più superficiale del terreno a causa dell'azione di agenti naturali quali le precipitazioni e il vento o di azioni meccaniche di origine antropica.

Dal punto di vista geologico, insieme ad altri fenomeni di superficie, l'erosione è responsabile della dinamica della crosta terrestre (Bazzoffi, 2006). A livello nazionale l'erosione del suolo interessa gran parte del territorio, e ciò a causa della natura dei terreni, ma soprattutto della prevalente morfologia collinare e montana del nostro Paese.

Dall'elaborazione dei dati di rischio d'erosione attuale del suolo forniti dall'European Soil Bureau (Van der Knijff et al., 1999) utilizzando la banca dati dell'uso del suolo CORINE (1992), si osserva (fig. 45) che i suoli a rischio di erosione compreso fra 0 e 3 t ha⁻¹ anno⁻¹ rappresentano circa il 57% del territorio nazionale; quelli dove il rischio di erosione è compreso fra 3 e 10 t ha⁻¹ anno⁻¹ rappresentano circa il 12% e quelli dove il rischio di erosione supera le 10 t ha⁻¹ anno⁻¹ rappresentano circa il 30%.

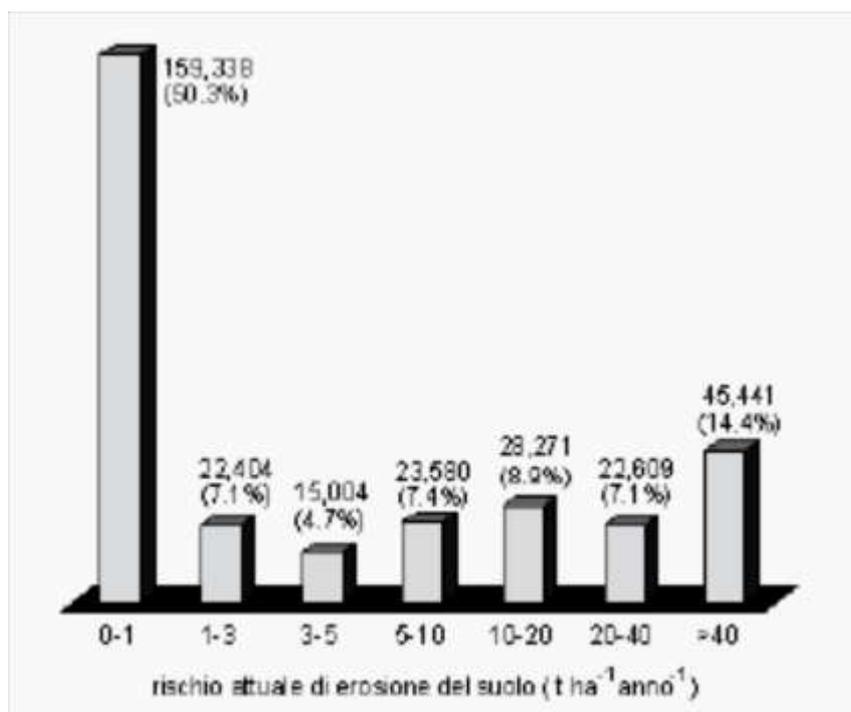


Figura 44 Distribuzione dei suoli in Italia secondo il rischio di erosione (elaborazione su dati Corine 1992, da Bazzoffi, 2006)

L'erosione del suolo è un fenomeno complesso nel quale sono distinguibili tre fasi: la prima consiste nel distacco delle particelle di suolo causato dall'azione battente della pioggia o dall'azione delle acque di scorrimento; ad essa segue il trasporto dei materiali erosi operato dall'acqua; infine, la fase di deposizione dei sedimenti erosi (Zachar, 1982).

EROSIONE DEL SUOLO			
Classificazione dell'erosione secondo i fattori che la generano	Classificazione dell'erosione causata dalla pioggia secondo le forme	Classificazione dell'erosione idrica laminare e per rigagnoli, secondo l'intensità in t ha ⁻¹ anno ⁻¹	
Erosione dovuta alla pioggia	Erosione laminare	< 1	Insignificante
Erosione di sponda nei corsi d'acqua	Erosione per rigagnoli	1 – 5	Debole
Erosione lacustre	Erosione per burroni	5 – 20	Moderata
Erosione marina	Erosione sotterranea (a tunnel)	20 – 100	Severa
Erosione causata dai ghiacciai		100 – 300	Molto severa
Erosione causata dalla neve		> 300	Catastrofica
Erosione causata dal vento			
Erosione di massa (frane)			
Erosione causata dalle ruspe e dall'aratro a versoio (tillage erosion)			
Erosione da estrazione di tuberi e da attività vivaistica			

Figura 45 Classificazione dell'erosione del suolo secondo differenti criteri Zachar riadattata da Bazzoffi, 2006.

Si possono riconoscere tre tipologie erosive principali: l'erosione da impatto delle gocce di pioggia; l'erosione laminare e l'erosione incanalata.

Nella prima, detta anche "*splash erosion*" (fig.46), le tre fasi del processo erosivo sono le seguenti: il distacco delle particelle terrose viene causato dalle gocce che colpiscono il suolo nudo; il movimento del materiale avviene attraverso la dislocazione causata dagli schizzi derivanti dall'impatto delle gocce; la deposizione del sedimento avviene in loco, al termine dell'evento piovoso, con la formazione di uno strato superficiale fangoso e la diminuzione della rugosità della superficie del suolo (spianamento delle zolle). Con il successivo disseccamento del sedimento si forma

una crosta superficiale densa, con pori vescicolari e con pori allungati in senso parallelo alla superficie del suolo che non favoriscono i movimenti dell'acqua nel suolo. Nei temporali, nei quali le gocce possono avere diametri sopra il millimetro, se le gocce dissipano la loro energia sul suolo privo di copertura, si esercitano sforzi di compressione e di taglio in grado di distruggere gli aggregati. Alla loro disgregazione contribuisce anche il rapido inumidimento del suolo attraverso un'azione chimico-fisica complessa che causa una sorta di "esplosione degli aggregati" (*slaking*) (Le Bissonnais, 1990).

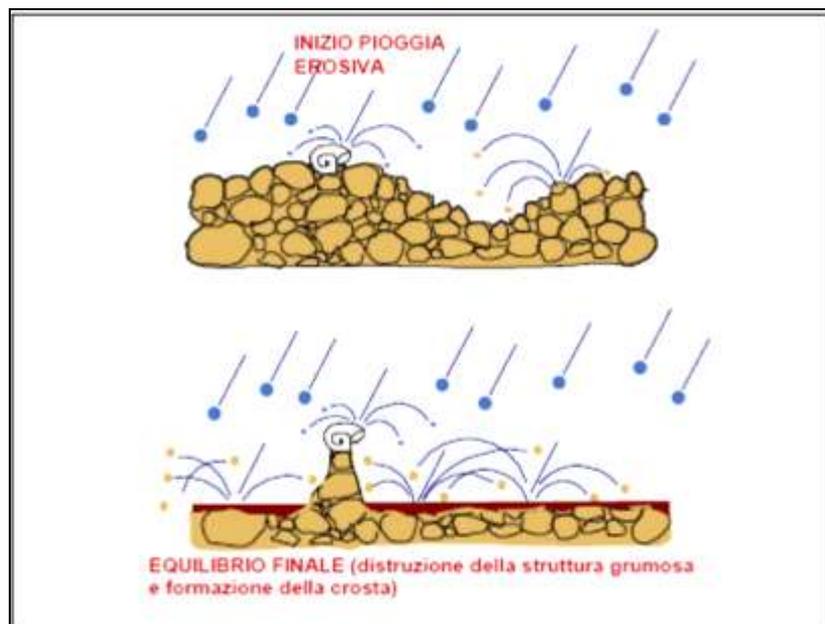


Figura 46 Splash erosion – Distruzione della struttura grumosa e formazione della crosta superficiale. (Bazzoffi, 2006).

I danni arrecati al suolo dall'erosione da impatto sono: la distruzione della struttura grumosa del terreno; la compattazione; l'intasamento della porosità, con conseguente diminuzione del numero di macropori in grado di far infiltrare l'acqua nel suolo.

La formazione della crosta superficiale determina, infine, un'accresciuta difficoltà per l'emergenza delle plantule e la diminuzione degli scambi gassosi fra suolo ed atmosfera. La prima, è quella determinata dal deflusso laminare, la seconda forma erosiva che si può osservare nelle terre coltivate, direttamente collegata conosciuta con il termine di "*sheet erosion*" o "*inter-rill erosion*". In essa, il distacco delle particelle è causato principalmente dallo *splash*, ma comincia ad essere presente una componente dovuta al deflusso laminare, cioè allo scorrimento dell'acqua sulla superficie del suolo sotto forma di un velo liquido. I danni causati dall'erosione

laminare sono i medesimi di quelli dovuti all'erosione da *splash*, con l'aggiunta di un altro fattore di degradazione consistente nella perdita di suolo superficiale causato dal trasporto a distanza dei sedimenti. L'ultima e più importante forma di erosione che interessa il terreno agrario è l'erosione incanalata. In essa sono presenti le due forme di erosione descritte in precedenza, ma la perdita di suolo maggiore è da imputare al distacco ed al trasporto di particelle causato dallo scorrimento dell'acqua nei rigagnoli (*rill erosion*).

Generalmente, i rigagnoli s'innescano su vie preferenziali ove il suolo è più compatto, convogliando il deflusso laminare che si verifica durante la pioggia.

Quando i rigagnoli assumono una dimensione tale da non poter essere eliminati attraverso le lavorazioni del suolo, si parla di erosione "a burroni" (*gully erosion*).

12. EROSIONE POST INCENDIO

Gli effetti degli incendi sui suoli, sono complessi in quanto un considerevole numero di fattori intervengono durante l'evento.

Tra questi fattori hanno una maggiore incidenza:

- L'intensità ed estensione dell'incendio, legata alla massa e al tipo di vegetazione;
- La diversa risposta dei terreni, dovuta alle condizioni ambientali preesistenti, le caratteristiche fisiche del suolo, la morfologia del territorio e le condizioni ambientali successive ad esso, le precipitazioni, gli interventi antropici;
- La stagione in cui l'incendio si verifica, in quanto in genere si considerano più distruttivi gli incendi che si sviluppano in autunno piuttosto che in primavera.

Gli incendi boschivi possono essere classificati in funzione della loro tipologia. E' possibile distinguere:

- Incendi sotterranei, con combustione lenta delle sostanze vegetali presenti nel sottosuolo;

- Incendi di superficie (incendio radente), che si propagano rapidamente grazie alla combustione rapida del solo strato di materiale combustibile che copre la superficie del terreno;
- Incendi di chioma con fiamme intense che raggiungono la zona più alta degli alberi, propagandosi da una chioma all'altra;
- Combinazioni di questi tipi, detti anche incendi di barriera.

A seconda delle condizioni meteo predominanti e del tipo di incendio boschivo, gli incendi possono avere intensità, frequenza e stagionalità assai variabili. La combinazione di questi elementi viene chiamata "regime degli incendi".

Decisivo per valutare gli effetti degli incendi boschivi non è il verificarsi di un evento singolo, ma anche la storia degli incendi precedenti, ovvero il regime degli incendi della zona in questione. Questo vale anche per l'erosione e per il deflusso in superficie dopo il passaggio di un incendio.

Nonostante ci siano numerosi fattori che influiscono sul suolo si è riscontrato che dopo un incendio nei suoli si manifestano reazioni comuni, quali:

- il pH aumenta ma tende a ritornare sui valori iniziali con il passare del tempo;
- la quantità di sostanza organica rimane stabile fino a 200°C, ma diminuisce rapidamente con il superamento di questa temperatura. Questo determina effetti negativi sulle proprietà chimico-fisiche e biologiche del suolo;
- Gli effetti degli incendi sulla fertilità dei suoli sono variabili. In generale si può affermare che la cenere derivante dalla combustione della sostanza organica è ricca di nutrienti quali azoto, fosforo, potassio, magnesio e sodio che migliorano la fertilità dei suoli. Nonostante questo la cenere sul suolo, inibisce lo sviluppo radicale delle piante, inibendo l'assorbimento dei nutrienti stessi;
- L'incendio provoca la distruzione degli aggregati di suolo, quindi la pioggia incontrerà meno ostacoli lungo la sua traiettoria;
- Nelle aree colpite da incendi, si segnala un aumento dell'erosione causata soprattutto dalla perdita della vegetazione.

Una delle gravi conseguenze degli incendi risulta essere quella sulle caratteristiche idrauliche del suolo.

L'elevarsi della temperatura agisce sulle caratteristiche chimiche e biologiche del terreno unitamente alla variazione delle sue caratteristiche fisiche. Il terreno contiene, specialmente nella parte umifera, dei colloidali e degli ossidi di ferro ed alluminio, che nel loro insieme realizzano lo stato di aggregazione, fondamentale per la stabilità all'erosione del terreno. Con elevata temperatura queste sostanze si disaggregano e liquefanno, vaporizzano e una frazione distillerà. Ciò avviene nel terreno in cui si instaura un gradiente termico, che si sviluppa per pochi cm. di profondità. Lungo questo gradiente condenseranno, in corrispondenza delle temperature adatte, queste sostanze costituite prevalentemente da idrocarburi alifatici a lunga catena e da residui catramosi, conferendo al terreno minerale un'elevata idrorepellenza. L'entità di questo fenomeno è proporzionata all'intensità dell'incendio e del suo tempo di residenza, al tipo di terreno ed alla quantità di sostanza organica bruciata. Subito dopo il passaggio del fuoco lo strato idrorepellente descritto si trova nella zona esplorata dalle radici. Al di sopra si trova la cenere che, in caso di precipitazioni, può venire facilmente trasportata a valle. Il movimento è facilitato dalla imbibizione del materiale che sarà sempre elevata poiché la possibilità di percolazione dell'acqua verrà limitata dallo strato idrorepellente di recente formazione. Con la cenere può venire trasportato il materiale organico incombusto e tutta la frazione inorganica che si trova sopra lo strato idrorepellente. Questo fenomeno è assai pericoloso su pendici molto scoscese.

Questo fenomeno porta ad una diminuzione della capacità dell'acqua di infiltrarsi nel terreno quindi l'acqua scorre lungo la superficie attivando così il fenomeno dell'erosione.

Le foglie, i rami e gli altri residui vegetali formano uno strato di copertura nel sottobosco della foresta, della macchia e dei boschi. Nell'intervallo tra un incendio e l'altro, le sostanze idrofobiche si accumulano in questo strato.

Un suolo idrofobico determina un maggiore ruscellamento superficiale e quindi un aumento dell'erosione a scapito della parte più fertile del terreno che viene dispersa. Lo strato idrofobico, in base all'intensità dell'incendio, può persistere per qualche anno.

Non tutti gli incendi creano uno strato idrorepellente, questo si sviluppa principalmente in presenza di uno strato sottile di lettiera precedente all'incendio, per incendi su elevate superfici e con un ampio fronte del fuoco. Favoriscono tale processo periodi di calore intenso e tessitura dei suoli grossolana.

I suoli più suscettibili all'idrofobicità sono quelli che presentano pori larghi in quanto facilitano la penetrazione del calore e quindi trasmettono il calore in profondità.

Lo spessore dello strato idrofobico può variare, in genere tra 1 e 8 cm al di sotto della superficie del suolo, in genere si forma uno spessore variabile tra 0,5 e 5 cm.

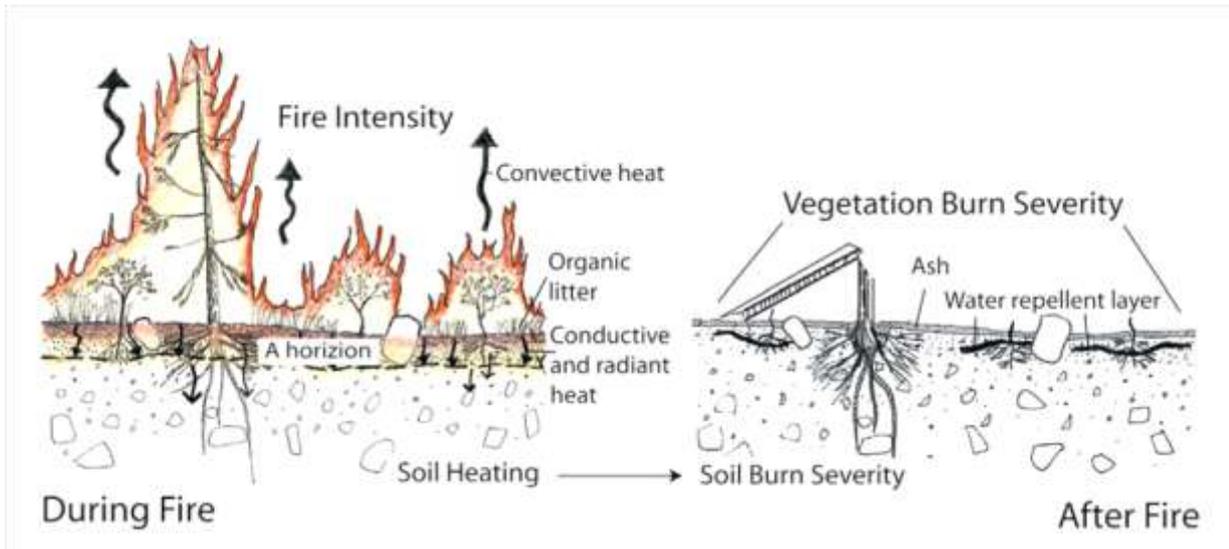


Figura 47 Effetti dell'intensità del fuoco sulla vegetazione e sulle proprietà del suolo (M. Hankinson, National Park Service, USDA).

	<p>Low soil burn severity</p> <p>No fire-induced water repellency. Water infiltrates immediately; however, some soils exhibit water repellency even when unburned (see section 4.3).</p>
	<p>Moderate soil burn severity</p> <p>Weak to medium water repellency found at or just below soil surface. Water infiltrates slowly.</p>
	<p>High soil burn severity</p> <p>Strong water repellency found at surface or deeper. Water does not infiltrate. In case of extreme soil heating, soil water repellency may be destroyed or may exist at very deep soil depths (6 inches or 15 cm).</p>

Figura 48 Esempi di suoli con diversa idrorepellenza in funzione del grado di severità dell'incendio. (Da USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243, 2010).

13. MODELLI DI PREVISIONE DELL'EROSIONE

Per una corretta valutazione dell'erosione è necessario possedere una approfondita conoscenza delle principali caratteristiche del sito: parametri climatici, pedologici, morfologia del suolo, uso del suolo. La base di partenza è costituita dall'individuazione delle unità di paesaggio, ovvero aree aventi caratteristiche uniformi in base ai parametri su citati. Si possono quindi applicare modelli quantitativi per la previsione dell'erosione.

La stima dell'erosione viene fatta mediante l'applicazione di modelli matematici che forniscono la previsione dell'asportazione di suolo o della produzione netta di sedimenti.

I problemi legati all'erosione riguardano scale molto diverse che vanno dal singolo sito dove deve essere realizzata un'opera o un intervento, ad interi bacini di vaste dimensioni. I fattori che influenzano l'erosione variano con la dimensione dell'area interessata e di questo occorre tenerne conto quando si vogliono adottare misure di protezione.

Per tenere conto delle molteplici variabili legate all'erosione sono stati messi a punto numerosi e differenti modelli che consentono nelle varie situazioni di stimare la quantità di sedimenti erosi. Una prima classificazione di tali modelli può essere la seguente:

- Modelli empirici: consentono la valutazione della perdita di suolo mediante la stima dei fattori che influenzano il fenomeno erosivo;
- Modelli concettuali: simulano i sub-processi del fenomeno di erosione tramite relazioni analitiche in cui figurano costanti numeriche da determinare sulla base di apposite misure;
- Modelli a base fisica: utilizzano l'equazioni dell'idraulica, e dell'idrologia dei deflussi superficiali e del suolo e della teoria del trasporto solido a scala di versante e di reticolo idrografico.

13.1 MODELLI EMPIRICI

I modelli empirici consentono di stimare, solitamente su base annua, i valori totali di deflusso e di perdita di suolo in un fissato periodo di tempo.

In breve si riporta una descrizione di alcuni modelli empirici tra i più utilizzati:

- PSIAC
- GRAVILOVIC
- USLE

13.2 MODELLO PSIAC

È un modello Americano che considera 9 fattori, ad ognuno dei quali viene assegnato un valore numerico. Questo varia in funzione dell'importanza del parametro. Il modello PSIAC (*Pacific Southwest Inter-Agency Committee*) è un modello sviluppato negli Stati Uniti nel 1968 per stimare l'erosione superficiale in un bacino. Esso consiste nel tenere conto di alcuni fattori e di stimarne l'influenza che hanno sul fenomeno erosivo tramite l'assegnazione di un valore tabellato. I fattori considerati e l'intervallo di valori che è possibile assegnare ad ognuno sono:

- geologia del terreno (caratteristiche litologiche, presenza di fratture; tra 0 e 10);
- caratteristiche del suolo (tessitura, pietrosità, contenuto di sostanza organica; tra 0 e 10);
- caratteristiche climatiche ed idrologiche (intensità e natura delle precipitazioni, fenomeni di gelo-disgelo; tra 0 e 10);
- deflusso superficiale (presenza di picchi di piena, portata liquida per unità di superficie del bacino; tra 0 e 10);
- topografia (pendenza; tra 0 e 20);
- copertura vegetale (natura e densità del popolamento vegetale; tra -10 e 10);
- utilizzo del suolo (tra -10 e 10);
- erosione areale (frequenza di segni di erosione sulla superficie del bacino; tra 0 e 25);
- erosione lineare fluviale (tra 0 e 25).

Dalla sommatoria dei valori assegnati si giunge ad un valore compreso tra 0 e 130 a cui corrisponde una classe ed un'erosione superficiale media annuale stimata. Le classi di erosione sono 5.

13.3 MODELLO GRAVILOVIC

È un modello strutturato su abachi. Il metodo Gavrilovic permette la valutazione della portata volumetrica di asportazione (in m³/y) dallo strato superficiale:

$$\dot{V} = \pi h \sqrt{X^3 Y^3 S \left(\frac{\langle T \rangle}{10} + 10 \right) (\phi + \sqrt{I})^3}$$

Dove:

- h : precipitazione media in mm/y;
- X : coefficiente tabellato relativo alla protezione del suolo da parte della vegetazione;
- Y : coefficiente tabellato in funzione dell'erosibilità del suolo a causa della sua litologia;
- S : superficie del bacino in km²;
- $\langle T \rangle$: è l'isoterma media annua;
- Φ : coefficiente che esprime il tipo dei processi di erosione e la loro forza;
- l : pendenza media del bacino.

13.4 MODELLO USLE

E' il modello più utilizzato, stima l'erosione specifica, in particolare quella idrica laminare. La formula utilizzata è:

$$A = R K L S C P \text{ [t/ha anno]}$$

dove:

A rappresenta la quantità media di suolo eroso annualmente per unità di superficie;

R è il fattore di pioggia o erosività della pioggia;

K = fattore erodibilità del suolo;

L = lunghezza del versante;

S = Pendenza del versante;

C = copertura vegetale e tecniche colturali;

P = tecniche sistematorie (fattore antropico);

I valori di tali fattori si trovano sotto forma di tabelle e di formule, derivano dall'elaborazione di dati sperimentali.

La formula vale a livello locale e su lunghi periodi: non può essere usata per stimare il prodotto di sedimento da un bacino o la perdita di suolo relativa ad un singolo evento.

La formula è stata messa a punto per gli U.S.A. e la sua utilizzazione in aree esterne fornisce risultati approssimati.

13.5 MODELLI FISICAMENTE BASATI

I modelli fisicamente basati sono stati proposti ed utilizzati per stimare la distribuzione spaziale sulla superficie del terreno dello scorrimento superficiale e del flusso di sedimento conseguente ai fenomeni erosivi durante eventi piovosi.

I modelli fisicamente basati si appoggiano sulle leggi di conservazione della massa e dell'energia (o della quantità di moto).

Negli ultimi anni, grazie alla crescita delle base dati disponibili, sono stati proposti numerosi modelli di cui alcuni sono ancora in fase di sviluppo.

Uno dei più utilizzati è il modello WEPP (*Water Erosion Prediction Project*).

E' un modello progettato e sviluppato sulla base delle più recenti conoscenze nel campo dell'idrologia e dell'erosione dei suoli allo scopo di sostituire (negli U.S.A.) la USLE nella stima dell'erosione legata all'uso agricolo del suolo, fornendo uno strumento utilizzabile con facilità da parte di Organizzazioni, Enti o privati che si occupano di conservazione e di pianificazione ambientale. Si tratta dunque di un vero e proprio progetto su scala nazionale e, per questa ragione, nello sviluppo di WEPP sono coinvolti l'USDA, il NSERL (*National Soil Erosion Research Laboratory*), l'ARS (*Agricultural Research Service*) e la *Purdue University* (Lafayette, In., U.S.A.).

Attualmente il pacchetto WEPP è formato da modelli implementati su PC consistenti in un modello per i versanti e uno per i bacini.

Il modello per i versanti (*profile version*) consente la stima della quantità di materiale staccato e depositato lungo un versante e la perdita complessiva di suolo dal sistema. Può essere applicato ad aree non superiori ai 260 ha. Il modello per i bacini (*watershed and grid version*) estende ai piccoli bacini le potenzialità del modello per i versanti e può tenere conto della presenza di gole erosive.

Tutti i modelli operano in funzione delle condizioni climatiche, delle caratteristiche del suolo, della topografia, dell'utilizzazione del terreno e delle pratiche gestionali e conservative su di esso attuate. I modelli sono progettati per una simulazione continua su una serie di anni, ma possono trattare anche un evento singolo.

Per generare una serie di dati climatici relativi a precipitazione, temperatura, radiazione solare e velocità del vento per località degli U.S.A si può utilizzare un ulteriore modello di nome CLIGEN (*Climate Generator*) (Nicks, 1985) fornito nel pacchetto.

Il modello WEPP è attualmente sottoposto ad un intensivo programma di prove e valutazione.

13.6 MODELLI CONCETTUALI

Uno dei modelli concettuali di uso corrente è il modello SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). E' un modello sviluppato dall'*Agricultural Research Service* (ARS) del Dipartimento dell'Agricoltura degli USA (USDA).

E' un modello matematico a scala di bacino che simula l'impatto delle pratiche di gestione del suolo sui corpi idrici, il trasporto di sedimenti e sostanze chimiche in funzione delle caratteristiche dei suoli e della tecnica colturale per lunghi periodi di tempo. Tale modello richiede informazioni quali: i dati meteo, la pedologia, l'altimetria, la vegetazione, le pratiche di gestione dei campi coltivati.

13.7 Modello ERMiT

ERMiT è un'applicazione web-based sviluppata dall' USDA (Robichaud, 2007), che utilizza la tecnologia di simulazione dell'erosione del modello WEPP in termini probabilistici, su terreni bruciati con e senza l'applicazione di trattamenti di mitigazione dell'erosione. ERMiT può essere attivato da internet alla FS WEPP web page (<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/>) che viene aggiornata regolarmente dall'USDA. Per utilizzare il modello è necessario selezionare le unità di misura con cui si intende lavorare e poi inserire i dati di input nelle unità di misura corrispondenti. I dati in ingresso di cui necessita il modello sono:

- parametri climatici,
- tessitura del suolo,
- contenuto di roccia del terreno,
- tipo di vegetazione,
- topografia,
- lunghezza del versante interessato dall'incendio,
- classe di gravità dell'incendio,
- distribuzione percentuale di vegetazione arbustiva, erbacea o ad alto fusto.

I parametri di input devono essere inseriti in uno schermo interattivo che viene riportato nella figura seguente:

Erosion Risk Management Tool

Climate (-*) (+)

- Bitterroot Valley MT +
- DEADWOOD DAM ID
- Cheesman 1 +
- KAHRAMANMARAS Turke
- CHARLESTON KAN AP WV
- MOSCOW U OF I ID

Custom Climate

Soil Texture ?

- clay loam
- silt loam
- sandy loam
- loam

Rock content ?

20 %

Vegetation type ?

- Forest
- Range
- Chaparral

Hillslope gradient ?

Top 10 %

Middle 40 %

Toe 20 %

Hillslope horizontal length ?

250 m

Soil burn severity class ?

- High
- Moderate
- Low

Range/chaparral pre-fire community description ?

% shrub

% grass

% bare

Run ERMIT

Citation:
 Robichaud, Peter R.; Elliot, William J.; Pierson, Frederick B.; Hall, David E.; Moffet, Corey A. 2006. **Erosion Risk Management Tool (ERMIT) Ver. 2006.01.18.** [Online at <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/>.] Moscow, ID: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Figura 49 Maschera input del modello ERMIT(dal manuale ERMIT - USDA Forest Service RMRS-GTR-188. 2007)

I dati di input sono simili a quelli richiesti da altre interfacce che utilizzano il modello WEPP. Tuttavia, l'utilizzo di questi parametri variabili in input e gli output di tipo probabilistico, rendono ERMIT un modello unico.

ERMIT in generale consente di:

- Determinare un *range* di possibili valori;
- Selezionare i valori rappresentativi dal possibile *range* di valori;
- Assegnare a ciascun valore selezionato una probabilità di accadimento.

ERMiT combina i parametri climatici con le caratteristiche dei suoli per poter definire un range di valori dell'erosione post incendio. Esso produce in output una stima probabilistica della quantità dei sedimenti erosi espressi in (t/ha) per diverse probabilità espresse in percentuale. La stima di sedimento eroso viene effettuata annualmente per una proiezione temporale probabilistica di 5 anni. In questo modo è possibile valutare l'andamento dell'erosione al passare del tempo a partire dal momento in cui si è verificato l'incendio. Si può così valutare in che modo il suolo reagisce all'incendio ed è inoltre possibile progettare e valutare l'efficacia di alcune misure di mitigazione del rischio erosione simulando l'utilizzo di barriere antierosive.

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	1.5	0.7	0.4	0.4	0.4
Seeding	1.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Mulch (1 t ha ⁻¹)	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Mulch (2 t ha ⁻¹)	0.38	0.4	0.4	0.4	0.4
Mulch (3.5 t ha ⁻¹)	0.37	0.4	0.4	0.4	0.4
Mulch (4.5 t ha ⁻¹)	0.36	0.4	0.4	0.4	0.4
Erosion Barriers: Diameter 0 m Spacing 50 m					
Logs & Wattles	1.5	0.7	0.4	0.4	0.4

Figura 50 Maschera di output del modello

ERMiT costituisce un valido strumento che consente ai gestori del territorio di poter effettuare interventi di pianificazione e di mitigazione del rischio erosione.

Nella figura 51 è riportato il diagramma di flusso del modello, tratta dal manuale d'uso, per facilitare la comprensione del suo funzionamento.

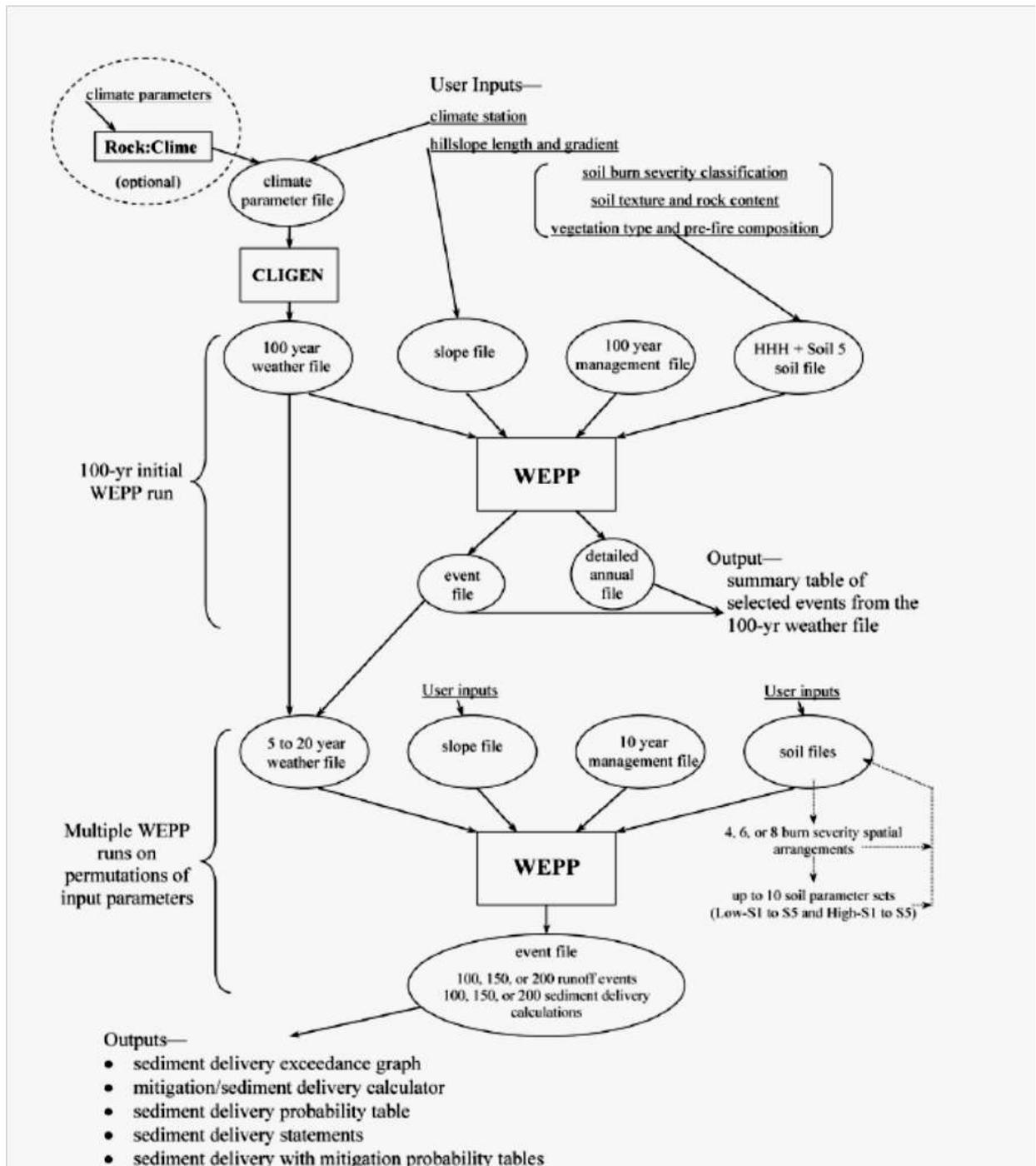


Figura 51 Diagramma di flusso del modello ERMIT (dal manuale di utilizzo USDA Forest Service RMRS-GTR-188, 2007).

13.7.1 Parametri climatici

Sono stati utilizzati i dati meteorologici forniti dal sito dell’Autorità di Bacino della Sardegna relativi alla stazione termopluviometrica più vicina all’area di studio e fornita dei dati completi (Ittiri – anni dal 1988 al 2002) e sono stati riportati nel modello i valori corrispondenti alle temperature e delle piogge medie mensili.

Codice: 1280;

Nome stazione: Ittiri;

longitudine: 1463550;

latitudine: 4493880;

H slm [m]: 392.

Nel sito in studio è stato installato un pluviometro che ha consentito una misura puntuale delle piogge con possibilità di registrazione fino a intervalli di 0,2 mm.



Figura 52 Pluviometro installato in campo

I valori di pioggia così registrati sono stati utilizzati per verificare la quantità di sedimenti in corrispondenza degli eventi di pioggia erosivi (ad alta intensità). I dati pluviometrici registrati in campo non sono stati utilizzati per il modello ma solo per il confronto dei dati sperimentali. Questa scelta è dovuta al fatto che le misure dirette sono state effettuate per un periodo di tempo molto breve e non è stato possibile effettuare delle medie ponderate sui valori di pioggia. Si è ritenuto più attendibile effettuare una media su un periodo di tempo più lungo (14 anni) in cui si avevano a disposizione per la stessa stazione anche i valori di temperatura media mensile. Il modello ERMiT considera la media massima e minima [°C] relativa a ciascun mese per tutti i mesi dell'anno.

Per svolgere la simulazione il modello considera i valori medi mensili di pioggia caduta relativa a tutti i mesi dell'anno [mm] e la media del numero di giorni di pioggia.

Nei dati forniti dall'Autorità di bacino come giorni di pioggia vengono considerati quei giorni in cui si è avuta una pioggia maggiore o uguale a 1 mm.

Si riportano nella figura seguente i dati climatici utilizzati:

Month	Mean Maximum Temperature (°C)	Mean Minimum Temperature (°C)	Mean Precipitation (mm)	Number of wet days
January	15.8	6.9	59.84	9.8
February	16.5	7.0	37.93	9.3
March	18.9	9.1	41.19	8.1
April	19.8	10.0	97.02	12.3
May	25.6	15.5	46.77	6.6
June	29.5	19.0	22.95	4.8
July	32.4	22.0	6.85	1.3
August	32.9	22.6	18.12	3.4
September	28.2	18.4	77.56	8.0
October	25.1	15.8	108.38	10.9
November	19.3	10.8	122.72	14.2
December	15.9	7.7	92.13	13.4
Annual			731.46	102.3

Tabella 7 Parametri climatici utilizzati –maschera di ERMiT

Le precipitazioni totali registrate nel periodo settembre 2013 – aprile 2014 sono state pari a 653 mm, risultando circa il 90% della precipitazione media annua.

Nella figura 53 si riporta il grafico relativo alla misura delle precipitazioni relative alla pioggia cumulata giornaliera ed al valore di I_{30} per il periodo che va da settembre 2013 al mese di aprile 2014.

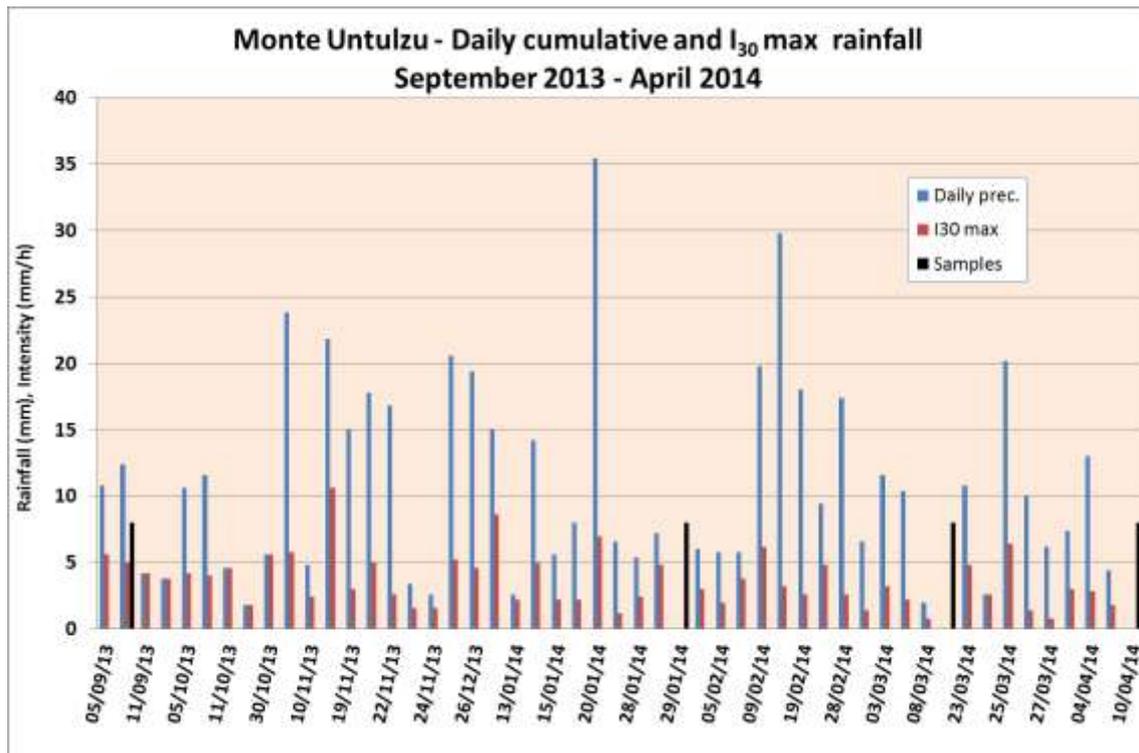


Figura 53 dati di pioggia misurati dal pluviometro in campo.

13.8 SUDDIVISIONE DEL TEST SITE IN PLOT

Il modello ERMiT, come già accennato, consente di effettuare una stima probabilistica circa la quantità di sedimenti erosi nei cinque anni seguenti l'incendio. Per la calibrazione del modello nell'area in studio sono state installate delle barriere antierosive (silt fences) per la raccolta dei sedimenti erosi e per il confronto tra i dati del modello ed i dati di campo.

Le *silt fences* sono barriere antierosive semplici da installare e a basso costo. Una volta individuata l'area, questa viene delimitata con dei nastri e dei pali di legno posizionati sul terreno in orizzontale, e viene costruita una barriera antierosiva utilizzando delle reti geotessili e dei pali in legno posizionati in verticale. Lo scopo delle *silt fences* è quello di delimitare un'area ben precisa e fare in modo che i materiali erosi da un'area di superficie e caratteristiche note vadano a depositarsi a valle al di sopra delle reti geotessili. Il geotessile è posizionato in modo tale da formare una sorta di tasca dove il materiale eroso si accumula e può essere prelevato con una paletta.

Ripulire e pesare il sedimento può essere fatto in loco se si hanno a disposizione degli strumenti portatili o si possono portare in laboratori attrezzati. Queste operazioni si

ripetono a intervalli di tempo prestabiliti, stagionalmente o dopo un singolo evento erosivo.

La probabilità che le silt fences così costruite catturino tutti i sedimenti erosi è superiore al 90% e questo lo rende un metodo adatto alla stima dell'erosione di versante. Le *silt fences* possono essere costruite in vario modo, la parte superiore può essere delimitata con una lunga barriera orizzontale, con una rete metallica, con una trincea metallica scavata.

Nella figura 54 che segue è ben visibile l'area che contribuisce all'erosione, ovvero quella delimitata dai pali di legno a monte e dal geotessile a valle. Con riferimento alla figura sotto riportata nel sito si sono installate le silt fences di tipo a).

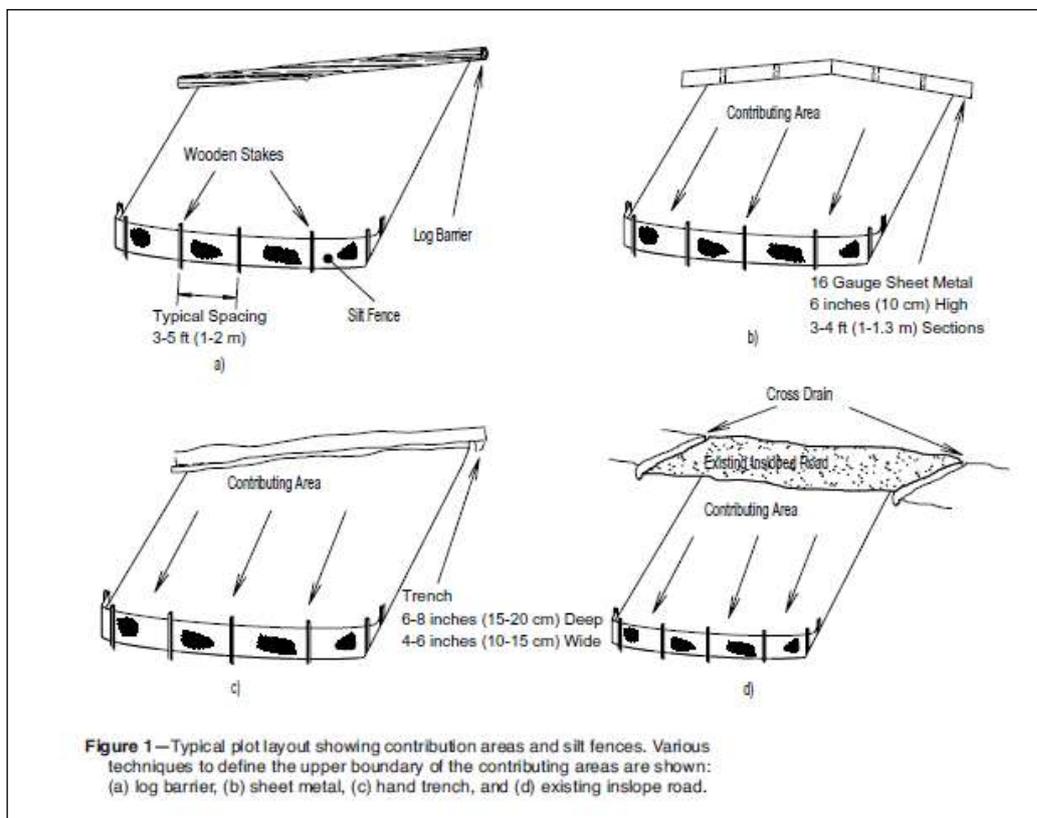


Figura 54 Tipologia di silt fences- fonte: Silt Fences: An Economical Technique for Measuring Hillslope Soil Erosion, USDA, 2002.

13.9 Individuazione delle silt fences.

Le *silt fences* sono state installate delimitando per ciascuna di esse, un'area di 30 m² (10 [m] x 3 [m]). A monte si è delimitata l'area con dei pali in legno disposti orizzontalmente sul terreno, i lati sono delimitati con dei nastri e a valle sono state posizionate le reti geotessili bloccate su paletti di legno disposti verticalmente.

Si riportano alcune foto delle *silt fences*: le foto sono state scattate a febbraio 2014 e in tale occasione sono stati raccolti i sedimenti rinvenuti sulla rete geotessile.



Figura 55 Silt fence sperimentale



Figura 56 Particolare del posizionamento del geotessile

Nella foto di figura 57 è evidente nella rete geotessile il sedimento eroso depositato. Questo sedimento è stato prelevato riposto in un contenitore per poter essere esaminato nei laboratori del CNR in cui viene pesato umido ed essiccato in stufa per determinare il peso secco e l'umidità.



Figura 57 - Silt fence - raccolta materiale eroso.

Le *silt fences* sono state posizionate in aree aventi diversa pendenza. Ne sono state installate 10 in totale, nello stesso versante ma in due zone poco distanti aventi differente pendenza (20% e 35%). Per ciascuna di esse è stata rilevata la vegetazione presente e sono stati misurati i parametri di input da inserire nel modello.

Nelle figure 58 e 59 si riporta l'estensione territoriale dell'incendio ed l'ubicazione delle *silt fences* all'interno dell'area incendiata.

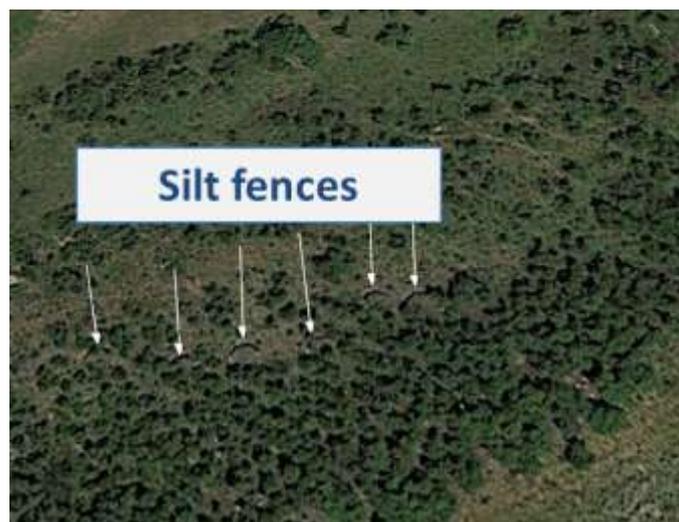


Figura 58 Ubicazione delle silt fences – immagine da Google Earth.

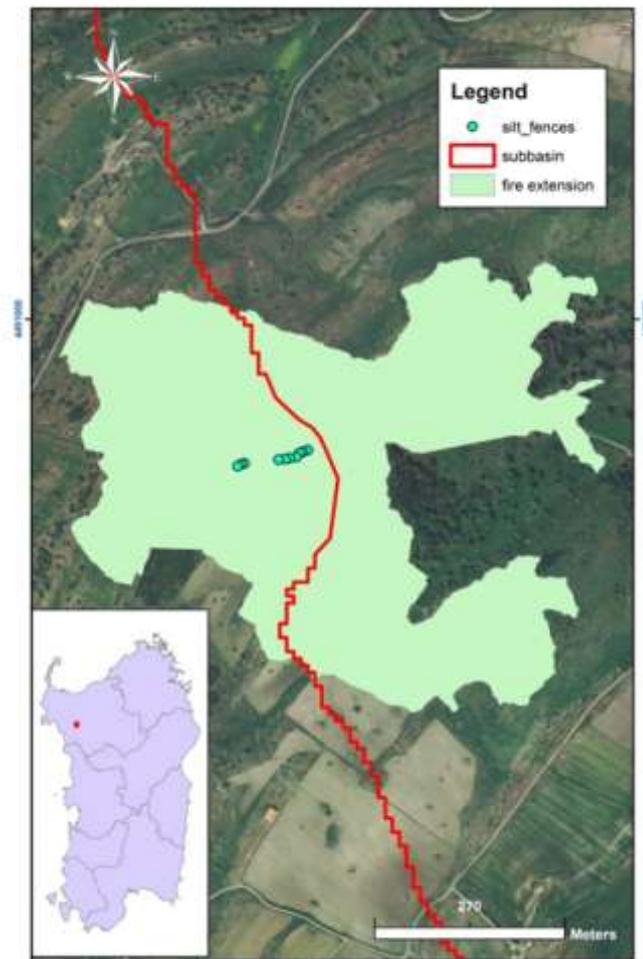


Figura 59 Estensione dell'incendio e localizzazione delle silt fences.

13.10 Tipo di vegetazione e contenuto di roccia

Per effettuare le misure di vegetazione a terra e stimare la percentuale di vegetazione erbacea, di suolo nudo e di pietrosità è stata utilizzata una griglia quadrata di legno di dimensioni di 1m x 1m, in cui ciascun lato è suddiviso in 10 celle da 10cm². Si riporta un'immagine rappresentativa di tale strumento in figura 60:



Figura 60 Griglia utilizzata per la stima della vegetazione in campo

Il quadrato viene posato su una porzione di terreno e in base al numero di celle occupate è possibile valutare la quantità in percentuale di vegetazione di suolo nudo e di roccia presente.

E' stata fatta una stima oculare del contenuto di vegetazione anche con l'ausilio di fotografie. Le misurazioni sono state effettuate per ogni singola *silt fence* e per ciascuna sono state eseguite tre ripetizioni, a monte, al centro e a valle della parcella sperimentale. Di questi tre valori è stata calcolata la media, in questo modo si è ricavato un unico valore significativo per ciascuna *silt fence* e successivamente i valori dei singoli plot sono stati confrontati tra loro mediante l'analisi della varianza (ANOVA). A tale scopo è stato utilizzato il software STATISTICA della Stat Soft. Ogni plot è stato classificato in base al contenuto di vegetazione e di roccia ed è stata fatta un'analisi della varianza dei dati e applicato il valore medio dei plot aventi la stessa pendenza.

La copertura vegetale è stata misurata subito dopo l'incendio, nel mese di Agosto 2013 e nei primi giorni di Febbraio 2014, dopo circa 8 mesi. In questo modo è stato possibile valutare la ripresa vegetativa ed effettuare una nuova serie di simulazioni con i dati modificati.

Utilizzando tale metodo sono state valutate le percentuali di vegetazione erbacea, il contenuto di pietre e il suolo nudo.

La sughera è stata rilevata con il metodo dei transetti che consiste nel seguire un percorso lineare di lunghezza prestabilita e contare gli esemplari che si osservano a sinistra e a destra della linea che si sta percorrendo.

La rilevazione della percentuale di vegetazione è stata fatta in due periodi di tempo diversi, ad agosto 2013, e successivamente nei primi giorni di febbraio 2014. In questo modo si è potuto evidenziare le differenti condizioni del sito.

Di seguito si riportano alcune fotografie del sito. La prima, scattata in agosto 2013, poche settimane dopo che si è verificato l'incendio, le altre due, sono relative a febbraio 2014, ovvero ad alcuni mesi di distanza dal succitato incendio, l'ultima si riferisce al mese di ottobre 2014.

Nella foto relativa al periodo di agosto si nota la quasi totale assenza della vegetazione erbacea, la sughera pur se annerita non ha subito grossi danni, è stata distrutta solo una bassa percentuale. Il suolo risulta annerito, e si può notare la presenza della cenere.



Figura 61 Vegetazione agosto 2013

Nelle foto relative al periodo di febbraio si nota la presenza della vegetazione erbacea in percentuale decisamente maggiore rispetto alle foto del periodo precedente. La sughera appare ancora annerita e il suolo ha un colore leggermente più chiaro rispetto a quello visto in precedenza.



Figura 62 Vegetazione febbraio 2014



Figura 63 Vegetazione febbraio 2014



Figura 64 Vegetazione ottobre 2014

Nella fig. 64 invece, relativa al mese di ottobre 2014, a più di un anno dall'incendio, già si vede la totale ripresa sia della sughera che della vegetazione a terra. Subito dopo l'incendio, nel mese di agosto i valori di vegetazione rilevati sono riportati nella tab.8. Si nota che la vegetazione erbacea è stata completamente bruciata, il suolo si presentava nudo ed annerito.

	copertura vegetale subito dopo incendio				
	veget.	pietr.	suolo nudo	tot	sughera %
plot1	0	5	95	100	20
plot2	0	13	87		60
plot3	0	10	90		75
plot4	0	16,7	83,3		50
plot5	0	9,3	90,7		15
plot6	0	6,7	93,3		70
plot7	0	20	80		35
plot8	0	30	70		5
plot9	0	26,7	73,3		55
plot10	0	17,7	82,3		20

Tabella 8 Valori di vegetazione misurati subito dopo l'incendio

Nella tabella 9 si riportano i dati di vegetazione relativi alle *silt fences* sperimentali nel mese di febbraio.

silt fence n°	pendenza[%]	mese	shrub [%]	grass [%]	bare [%]	rock [%]
1	20	febbraio	20	30	58	5
2	20	febbraio	60	30	10	13
3	20	febbraio	75	25	0	10
4	20	febbraio	60	29,3	10,7	16,7
5	20	febbraio	25	41,7	33,3	9,3
6	20	febbraio	70	20	10	6,7
7	20	febbraio	40	50	10	20
8	35	febbraio	15	40	45	30
9	35	febbraio	65	20	15	26,7
10	35	febbraio	30	60	10	17,7

Tabella 9 Dati di vegetazione misurati nelle silt fences in due periodi differenti, subito dopo l'incendio e dopo le piogge autunnali.

Sotto si riporta un esempio di ripartizione percentuale della vegetazione utilizzata come dato di input del modello. Il contenuto di roccia si riferisce alla quantità di roccia presente in superficie e alla pietrosità.

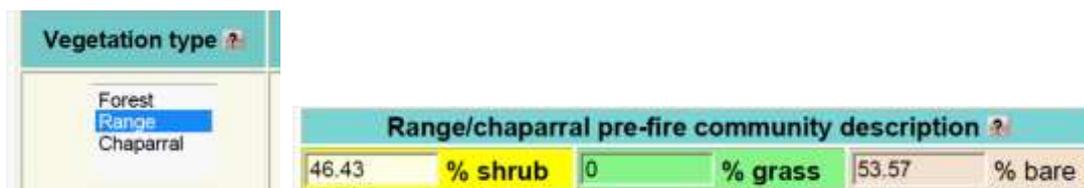


Figura 65: tipologia di vegetazione e ripartizione percentuale nella maschera del modello.

13.11 Tessitura del suolo

Diversi campioni sono stati prelevati a 10 cm di profondità nell'area sperimentale incendiata. Le analisi sono state eseguite nel laboratorio di Geotecnica della Provincia di Cagliari.

Sono state effettuate due prove: analisi granulometrica per setacciatura per i grani di dimensioni comprese nell'intervallo 0.075÷100[mm] e un'analisi granulometrica per sedimentazione per i grani di dimensioni compresi nell'intervallo 0.0055÷0.1117 [mm].

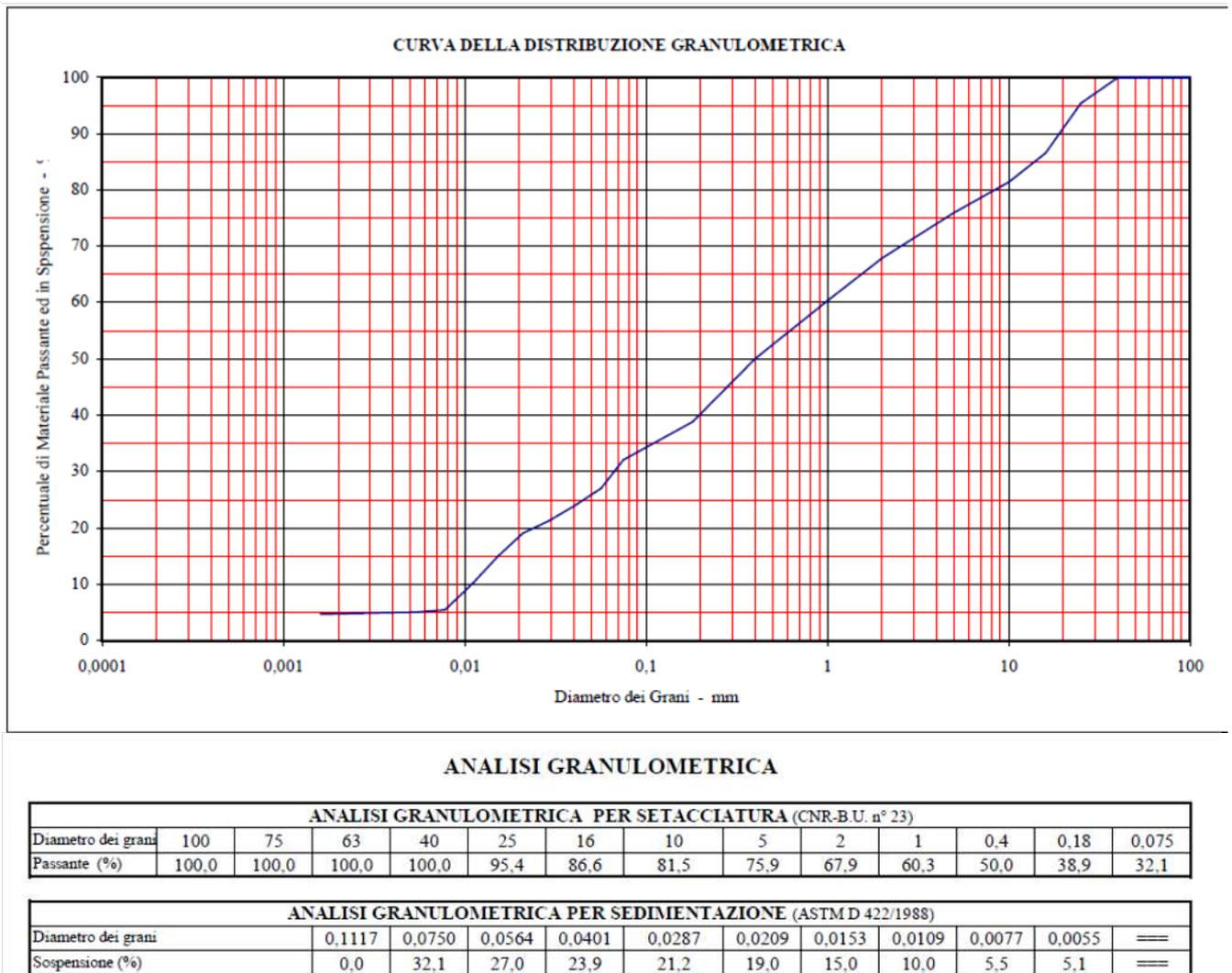


Figura 66 Risultato delle analisi granulometriche.

Per diversi campioni inoltre sono state effettuate analisi di pH e di contenuto di sostanza organica nel laboratorio del CNR di Sassari.

	pH	Ng Kg ⁻¹	% OC	P ₂ O ₅ ppm	Silt %	Clay %	Sand %	2 mm %	1 mm %	0,5 mm %	0,2 mm %
mean	6,36	3,68	3,70	12,86	26,13	26,61	47,26	31,76	2,21	1,41	3,30
st. dev.	0,11	1,23	0,21	1,87	4,61	7,18	3,40	9,78	0,79	0,56	0,88

n. silt fence	DATA PRELIEVO CAMPIONE	30/08/2013	29/01/2014	26/03/2014	10/04/2014
2	VALORI pH	6.46	7.23	7.08	6.7
3	VALORI pH	6.37	6.56	7.01	6.2

Tabella 10 Valori di pH misurati nelle silt fences 2 e 3 nei diversi periodi di monitoraggio

I suoli sono stati classificati per il 90% come appartenenti alla categoria: Loamy sand soil del modello ERMiT, cioè suoli sabbioso – limosi.

Per tutti i campioni di suolo, sia di quello eroso che quello prelevato intorno alle silt fences è stata effettuata anche la misurazione del pH. Il pH è risultato leggermente acido nelle prime misurazioni dopo l'incendio per poi virare verso valori neutri e ritornare dopo un anno dall'incendio a valori vicini a quelli iniziali.

Questa variazione di pH risulta conforme a quello che viene generalmente riportato nella letteratura scientifica sull'argomento.

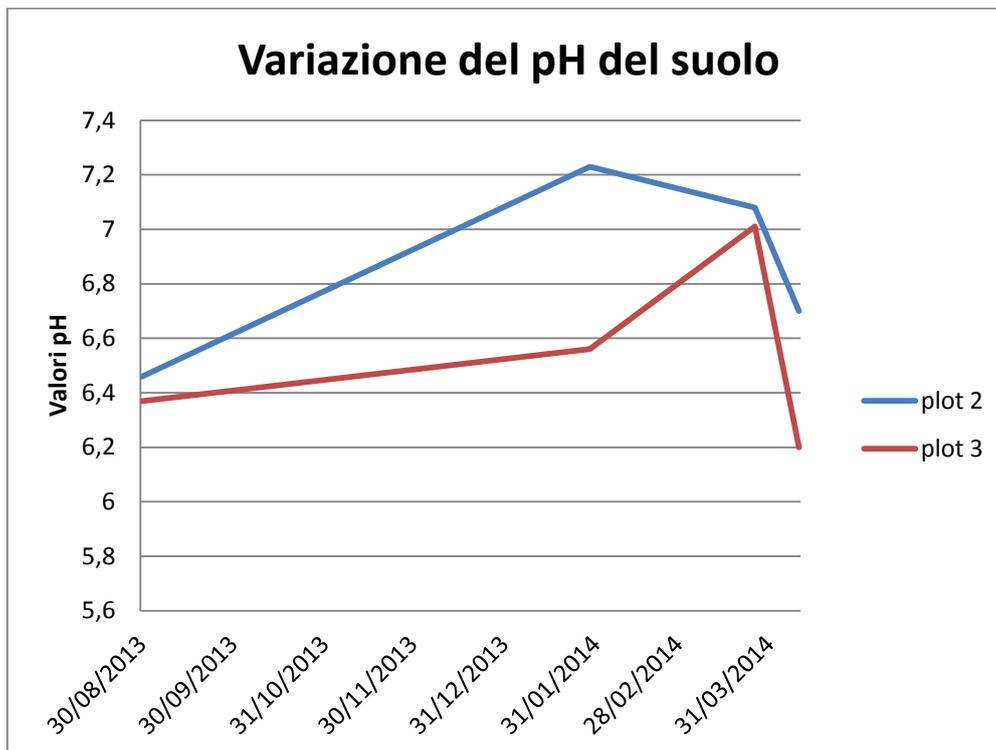


Figura 67 Variazione del pH dal momento successivo all'incendio fino a 8 mesi di distanza per due plot differenti.

13.12 Topografia, lunghezza del versante e pendenza

ERMiT considera come input topografici la pendenza del versante e la sua lunghezza oltre che i gradienti in cima, a metà lunghezza e al piede.

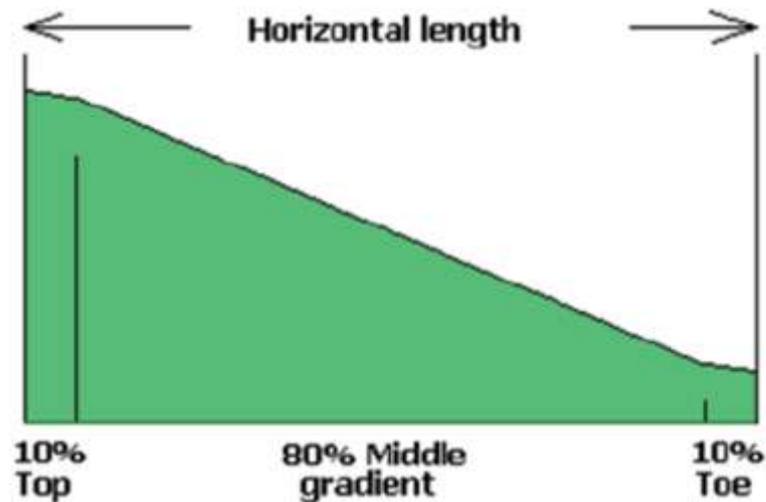


Figura 68 Metodo di misura della pendenza nel modello ERMiT.

La pendenza è stata misurata in campo utilizzando una livella digitale di precisione (Stabila 86 Electronics).

Sono state eseguite tre misure di pendenza posizionando lo strumento a monte, mezza costa e valle del versante. E' stato in seguito calcolato un valore di pendenza medio espresso in percentuale e la pendenza media considerata risulta del 20% per il primo gruppo di *silt fences* e del 35% per il secondo gruppo.

In questo modo si è potuto distinguere due gruppi di *silt fences* in funzione della caratteristica comune, ovvero la pendenza costante.

Il primo gruppo di *silt fences* dal n°1 al n°7, con una pendenza del 20%; il secondo gruppo costituito dalle *silt fences* n°8 e n°10 aventi una pendenza del 35%.

13.13 Grado di severità dell'incendio.

La severità dell'incendio è il risultato di un'analisi effettuata su molteplici caratteristiche del sito combinate con caratteristiche dell'incendio quali durata ed entità. Per questo motivo il modello considera la relazione tra la densità della vegetazione e la quantità di combustibile nel suolo. Alcuni combustibili portano a tempi di permanenza dell'incendio più lunghi provocando quindi danni maggiori al suolo.

La severità dell'incendio è stata misurata utilizzando la metodologia dell'USDA riportata nella "Field guide for mapping soil burn severity" (Parsons et al., 2010)

A conferma della valutazione di tipo visivo sono state effettuate prove di infiltrazione con un miniinfiltrometro. Il grado di idrofobicità del terreno infatti è direttamente correlato con il grado di severità dell'incendio.

La classificazione della severità del suolo bruciato comprende tre classi di cui sotto si riportano le caratteristiche principali:

✓ *Bassa severità (Low soil burn severity)*

Gli strati organici superficiali non sono completamente bruciati e sono riconoscibili. La stabilità degli aggregati non è cambiata rispetto alla condizione precedente l'incendio. Anche la condizione delle radici non è stata modificata dall'incendio. La superficie del suolo e le rocce possono essere di colore marrone o nero (leggermente carbonizzato) il sottobosco può essere ancora di colore verde.

Questo è dovuto al calore non elevato che ha sviluppato l'incendio.

✓ *Moderata severità (Moderate soil burn severity)*

Fino all'80% della copertura vegetale può essere bruciata, possono essere bruciate le radici fini, ma non del tutto, raramente sono consumate in tutta la zona. Il colore della cenere sulla superficie è nero con eventuali macchie grigie. Il colore del sito è generalmente marrone a causa della vegetazione bruciata. La struttura del suolo è generalmente invariata.

✓ *Elevata severità (High soil burn severity)*

Tutta o quasi la superficie del suolo, la lettiera e le radici fini (0.25 cm) sono carbonizzate ed è possibile che siano state bruciate anche le radici di grande diametro (> 8 cm). Il colore predominante del terreno è nero a causa di una vasta carbonizzazione, si evidenzia la presenza di suolo nudo e di cenere. In questa situazione il versante è esposto ad un maggiore pericolo di erosione. La struttura e gli aggregati del terreno sono instabili, la cenere si trova anche a diversi cm di profondità nel terreno. Il suolo può essere grigio, arancione o rossastro, in particolare nelle zone in cui si sono concentrati i maggior quantitativi di combustibile che poi a causa dell'incendio si sono consumati.

Oltre ad una stima visiva dell'area, per la valutazione del grado di severità dell'incendio e per una stima del grado di idrofobicità è stata effettuata una misura dell'infiltrazione con il mini infiltrometro MDI (Decagon Devices Inc., 1998).

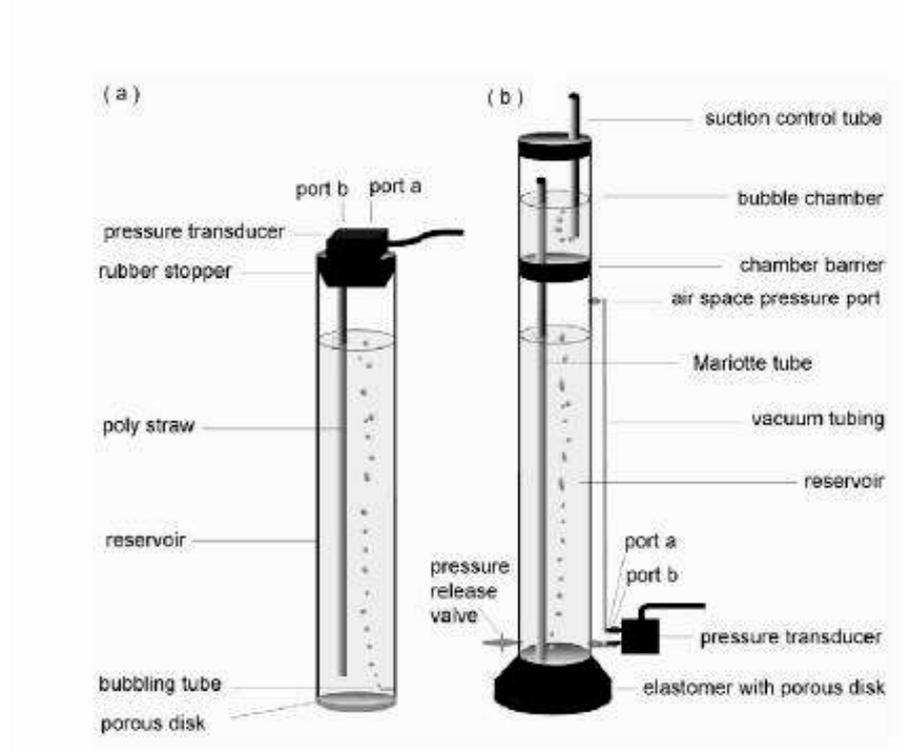


Figura 69 Schema delle parti di funzionamento del mini infiltrometro.

Due misure sono state effettuate utilizzando l' MDI: il tempo tra il contatto del suolo e la formazione della prima bolla d'aria nel tubo dell'infiltrometro, che misura il tempo in cui inizia l'infiltrazione e la quantità di acqua che si infila nel terreno nei primi 5 minuti.



Figura 70 Membrana semipermeabile di materiale ceramico del mini infiltrometro che viene posizionata a contatto del terreno

Questo valore fornisce una velocità di infiltrazione relativa. Il tasso di infiltrazione relativa (più precisamente, il tasso di infiltrazione a tensione specifica, in questo caso 3 mm) misurata con l' MDI è inversamente proporzionale alla WDPT (water drop penetration time) (Lewis et al. 2006) cioè al tempo che impiega una goccia che viene fatta cadere sul terreno ad infiltrarsi.

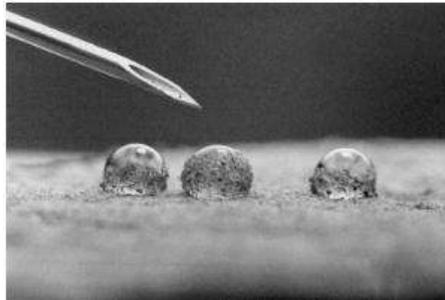


Figura 71 Gocce d'acqua su un terreno idrofobo.

Tramite queste misure è stato possibile determinare la conducibilità idraulica del suolo non saturo e di conseguenza il grado di idrofobicità del suolo. Il sottile strato idrofilo che sovrasta lo strato idrofobo è soggetto, soprattutto nelle aree con ripidi pendii, a una notevole erosione superficiale.

Generalmente gli incendi forestali danno luogo a un incremento di idrofobicità nel caso di basse temperature raggiunte sulla superficie del suolo o a una sua eliminazione nel caso di elevate temperature superficiali.

Indagini condotte in Portogallo sulla variabilità spaziale dell'idrofobicità del suolo di pinete e di foreste di Eucalyptus hanno evidenziato che i composti organici rilasciati durante l'incendio non avevano comportato ulteriori effetti idrofobici rilevabili e che le temperature raggiunte risultavano comunque insufficienti ad eliminare l'idrofobicità superficiale. La riduzione della sostanza organica incorporata al suolo, nel caso in cui si verifici in siti aridi, semi-aridi o forestali, può risultare critica in quanto rappresenta una riserva fondamentale nel bilancio dei nutrienti, in modo particolare dell'azoto, relativa allo specifico sito. La quantità di sostanza organica consumata dal fuoco dipende dal contenuto di umidità del suolo, dalla quantità e dalla durata del riscaldamento e dalla quantità di sostanza organica disponibile per la combustione. La misura dell'infiltrazione superficiale risulta fondamentale per poter fare valutazioni sull'idrofobicità del terreno.

Per quanto riguarda la valutazione dell'erosione post incendio un 'modello' generale di erosione post-incendio era già stato sviluppato negli anni '80 da una serie di ricerche condotte principalmente negli Stati Uniti (Swanson, 1981). In genere gli studi mostrano una quantità di sedimenti in aumento con un picco durante i primi temporali post-incendio quando il terreno tende ad essere più vulnerabile all'erosione. Le produzioni di sedimento tendono diminuire nel tempo e ciò è dovuto in gran parte alla rigenerazione della vegetazione (Inbar et al., 1998; Fox et al., 2006), fino a ritornare a valori tipici di terreno incombusto.

Nel grafico seguente è mostrata la variabilità dell'idrorepellenza in funzione del grado di severità dell'incendio.

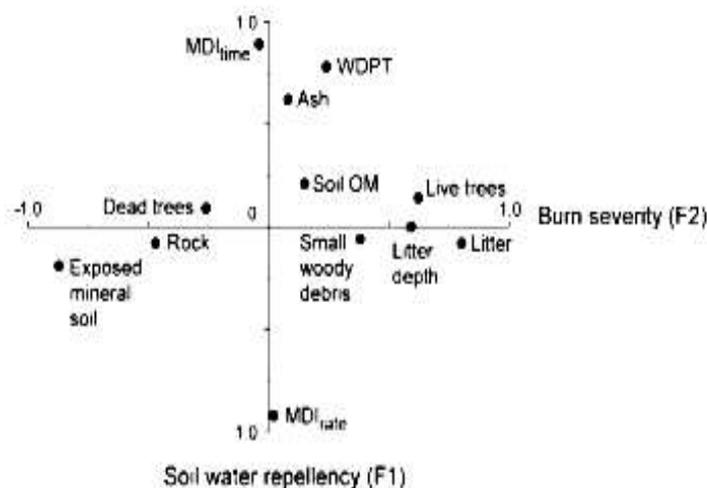


Figura 72 Il grafico mostra l'idrorepellenza del suolo in funzione del grado di severità dell'incendio. Il grafico mostra anche la variabilità dell'idrorepellenza in funzione del suolo minerale esposto rispetto a quello con presenza di lettiera. (dal manuale dello strumento MDI).

Il test che si effettua con lo strumento è molto semplice, si posiziona lo strumento sul terreno in piano dopo aver riempito le due camere d'acqua, sia quella superiore che quella inferiore. La camera superiore (o camera a bolle) controlla la suzione. La camera inferiore contiene il volume d'acqua che si infila nel terreno ad una velocità determinata dalla aspirazione selezionata nella camera a bolle (nel nostro caso 3 cm). La camera inferiore è costituita da un cilindro graduato, con il volume indicato in ml. La parte inferiore dell' infiltrometro ha un disco di acciaio inossidabile sinterizzato poroso che non consente all'acqua di infiltrarsi all'aria aperta. Il piccolo diametro del disco permette le misurazioni indisturbate a livello della superficie del terreno. Una volta che si posiziona l'infiltrometro su un terreno, l'acqua comincia a lasciare la camera inferiore e infiltrarsi nel terreno ad una velocità determinata dalle proprietà idrauliche del suolo. La diminuzione del livello d'acqua, permette di registrare il volume ad intervalli specifici

(per esempio ogni 30 secondi per un terreno limo argilloso). Si può quindi tracciare un grafico con questi dati utilizzando il foglio di calcolo di Microsoft Excel (www.decagon.com/macro) per calcolare la conducibilità idraulica del non saturo.

L'intervallo di tempo che si sceglie per effettuare le misurazioni si basa sia sul tasso di aspirazione selezionato che sul tipo di terreno. Ad esempio, per una sabbia passeranno tipicamente 2-5 secondi tra le letture, in un terriccio limoso si effettueranno le letture ogni 30 secondi, e per un'argilla ci vorranno da 30 a 60 minuti. Perché il calcolo della conducibilità idraulica sia accurato almeno 15-20 ml di acqua devono essere infiltrati nel terreno durante ogni misurazione.

L'infiltrometro Mini Disk misura la conducibilità idraulica del mezzo su cui è posto. Poiché l'infiltrometro ha una aspirazione regolabile (0,5- 7 cm) si possono ottenere diverse informazioni sul terreno, eliminando i macropori con un valore di ingresso dell'aria inferiore alla aspirazione dell'infiltrometro. Questo può essere effettuato controllando l'infiltrazione con una piccola pressione negativa o aspirazione. Quando l'acqua è in tensione o in aspirazione, non entrerà nei macropori come crepe o wormholes, ma si muoverà solo attraverso il suolo grazie alle forze idrauliche presenti nel terreno. I valori di conducibilità satura si ottengono quando tutti i pori, compresi quelli di grandi dimensioni (come crepe o wormholes), sono saturi. Il flusso nei macropori, tuttavia, è estremamente variabile da luogo a luogo, e quindi difficile da quantificare. L'acqua infiltrandosi sotto una tensione superficiale impedisce il riempimento dei macropori e fornisce una caratteristica conducibilità idraulica della matrice suolo, che è meno variabile spazialmente. La conducibilità idraulica del suolo è una funzione del potenziale dell'acqua e del contenuto di acqua del suolo. La diminuzione della conducibilità del suolo asciutto è dovuta principalmente al movimento dell'aria nel terreno per sostituire l'acqua. Come l'aria si muove attraverso dei percorsi, il flusso d'acqua tra le particelle di terreno diventa più piccolo e il percorso più tortuoso, e il movimento dell'acqua diventa più difficile.

13.14 Calcolo dell'infiltrazione

Un certo numero di metodi sono disponibili per la determinazione della conduttività idraulica del suolo attraverso questi dati. Il metodo proposto da Zhang (1997) è abbastanza semplice, e funziona bene per misure di infiltrazione nel suolo asciutto. Il metodo richiede la misurazione dell'infiltrazione cumulativa in funzione del tempo e il calcolo dei risultati con la funzione:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t}$$

dove C_1 ($s^{-1} m$) e C_2 ($m s^{-1/2}$) sono due parametri. C_1 è correlato alla conduttività idraulica e C_2 è la capacità di adsorbimento del suolo. La conduttività idraulica del suolo (k) viene quindi calcolata come

$$k = \frac{C_1}{A}$$

dove C_1 è la pendenza della curva di infiltrazione cumulativa vs. la radice quadrata del tempo, e A è un valore relativo ai parametri di van Genuchten per un determinato tipo di suolo per il tasso di aspirazione tasso e per un determinato raggio del disco dell'infiltrometro. Il Mini Disk infiltra acqua con una aspirazione variabile da -0.5 a -6 cm e ha un raggio di 2,25 centimetri. I parametri di van Genuchten per 12 classi di tessitura del suolo sono stati ottenuti da Carsel e Parrish (1988). I valori di A calcolati per il Mini Disk sono riportati nella tabella seguente:

			h_0						
			-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Texture		n	A						
sand	0.145	2.68	2.84	2.40	1.73	1.24	0.89	0.64	0.46
loamy sand	0.124	2.28	2.99	2.79	2.43	2.12	1.84	1.61	1.40
sandy loam	0.075	1.89	3.88	3.89	3.91	3.93	3.95	3.98	4.00
loam	0.036	1.56	5.46	5.72	6.27	6.87	7.53	8.25	9.05
silt	0.016	1.37	7.92	8.18	8.71	9.29	9.90	10.55	11.24
silt loam	0.020	1.41	7.10	7.37	7.93	8.53	9.19	9.89	10.64
sandy clay loam	0.059	1.48	3.21	3.52	4.24	5.11	6.15	7.41	8.92
clay loam	0.019	1.31	5.86	6.11	6.64	7.23	7.86	8.55	9.30
silty clay loam	0.010	1.23	7.89	8.09	8.51	8.95	9.41	9.90	10.41
sandy clay	0.027	1.23	3.34	3.57	4.09	4.68	5.36	6.14	7.04
silty clay	0.005	1.09	6.08	6.17	6.36	6.56	6.76	6.97	7.18
clay	0.008	1.09	4.00	4.10	4.30	4.51	4.74	4.98	5.22

Tabella 11 Parametri di van Genuchten per 12 classi di tessitura di suolo e valori di A calcolati per un infiltrometro a disco con raggio pari a 2.25 cm e suzione variabile da 0.5 a 6 cm. (Dal manuale dell'MDI Decagon Device).

Un'equazione quadratica che considera tutti questi parametri è disponibile on line nel sito della ditta produttrice dello strumento. Attraverso questo foglio di calcolo sono stati generati i grafici relativi all'infiltrazione.

Sono stati creati i grafici della velocità di infiltrazione e confrontati per i diversi periodi di campionamento e per le diverse silt fences. I risultati sono stati analizzati statisticamente con il metodo ANOVA. L'analisi della varianza (ANOVA) è un insieme di tecniche statistiche facenti parte della statistica inferenziale che permettono di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi. I grafici per le diverse silt fences riportano più o meno lo stesso andamento temporale- Si riportano i grafici del plot 1 per il mese di agosto 2013, luglio e ottobre 2014. Si nota che subito dopo l'incendio, ad agosto 2013, quando il terreno era coperto di cenere, il coefficiente di infiltrazione superficiale era molto basso ed il tempo di infiltrazione molto elevato, a riprova dell'elevata idrofobicità del suolo.

Man mano che le piogge hanno dilavato lo strato superficiale del terreno e che la cenere è stata assorbita l'infiltrazione è aumentata e il tempo di infiltrazione è diminuito.

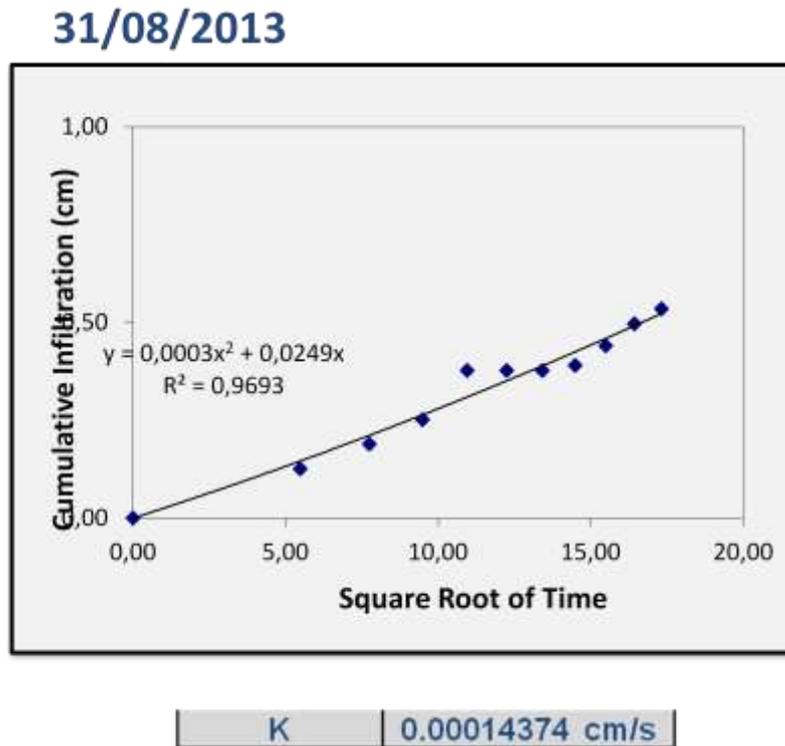


Figura 73

Dopo quasi un anno si vede nella figura seguente che i valori di infiltrazione, pur essendo dello stesso ordine di grandezza sono quasi raddoppiati. Stessa tendenza per la misurazione successiva, anche se nell'ultima misurazione il suolo risultava più umido delle due volte precedenti, in quanto è stata fatta nella stagione autunnale.

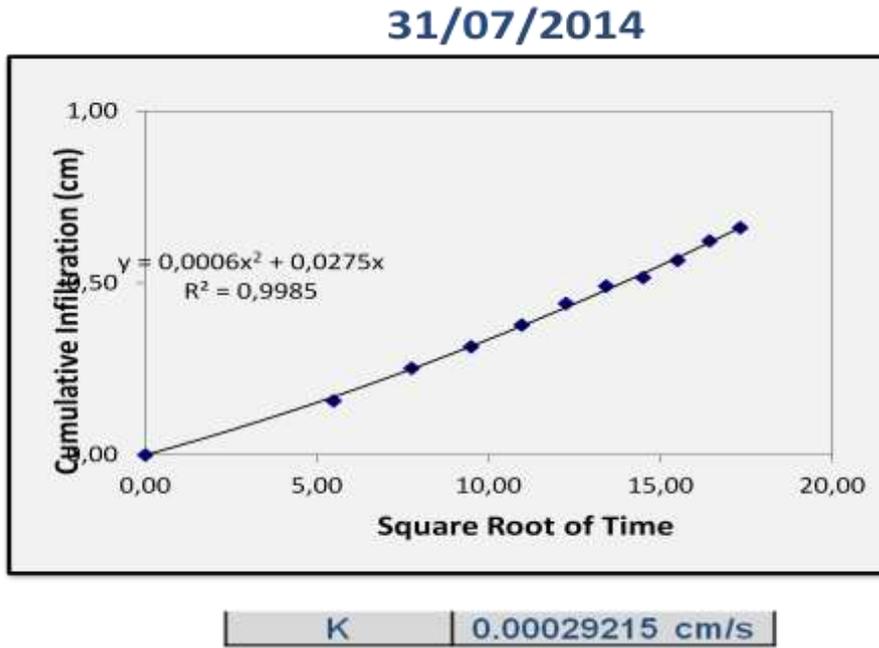


Figura 74

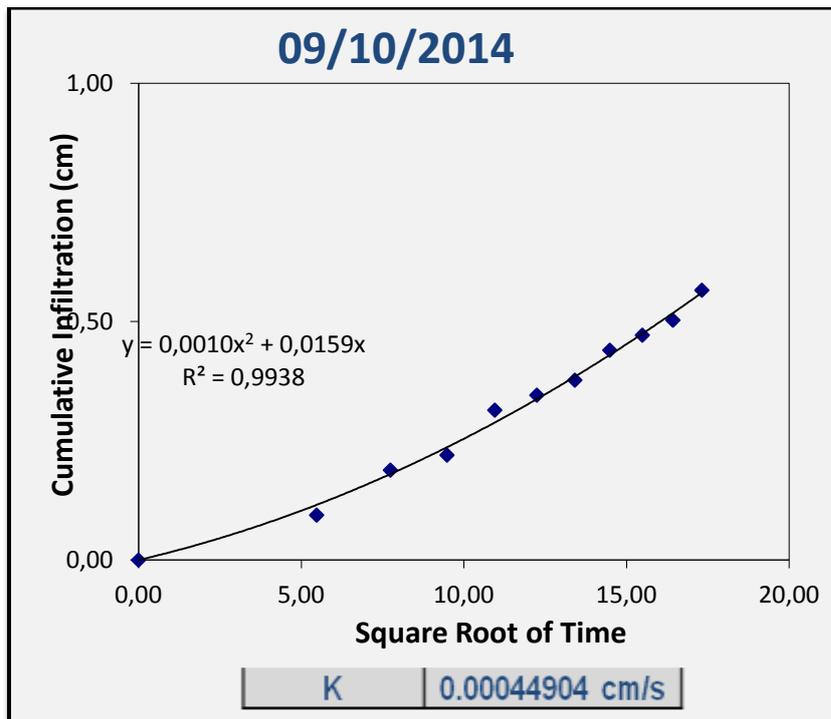


Figura 75

ERMiT utilizza due diversi set di parametri, un insieme per bassa severità dell'incendio (L) ed un set per l'alta gravità dell'incendio (H). La topografia del versante, la vegetazione, e i valori dei parametri del suolo vengono applicati in combinazione per ogni elemento di scorrimento superficiale (OFEs). ERMiT modella il versante con tre

elementi di variabilità spaziale. Per il grado di severità dell'incendio moderato ERMiT utilizza una matrice con diverse combinazioni per il versante in esame:

(High=H, L=Low)

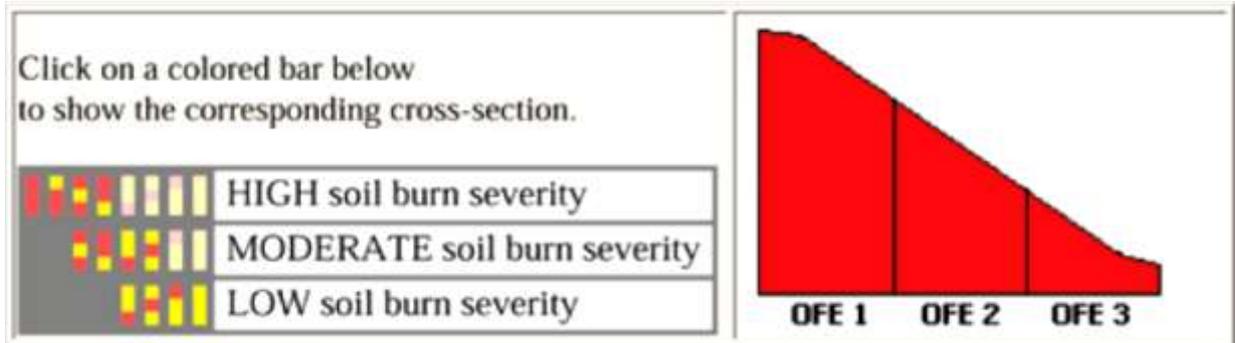


Figura 76 Grafico rappresentativo della severità dell'incendio generata dal modello ERMiT, i quadrati di colore più intenso indicano la severità generata per il primo anno dopo l'incendio. I quadrati gialli indicano severità bassa e quelli rossi elevata. I quadrati di colore più chiaro indicano la simulazione per diversi anni dopo il primo. In rosso a destra invece è rappresentato il versante suddiviso nei diversi segmenti (OFEs). Tratto dal manuale del modello.

HLH (25 percent occurrence probability)

HHL (25 percent occurrence probability)

LLH (25 percent occurrence probability)

LHL (25 percent occurrence probability)

Le tre lettere rappresentano il piede, il centro e la sommità del versante e le combinazioni con cui il modello le considera per generare una severità moderata.

Sulla base di tutte queste considerazioni la severità dell'incendio è stata considerata "moderata". Tale valutazione si è basata sia sulle analisi visive della valutazione della capacità di ripresa vegetativa che sull'infiltrazione superficiale del soprassuolo. Tale valore è stato inserito all'interno del modello.

14. OUTPUT DEL MODELLO

ERMiT produce in output due tipo di stima stima probabilistica. Una stima degli eventi meteorologici estremi calcolata sulla base dei dati meteo in input ed una stima della quantità dei sedimenti erosi. In particolare produce come risultato la stima della quantità di sedimenti erosi (t/ha) per diverse percentuali di probabilità.

Nello specifico esso genera:

1. Tabella degli eventi di pioggia relativi per un periodo di 100 anni a partire dalle condizioni iniziali. La tabella riporta i dati relativi a:
 - ✓ *Storm rank*: elenco tempeste dalla più grande alla più piccola;
 - ✓ *Storm runoff* [mm]: deflusso totale modellato dal modello WEPP per ogni tempesta;
 - ✓ *Storm precipitation* [mm]: totale della precipitazione per ciascun evento;
 - ✓ *Storm duration* [h]: durata della tempesta;
 - ✓ 10-min and 30-min *peak rainfall intensity* [h^{-1} o $mm\ h^{-1}$]: valori stimati dell'intensità di precipitazione per un dato evento;
 - ✓ *Storm date*: mese giorno e anno dell'evento meteo estremo simulato.

La tabella riportata in fig. 77 è valida per tutte le simulazioni. Nella prima parte riporta, per un intervallo temporale di 100 anni, le medie annuali delle precipitazioni, il deflusso superficiale dovuto alle precipitazioni e quello dovuto allo scioglimento del ghiaccio d'inverno. Quest'ultimo parametro nel nostro caso non è presente. Nella seconda parte riporta tutte le caratteristiche degli eventi di pioggia che, sulla base dei dati climatici inseriti, si presume avverranno nell'intervallo di 100 anni.

La tabella di fig.77 non si riporta tra gli *output* di ciascuna simulazione, essendo comune a tutte le simulazioni.

100 - YEAR MEAN ANNUAL AVERAGES						
731.49 mm annual precipitation from						Total in 100 years
39.95 mm annual runoff from rainfall from						10216 storms
0.33 mm annual runoff from snowmelt or winter rainstorm from						817 events
						5 events
Rainfall Event Rankings and Characteristics from the Selected Storms						
Storm Rank based on runoff (return interval)	Storm Runoff (mm)	Storm Precipitation (mm)	Storm Duration (h)	10-min Peak Rainfall Intensity (mm h ⁻¹)	30-min Peak Rainfall Intensity (mm h ⁻¹)	Storm Date
1	93.4	165.3	8.97	66.01	61.83	March 4 year 24
5 (20-year)	38.9	74.8	4.53	110.12	85.32	August 23 year 39
10 (10-year)	33.6	62.2	3.97	92.74	71.63	September 30 year 26
20 (5-year)	23.8	54.4	2.94	63.33	52.10	October 17 year 66
50 (2-year)	11.1	36.4	3.22	59.24	44.65	November 28 year 16
75 (1 ¹ / ₂ -year)	7	28.3	2.74	65.88	43.63	January 17 year 53

Figura 77 Output del modello ERMIT relativo agli eventi meteo, comprese tempeste, nevicate ed eventi di pioggia intensi simulati sulla base dei dati meteo in ingresso per 100 anni a partire dalle condizioni di input.

2. Tabella relativa alla probabilità di erosione del suolo. Tale valore viene espresso in percentuale. E' possibile ottenere una tabella simile per tutti i valori di percentuale fino ad arrivare alla probabilità del 99.9% .

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	1.5	0.7	0.4	0.4	0.4
Seeding	1.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Mulch (1 t ha ⁻¹)	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Mulch (2 t ha ⁻¹)	0.38	0.4	0.4	0.4	0.4
Mulch (3.5 t ha ⁻¹)	0.37	0.4	0.4	0.4	0.4
Mulch (4.5 t ha ⁻¹)	0.36	0.4	0.4	0.4	0.4
Erosion Barriers: Diameter 0 m Spacing 50 m					
Logs & Wattles	1.5	0.7	0.4	0.4	0.4

Figura 78 Stima sedimenti erosi per una probabilità del 20%

La tabella mostra, per la probabilità riportata in alto a sinistra, la quantità prevista [t ha⁻¹] di sedimenti erosi relativa a ciascun anno per i cinque anni successivi all'incendio. Tale probabilità si riferisce ad un'erosione stimata, con probabilità di eccedere del 20% per il primo anno, pari ad un certo quantitativo di (t/ha) e si riduce nei cinque anni successivi fino ad arrivare a valori prossimi allo zero. All'aumentare della probabilità, la stima della quantità di materiale eroso diminuisce. Fino al 40% di probabilità si stima ancora un'erosione possibile per il quinto anno. Considerando più alte percentuali di probabilità le previsioni diminuiscono.

Il modello simula l'erosione per un suolo non trattato o per un suolo trattato con sistemi antierosivi. Nel nostro studio sono stati considerati solo valori di suolo non trattato, ovvero senza nessun sistema antierosivo. Consideriamo questi valori in quanto in Italia non è diffusa la pratica di adottare delle misure di riduzione dell'erosione in terreni percorsi da incendio come invece avviene negli Stati Uniti in cui si utilizzano diverse tecniche di trattamento post incendio.

Negli Stati Uniti e nel mondo, uno dei principali problemi di gestione del territorio riguarda proprio gli incendi. Per tale motivo, in America si presta particolare importanza ai trattamenti da effettuare sul suolo dopo l'incendio. I trattamenti che vengono considerati dallo modello ERMiT nella simulazione sono: *seeding* (semina), *mulch* (pacciamatura), *erosion barriers* (barriere antierosive). Si riporta nel seguito una breve descrizione dei metodi:

La semina consiste nel seminare il suolo utilizzando sementi di specie idonee al sito incendiato in modo che producano velocemente il manto protettivo e quindi contrastino in modo efficace l'erosione con la formazione dell'apparato radicale.

La pacciamatura consiste nel ricoprire il terreno con uno strato di materiale, al fine di impedire la crescita delle malerbe, mantenere l'umidità nel suolo, proteggere il terreno dall'erosione, dall'azione della pioggia battente, evitare la formazione della cosiddetta crosta superficiale, diminuire il compattamento, mantenere la struttura e innalzare la temperatura del suolo.

Vari sono i materiali che si prestano a questa tecnica agricola, anche usati in combinazione tra loro: si va dai materiali organici (erbacei o legnosi, ottenuti spesso dalla trinciatura dei residui colturali), a quelli inerti, fin all'utilizzo di appositi teli pacciamanti in film sintetici o bioplastici:

- bucce di cacao
- paglia
- foglie secche
- erba di sfalcio
- corteccia di pino sminuzzata
- cartone
- strame
- film plastici o bioplastici
- tessuto non tessuto
- ghiaia
- balle di juta
- fibra di canapa corta semimacerata

(fonte Wikipedia : <http://it.wikipedia.org/wiki/Pacciamatura>).

Nella tabella in fig. 78 è inoltre possibile valutare gli effetti delle barriere antierosive che si progetta di inserire nel sito. Ovvero, inserendo nel terreno delle barriere, si può valutare l'impatto del sistema antierosivo in termini di quantità di sedimenti prodotti. Quindi questo fornisce un valido strumento per dimensionare le barriere nel modo corretto.

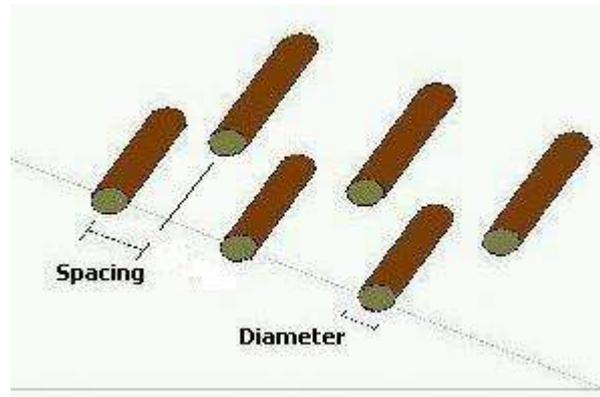


Figura 79 tipologia di barriere antierosive che è possibile simulare con il modello ERMiT

Della tabella degli output si considera solo la parte riportata sotto in cui è presente la probabilità del 20% che tali valori di erosione vengano superati ed è indicata in alto a sinistra per i cinque anni considerati e per un suolo non trattato con sistemi antierosivi:

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	1.7	1.1	0.7	0.6	0.44

Figura 80 estratto della tabella di output per la probabilità del 20%

15. SIMULAZIONI

Le simulazioni sono state effettuate sia per singole silt fences che per gruppi di silt fences per vedere quale fosse la variabilità da sito a sito. Ovviamente i risultati simulati per i gruppi sono i più rappresentativi dell'erosione di versante. Inoltre le simulazioni sono state effettuate, a parità di altri parametri, sia con i dati di vegetazione del periodo post incendio (agosto 2013), in cui la vegetazione a terra era quasi nulla, sia per il periodo di febbraio 2014, a distanza di 8 mesi dall'incendio, tenendo conto della ripresa vegetativa della sughera e della vegetazione erbacea.

15.1 SIMULAZIONE PER SINGOLE SILT FENCES E CONFRONTO DEI RISULTATI NEL TEMPO

Si è proceduto ad effettuare una simulazione per ciascuna *silt fence*. I parametri in *Input* comuni a tutte le simulazioni sono:

- Parametri climatici;
- *Soil texture: sandy loam*;
- *Hillslope horizontal lenght: 10[m]*;
- *Soil burn severity class: moderate*.

La pendenza e la vegetazione sono i parametri che cambiano da simulazione a simulazione.

15.1.1. Silt Fence N°1

Si riportano di seguito le tabelle relative agli *output* forniti dal modello relativi alla prima *silt fence* ed alle quantità di sedimenti erosi stimati con i dati di input relativi al mese di agosto 2013 e al mese di febbraio 2014. L'ultima tabella riporta il risultato del confronto tra l'erosione stimata per il mese di agosto e quella stimata per il mese di febbraio.

probability [%]	1st year [t/ha]	2nd year [t/ha]	3rd year [t/ha]	4th year [t/ha]	5th year [t/ha]
20	1,98	0,9	0,63	0,59	0,5
30	1,1	0,58	0,4	0,4	0,4
40	0,6	0,4	0,3	0,16	0,1
50	0,39	0,1	0,1	0,1	0,1
60	0,1	0,1	0	0	0
70	0,1	0	0	0	0

Tabella 12:output agosto

probability [%]	1st year [t/ha]	2nd year [t/ha]	3rd year [t/ha]	4th year [t/ha]	5th year [t/ha]
20	1,82	0,76	0,5	0,4	0,4
30	0,93	0,5	0,3	0,3	0,3
40	0,5	0,3	0,2	0,16	0,1
50	0,3	0,1	0,05	0	0
60	0,1	0,1	0	0	0
70	0,1	0	0	0	0

Tabella 13 output febbraio

Per fare un confronto dei dati, si considerano i dati relativi alla probabilità di simulazione del 20% per i primi 5 anni. Ad agosto è stata stimata un'erosione pari a 1.98 (t/ha) a febbraio invece una quantità pari a 1.82 (t/ha). Facendo quindi un confronto tra i due periodi, vi è stato durante l'intervallo di tempo considerato una riduzione dell'erosione pari a 0.16 (t/ha). Nei successivi anni si evidenzia una diminuzione dell'erosione stimata sia per il mese di agosto sia per il mese di febbraio. I dati della diminuzione si riportano nella tabella sottostante.

probability [%]	1st year [t/ha]	2nd year [t/ha]	3rd year [t/ha]	4th year [t/ha]	5th year [t/ha]
20	0,16	0,14	0,13	0,19	0,1
30	0,17	0,08	0,1	0,1	0,1
40	0,1	0,1	0,1	0	0
50	0,09	0	0,05	0,1	0,1
60	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0

Tabella 14:Differenza tra le simulazioni di agosto 2013 e febbraio 2014 (t/ha)

Le simulazioni sono state effettuate per tutte le singole silt fences e i risultati ottenuti mostrano che per tutte quelle con una pendenza pari al 20% la diminuzione di erosione stimata media ammonta a 0,2 t/ha; si attesta invece intorno a 0,36 t/ha per quelle a maggior pendenza. Tra i risultati parziali si è calcolato che per il periodo di agosto successivo all'incendio, la *silt fence* in cui si è avuto il maggior quantitativo di sedimenti erosi stimato è la numero 8 con una quantità pari a 3.99 (t/ha), mentre la *silt fence* che ha avuto minore quantità di sedimenti erosi stimata è la numero 6 con 1.40 (t/ha). A febbraio si è avuto lo stesso risultato anche se con una lieve diminuzione delle quantità. Le due silt fences citate sono diverse, in primo luogo per quanto riguarda la pendenza. Infatti la *silt fence* 8 ha una pendenza media del 35% contro una pendenza media del 20% della *silt fence* 6. Sicuramente questo è uno degli aspetti che influisce maggiormente nella previsione da parte del modello dell'erosione dei sedimenti di versante. Di seguito si riporta il grafico relativo all'andamento della stima dell'erosione nel mese di agosto per la *silt fence* n°6 e quello relativo allo stesso periodo per la *silt fence* n°8.

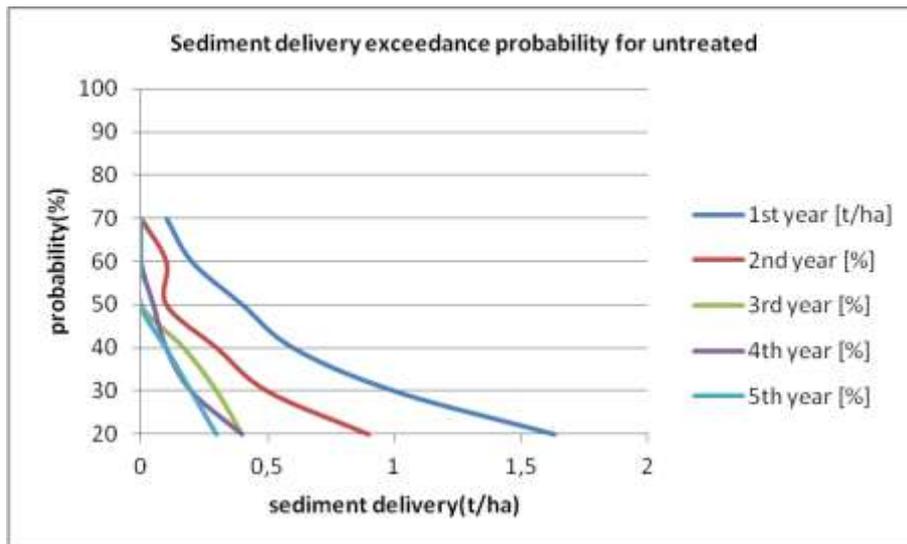


Figura 81 Andamento erosione silt fence n°6

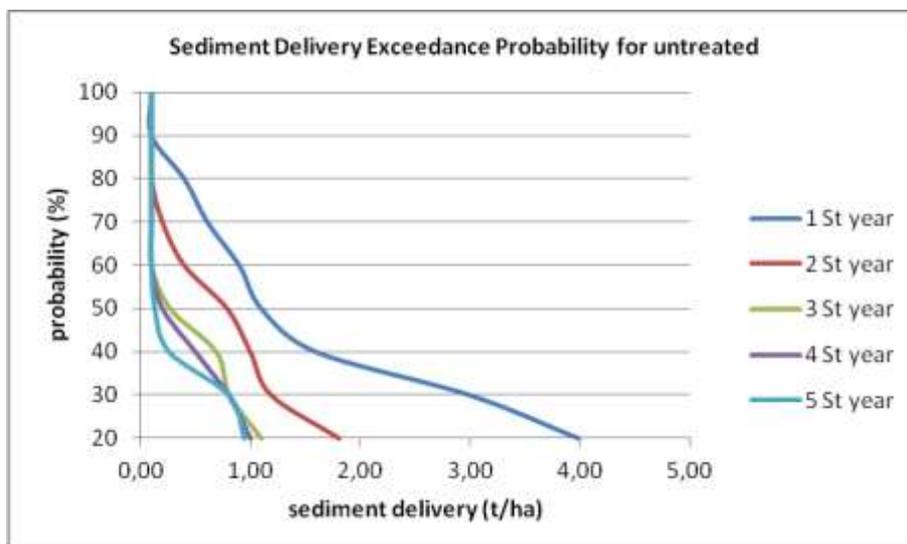


Figura 82: Andamento erosione silt fence n°8

15.2 SIMULAZIONE PER GRUPPI DI SILT FENCES E CONFRONTO DEI RISULTATI NEL TEMPO.

In questa simulazione sono stati considerati due gruppi di *silt fences* accomunati dal valore della pendenza. Per gli altri parametri di *input* richiesti è stato utilizzato un valore mediato sul gruppo :

- Gruppo 1: *silt fences* numero 1,2,3,4,5,6,7 aventi pendenza media pari al 20%;
- Gruppo 2: *silt fences* 8, 9, 10 aventi pendenza media del 35%.

Nel seguito vengono riportati i dati delle simulazioni effettuate per ogni gruppo di *silt fences*, una simulazione relativa al mese di agosto e una relativa al mese di febbraio.

15.2.1 Simulazione relativa al Gruppo 1 di silt fences : periodo agosto 2013

Parametri di Input

Si riporta sotto la schermata di input del modello ERMIT in cui sono stati inseriti i dati. Si evidenzia che la vegetazione del sito costituita in gran parte da sughera (46.43%), la vegetazione erbacea è stata distrutta (0%) e si ha un'importante percentuale di suolo nudo (53.57%).

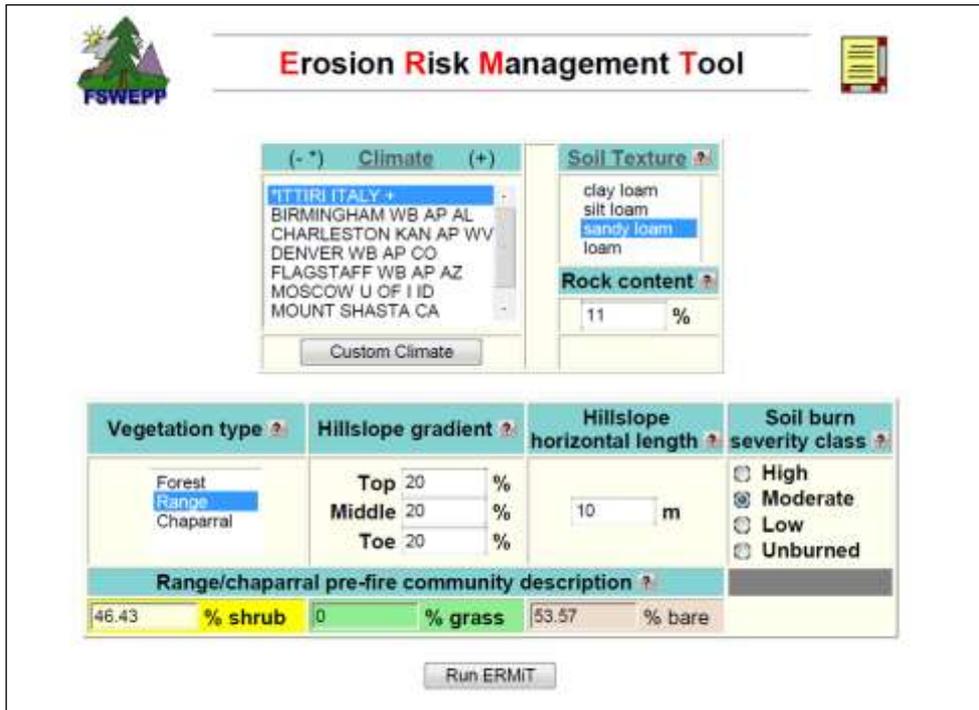


Figura 83: Schermata di input del modello

Output

Si riporta sotto un estratto della tabella di output relativa al 20% di probabilità dei valori simulati.

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	1.5	0.7	0.4	0.4	0.4

Figura 84: Erosione stimata per la probabilità del 20%

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva degli *output* relativi alle diverse probabilità per i cinque anni successivi all'incendio per la tipologia prese in considerazione, suolo non trattato (*untreated*) e il relativo grafico riassuntivo dei risultati.

probability	1 St year	2 St year	3 St year	4 St year	5 St year
[%]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	1,50	0,70	0,40	0,40	0,40
30	1,00	0,50	0,20	0,20	0,20
40	0,63	0,40	0,20	0,18	0,10
50	0,40	0,20	0,10	0,07	0,00
60	0,30	0,10	0,00	0,00	0,00
70	0,20	0,10	0,00	0,00	0,00

Tabella 15 Output relativi alle diverse probabilità di accadimento

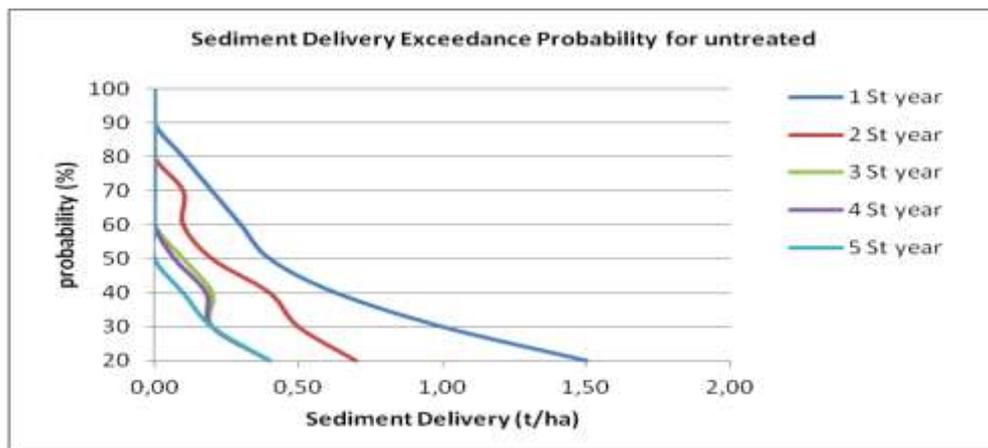


Figura 85: Sedimenti erosi relativi a diverse probabilità

Il modello stima, con una probabilità di eccedere tale valore del 20% che nel primo anno si abbia erosione pari a 1.50 t/ha. Per tale probabilità la quantità di sedimenti erosi prevista diminuisce nel corso degli anni, fino ad arrivare ad una minima quantità nel quinto anno. Stesso andamento, viene stimato con diverse probabilità dal 20 al 90%.

15.2.2 GRUPPO 1 SILT FENCES: SIMULAZIONE RELATIVA AL MESE DI FEBBRAIO 2014.

Input

Si riporta sotto la stampa della schermata di input del modello ERMIT in cui sono stati inseriti i dati. La vegetazione in questo caso è costituita in percentuale maggiore dalla sughera (50%) è presente vegetazione erbacea (29.7%), la percentuale di suolo nudo è pari al 20.3.

Figura 86: Schermata di input del modello

Output

Si riporta sotto, in sequenza, un estratto della tabella relativa alla probabilità del 20%, la tabella e il grafico in cui sono riportati tutti i dati di *output* relativi alle diverse probabilità di accadimento.

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	1.44	0.7	0.4	0.3	0.25

Figura 87: Erosione dei sedimenti stimata per la probabilità del 20%

probability	1 St year	2 St year	3 St year	4 St year	5 St year
[%]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	1,44	0,70	0,40	0,30	0,25
30	0,90	0,40	0,20	0,20	0,20
40	0,53	0,30	0,10	0,10	0,10
50	0,40	0,20	0,10	0,00	0,00
60	0,20	0,10	0,00	0,00	0,00
70	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 16: Output relativi alle diverse probabilità

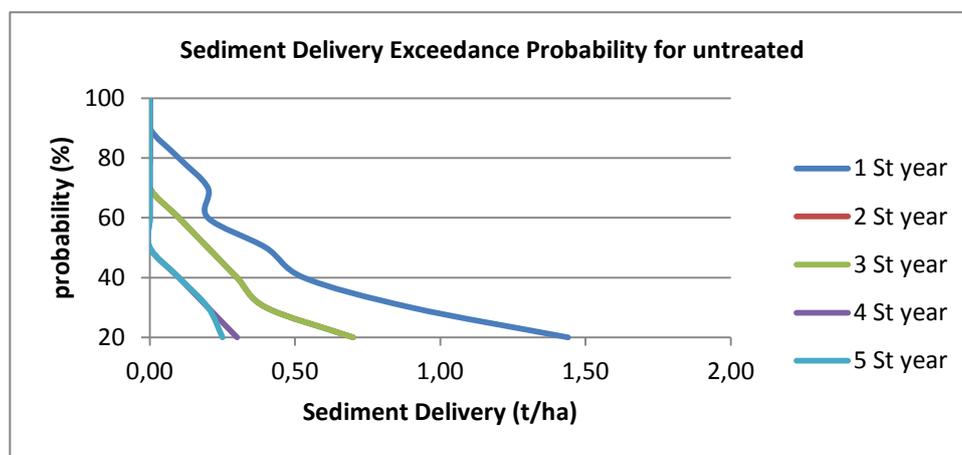


Figura 88: Erosione relativa a diverse probabilità

Il modello stima che per il primo anno si abbia il 20% di probabilità che si superi un valore di erosione pari a 1.44 (t/ha). La quantità di sedimenti stimata con la stessa probabilità, diminuisce con il passare degli anni.

Per verificare l'andamento dell'erosione, possiamo immaginare di tracciare una linea orizzontale nel grafico. Se per esempio tracciamo questa linea al 40% di probabilità, vedremo che la linea interseca il grafico nella curve relative ai diversi anni presi in considerazione dal modello. Riportando il punto di intersezione tra la linea orizzontale immaginaria e la curva relativa all'anno considerato nell'asse delle ascisse che nello specifico è costituita dalle quantità di sedimenti erosi in t/ha, si può ricavare per ogni anno la quantità di sedimenti erosi stimata e la probabilità con cui viene fatta tale stima. Con riferimento al grafico in fig.88, il modello stima che si abbia il 40% di probabilità che per il primo anno si ecceda il valore di erosione pari a 0.53 t/ha, per il secondo anno un'erosione pari 0.30 t/ha e per gli anni successivi si stima una quantità di sedimenti erosi pari a 0.10 t/ha.

15.2.3 Confronto dei risultati della simulazione per il gruppo silt fences 1 per i periodi agosto-febbraio

Confrontando i dati relativi ad agosto 2013 e a febbraio 2014 si evince che ad agosto la quantità di sedimenti erosa stimata dal modello è maggiore di quella stimata per il mese di febbraio. Nella tabella in basso si riporta la differenza di quantità di sedimenti erosi stimata dal modello, ovvero la quantità di cui si è ridotta l'erosione stimata a febbraio 2014 rispetto alla quantità stimata dallo stesso in agosto 2013. Con la simulazione relativa ai dati di febbraio si è avuta una diminuzione dell'erosione pari a 0.06 (t/ha). Stesso discorso può essere fatto per le altre percentuali di probabilità. La diminuzione dell'erosione che si è stimata a febbraio è senz'altro dovuta all'incremento della vegetazione che si è avuto tra i due periodi di tempo considerati e alla conseguente diminuzione del suolo nudo e all'azione stabilizzante dell'apparato radicale, la vegetazione infatti svolge un'importante funzione antierosiva.

probability	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	0,06	0	0	0,1	0,15
30	0,1	0,1	0	0	0
40	0,1	0,1	0,1	0,08	0
50	0	0	0	0,07	0
60	0,1	0	0	0	0
70	0	0,1	0	0	0

Tabella 17: Output relativi al confronto dei sedimenti erosi nei diversi periodi di tempo per diverse probabilità

15.2.4 Simulazione per il gruppo di silt fences n. 2: Periodo di agosto 2013

Dati di Input

Come per il primo gruppo di silt fences, si effettua la simulazione dell'erosione post incendio, tenendo costanti tutti i parametri e facendo variare solo i valori della vegetazione per il periodo successivo all'incendio e per il periodo relativo a febbraio 2014, 8 mesi dopo l'evento. Nel modello in input sono stati inseriti, come nel caso precedente, per il periodo immediatamente successivo all'incendio, i dati della vegetazione che è composta quasi esclusivamente dalla sughera (26.7%), la vegetazione erbacea è andata distrutta e si è misurata una alta percentuale di suolo nudo (73.3%).

Output

Si riporta sotto, in sequenza, un estratto della tabella relativa alla probabilità del 20%, la tabella e il grafico in cui sono riportati tutti i dati di *output* relativi alle diverse probabilità.

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	3.69	1.6	0.9	0.8	0.73

Figura 89: Erosione stimata per la probabilità del 20%

probability	1 St year	2 St year	3 St year	4 St year	5 St year
[%]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	3,69	1,60	0,90	0,80	0,73
30	2,40	1,00	0,70	0,66	0,61
40	1,40	0,78	0,48	0,35	0,10
50	1,00	0,60	0,15	0,10	0,10
60	0,70	0,30	0,10	0,10	0,05
70	0,50	0,10	0,07	0,00	0,00
80	0,30	0,10	0,00	0,00	0,00

Tabella 18: Output relativi alle diverse probabilità

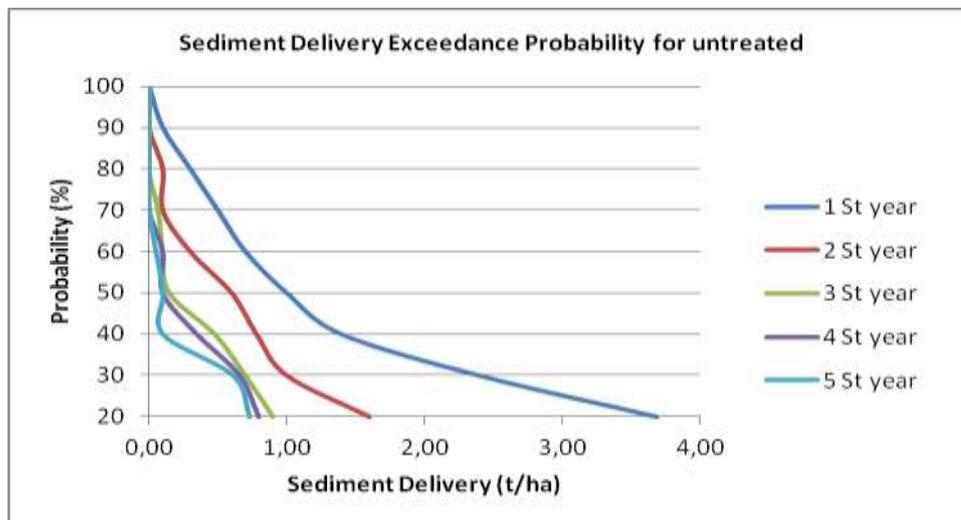


Figura 90: Probabilità di erosione relativa a diverse percentuali di simulazione per 5 anni.

Il modello stima che per il primo anno l'erosione ammonti a 3.69 (t/ha), con il 20% di probabilità che ecceda tale valore. Con riferimento al grafico dei risultati riportato sopra, il modello stima che per una probabilità del 50%, il primo anno si abbia erosione pari a 1.00 (t/ha), per il secondo anno un' erosione pari 0.60 (t/ha) e per gli

anni successivi si abbia una quantità di sedimenti erosi che diminuisce fino ad arrivare a 0.10 (t/ha) nel quinto anno.

15.2.5 Simulazione relativa al gruppo di silt fences n. 2, periodo febbraio 2014

Input

In questo gruppo la vegetazione è ripartita così: 36.7% sughera, 40% vegetazione erbacea; si ha invece una percentuale di suolo nudo pari a 23.29%.

Output

Si riporta di seguito, in sequenza, un estratto della tabella di *output* relativa alla probabilità del 20%, la tabella e il grafico in cui sono riportati tutti i dati di output relativi alle diverse probabilità di accadimento.

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 20 %	Event sediment delivery (t ha ⁻¹)				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	3.42	1.41	0.68	0.6	0.58

Figura 91: Erosione stimata per la probabilità del 20% di eccedere tale valore.

probability	1 St year	2 St year	3 St year	4 St year	5 St year
[%]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	3,42	1,41	0,68	0,60	0,58
30	2,30	0,90	0,40	0,40	0,40
40	1,30	0,60	0,30	0,20	0,10
50	0,80	0,42	0,10	0,07	0,00
60	0,60	0,21	0,00	0,00	0,00
70	0,40	0,10	0,00	0,00	0,00

Tabella 19: Output relativi alle diverse probabilità

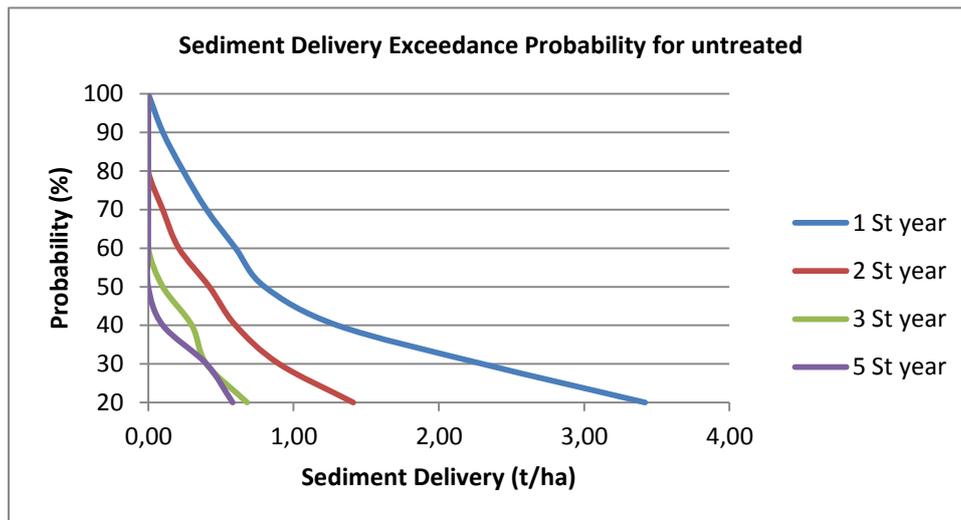


Figura 92 Probabilità di erosione relativa a diverse percentuali di simulazione per 5 anni.

15.2.6 Confronto gruppo silt fences n.2: periodo agosto-febbraio

Dal confronto dei dati si evidenzia che il modello stima a febbraio una diminuzione dei sedimenti erosi rispetto a quelli stimati per il mese di agosto. Questo andamento è valido per tutti i dati ricavati dalle simulazioni. Il modello stima per una probabilità del 20% che ad agosto si verifichi un'erosione pari a 3.69 (t/ha) e a febbraio una erosione pari a 3.42 (t/ha). Per cui a febbraio si ha una riduzione dell'erosione di 0.27 t/ha.

Nelle tabella sotto si riporta la quantità di cui si riduce l'erosione stimata a febbraio 2014 rispetto a quella stimata ad agosto 2013.

probability	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
[%]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
20	0,27	0,19	0,22	0,2	0,15
30	0,1	0,1	0,3	0,26	0,21
40	0,1	0,18	0,18	0,15	0
50	0,2	0,18	0,05	0,03	0,1
60	0,1	0,09	0,1	0,1	0,05
70	0,1	0	0,07	0	0

Tabella 20: Output relativi alle diverse probabilità

Anche in questo caso le simulazioni hanno mostrato che tra il periodo immediatamente successivo all'incendio ed il periodo posteriore alle piogge c'è stata

una diminuzione della stima dell'erosione dovuta certamente alla diminuzione di suolo nudo per l'aumento della copertura vegetale.

15.3 Confronto dei dati simulati con i dati in campo.

I risultati ottenuti dalle varie simulazioni sono stati confrontati con i dati dell'erosione misurata in campo. Successivamente ai periodi di pioggia abbondante è stata effettuata una raccolta del sedimento eroso accumulato nelle silt fences. Opportunamente trattata e pesata la quantità di tale sedimento è stata riportata alla tonnellata per ettaro e mediata per le silt fences ad uguale pendenza. I valori dell'erosione misurati nell'area sperimentale sono abbastanza vicini a quelli ottenuti dal modello di simulazione per il primo anno. Pur risultando leggermente inferiori a quelli stimati dal software. La perdita del suolo registrata nel corso di questo studio è stata di circa 3.09 t ha^{-1} per il primo anno.

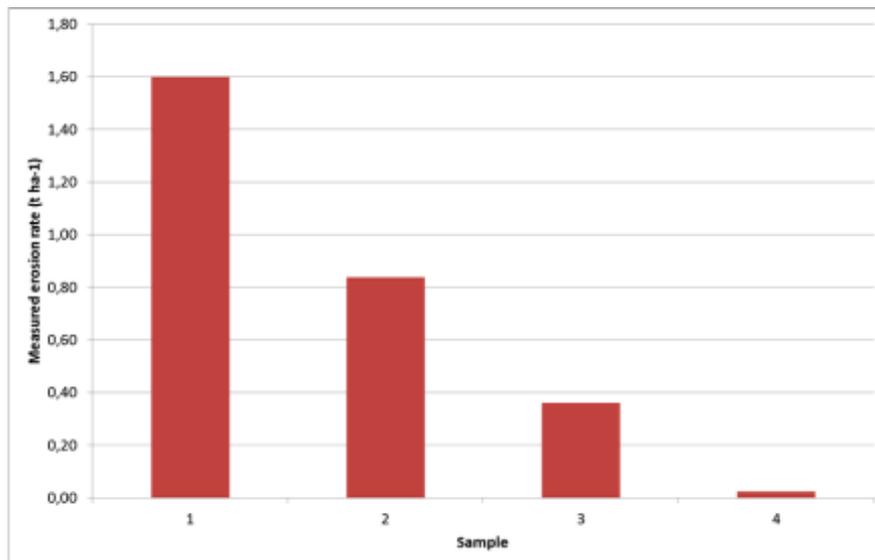


Figura 93 Perdita di suolo misurata in diversi momenti nelle silt fences. (t/ha).

Dal grafico di fig. 93 riportato sopra è evidente che la quantità di sedimento eroso riscontrato nel primo periodo post incendio è molto più elevata di quella raccolta nei periodi successivi. A titolo esemplificativo si riporta la tabella relativa al campionamento di ottobre 2014.

Data	peso wet (g)	peso dry (g)	g/m2	area Plot (m2)	t/ha	
09/10/2014	1220	1176	36.2963	32.4	0.363	
09/10/2014	569	551	16.32593	33.75	0.163	
09/10/2014	1072	1043	31.89602	32.7	0.319	
09/10/2014	169	159	4.948646	32.13	0.049	
09/10/2014	2444	2377	75.46032	31.5	0.755	
09/10/2014	175	169	5.216049	32.4	0.052	
09/10/2014	112	107	3.429487	31.2	0.034	
					0.248	media
09/10/2014	60	57	1.793581	31.78	0.018	
09/10/2014	76	71	2.183272	32.52	0.022	
09/10/2014	160	154	4.579245	33.63	0.046	
					0.029	media

Tabella 21 Campionamenti su suolo effettuati ad ottobre 2014.

La perdita di suolo totale misurata dopo un anno di campionamenti in questo sito è pari a 3.097 t/ha. Confrontando questo valore con i valori più elevati ottenuti dalle precedenti simulazioni (per una probabilità di simulazione del 20%) si nota che il modello sovrastima l'erosione rispetto alla realtà.



Figura 94 Valori di erosione calcolati dal modello e valori misurati.

Questa differenza tra valori di erosione calcolati e valori misurati è certamente dovuta al fatto che il modello deve essere ancora testato sull'area mediterranea e perciò prende in considerazione eventi temporaleschi di natura continentale, di norma più intensi di quelli riferibili all'area mediterranea. Così come i venti che in Sardegna hanno caratteristiche certamente diverse a quelle degli Stati Uniti.

I valori dei sedimenti raccolti risultano inoltre di molto superiori a quelli misurati in campo sempre in Sardegna da altri autori e con altre tecniche. Vacca et al. (2000) hanno registrato valori di erosione molto più bassi in terreni con macchia mediterranea percorsi dal fuoco nel sud della Sardegna (0,51-0,26 t ha⁻¹); valori ancora più bassi di sedimenti (0,014 t ha⁻¹) sono stati registrati a Bonassai, nel nord-ovest della Sardegna ed in terreni adibiti a pascolo (Rivoira et al ., 1989). Questi bassi valori sono probabilmente dovuti alle diverse caratteristiche dei siti in esame, principalmente al diverso grado di severità dell'incendio e alla diversa pendenza. Anche il tipo di vegetazione e le caratteristiche del suolo influenzano la quantità di sedimento eroso.

16. LIMITI DEL MODELLO ERMIT

I limiti del modello risiedono nel fatto che la tipologia di suolo e di vegetazione che stanno alla base dei dati di input sono settate sulle tipologie di vegetazione presenti in America e non nell'area mediterranea e che la tipologia di fenomeni meteorologici simulata dal software è tipicamente continentale e poco adatta al clima Mediterraneo. Il modello ERMIT, considera come fattore maggiormente influente nella dinamica dell'erosione di versante, la pendenza. Questo risultato conferma quanto noto dalla teoria sull'erosione di versante in cui è ben nota l'influenza della pendenza. Altro aspetto importante è la vegetazione. Infatti dalle varie simulazioni effettuate emerge che sulla stima dell'erosione incide maggiormente la vegetazione erbacea con le sue radici piccole e aggrovigliate piuttosto che la vegetazione ad alto fusto che nel nostro sito è rappresentata dalla sughera.

Per tali motivi, quando si sviluppa un incendio e si ha la conseguente distruzione della vegetazione, in particolare quella erbacea, si verificano le condizioni ideali per lo sviluppo dell'erosione. Dai risultati ottenuti con le simulazioni si può affermare che già a distanza di qualche mese dall'incendio la vegetazione riesce a svilupparsi e ad

apportare un valido aiuto contro l'erosione. Con il passare degli anni, il modello ne considera cinque, si ha una notevole diminuzione di sedimenti erosi, dovuto proprio alla ricostituzione della vegetazione.

Ovviamente i tempi di recupero del suolo bruciato sono variabili in funzione di una serie di caratteristiche tra cui la severità dell'incendio e l'eventuale ripetersi di altri roghi che aggravano le condizioni del suolo stesso.

17. CONCLUSIONI E CONFRONTO DEI RISULTATI PER I DUE SITI IN ESAME.

Questo studio ha affrontato alcuni aspetti delle fenomenologie post-incendio mai presi in considerazione prima nel territorio regionale sardo. In particolare, data la vastità del territorio percorso ogni anno dagli incendi nell'isola, la valutazione di alcuni degli aspetti trattati e l'applicazione del modello di simulazione (che consente anche la progettazione di sistemi di protezione o di ripristino del suolo) rivestono un'importanza particolare.

Sono state affrontate diverse tematiche in due diversi siti. Nel primo sito, localizzato nella Sardegna sud occidentale, nel comune di Villacidro, caratterizzato per la propensione al dissesto e per il ripetuto passaggio degli incendi boschivi negli anni, sono state applicate misure di geofisica e metodi per verificare come il passaggio dell'incendio abbia modificato le caratteristiche di stabilità del soprassuolo. Dai risultati è emerso che il fuoco e l'elevata temperatura a cui è stato soggetto il terreno hanno modificato le caratteristiche intrinseche della struttura del terreno. In particolare facendo diminuire la coesione ed il fattore di sicurezza, peggiorando perciò le condizioni già precarie del sito. Per completare l'analisi sono state effettuate misure sulla geochimica del terreno, monitorando il sito nel tempo e registrando le variazioni degli elementi mobili e delle sostanze nutritive. I risultati mostrano, come da letteratura che nell'immediato post incendio i valori di alcuni elementi così come il pH tendono ad aumentare per poi riportarsi ai valori iniziali. Cosa curiosa, nel nostro caso, durante il monitoraggio, un ulteriore evento incendiario ha interessato l'area, determinando un ulteriore aumento degli elementi monitorati. Durante la ricerca è stata attivata una convenzione con il CNR IBIMET di Sassari che ha proposto il monitoraggio in un nuovo sito, percorso da incendio nel 2013, con caratteristiche geologiche e strutturali completamente diverse.

In questo sito, localizzato in Provincia di Sassari, nella Sardegna nord occidentale, nel comune di Ittiri si è deciso di effettuare il monitoraggio dell'erosione post incendio utilizzando un modello di simulazione dell'erosione sviluppato negli Stati Uniti e di calibrare il modello utilizzando per il monitoraggio diretto delle barriere antierosive a basso costo che hanno permesso di effettuare un monitoraggio continuativo per un anno. Riguardo ai risultati ottenuti sull'erosione post incendio, i risultati del modello rispetto alle misurazioni sul campo mostrano come il modello ERMiT tende a sovrastimare il tasso di perdita di suolo.

Dalla ricerca è emerso in generale che gli effetti degli incendi sul suolo sono molteplici ed hanno importanti ripercussioni sull'ambiente sia a livello di aumento del rischio idrogeologico che di perdita immediata di suolo.

A livello di risultati della ricerca, certamente i risultati ottenuti con il modello di erosione hanno una valenza maggiore sia a livello di originalità che di contenuti in quanto tali metodiche non erano mai state applicate a livello nazionale e risulta importante diffondere tali strumenti per la prevenzione del rischio ed una corretta gestione del territorio.

Per ciò che riguarda gli sviluppi futuri della ricerca, i risultati di questo studio potranno essere incrementati attraverso ulteriori indagini nei prossimi anni e anche in diversi siti con condizioni di vegetazione, pendenza e terreno simili, ed essere utilizzati per la calibrazione del modello ERMiT in Sardegna, al fine di fornire ai gestori del territorio informazioni specifiche necessarie per la valutazione del rischio di potenziale di erosione e per valutare il possibile impianto di barriere antierosive o sistemi di pacciamatura antierosione. Inoltre sarà possibile con ulteriori fondi verificare la mobilitazione degli elementi geochimici e di eventuali inquinanti e mapparne la mobilità.

18. BIBLIOGRAFIA

Aru A., Baldaccini P., Vacca A., 1991, Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna, Regione Autonoma della Sardegna Assessorato alla Programmazione e Università degli studi di Cagliari, Dipartimento di Scienze della Terra).

Aznar, J.M., González-Pérez, J.A., Martí, C., Badía, D., 2014. At what depth are the properties of gypseous forest soil affected by fire? *Land Degrad. Dev.* <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2258> (Published online in Wiley Online Library).

Badía, D., González-Pérez, J.A., Aznar, J.M., Arjona, B., Martí, C., 2014. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: soil depth affected by fire. *Geoderma* 213, 400-407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.038>.

Badía, D., Sánchez, C., Aznar, J.A., Martí, C., 2015. Post-fire hillslope log debris dams for runoff and erosion mitigation in the semiarid Ebro Basin, *Geoderma* 237-238 (2015) 298-307.

Barrocu, G., Houtkamp, H., Jacks, L., Larsson, I., 1974. Geohydrological investigations of ground water in granite rocks of Sardinia. "Rep. Inst. för Kulturteknik", 1-74, Stockholm.

Bathurst, J.C., Moretti, G., El-Hames, A., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2007. Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijezu catchment, Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 569-583.

Bazzoffi, P., 2006, Valutazione dell'erosione del suolo da Metodi di Valutazione Dei Suoli E Delle Terre, Coordinatore Edoardo A.C. Costantini, Collana di metodi analitici per l'agricoltura diretta da Paolo Sequi, vol. 7, Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, EDIZIONI CANTAGALLI, Siena – settembre 2006, pp 118 - 168.

Beguería, S., 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: a case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74, 196-206.

Blijenberg, H., 1998. Rolling stones. Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard Valley, Southern French Alps. Utrecht University, Utrecht.

Bovio, Meloni, Zerbini, 2007, Gli effetti del fuoco sul suolo, www.ricercaforestale.it. (<http://www.ricercaforestale.it/index.php?module=CMpro&func=viewpage&pageid=483>)

Brady, N.C. and R.R. Weil, 1999. "The Nature and Properties of Soils." Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Cannon, S.H., Kirkham, R.M., Parise, M., 2001a. Fire-related debris flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado. *Geomorphology*, 39, 171-188.

Cannon, S.H., Bigio, E.R., Mine, E., 2001b. A process for fire-related debris flow initiation, Cerro Grande fire, New Mexico. *Hydrological Processes* 15, 3011–3023.

Cannon, S.H., Gartner, J.E., Rupert, M.G., Michael, J.A., Rea, A.H., Parrett, C., 2010. Predicting the probability and volume of post wildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 127–144.

Carsel, R. F. and R. S. Parrish, 1988. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics" *Water Resource Res.* 24: 755-769.

Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 1019-1029.

Dane, J. H. and G. C. Topp, Eds., 2002. "Methods of Soil Analysis Part 4 - Physical Methods" *Soil Science Society of America Madison, WI.*

De Bano, L.F., Dunn, P.H., Conrad, C.E., 1977. Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soils. *Proc. Symp. Envir. Cons. Fire Fuel Manage. Medit. Ecosyst. Forest Serv. U.S.D.A.* pp. 65-74.

DeGroot-Hedlin, C., Constable, C., 1990. Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysic*, 55, 1613-1624.

De Vivo B., Lima A., Siegel F. R. (2004). *Geochimica Ambientale*. Liguori Eds, Napoli. 449 pp.

Dohnal, M., J. Dusek, and T. Vogel, 2010. "Improving hydraulic conductivity estimates from Minidisk Infiltrometer measurements for soils with wide pore-size distributions" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:804- 811.

Dumontet S., Diné, Scopa, Mazzatura and Saracino, 1996, Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of a pine forest soil from a dunal mediterranean environment, *soil biol biochem.* Vol. 28. No. 10-11, 1467-1475.

Duncan, J.M., 1996. State of art: limit equilibrium and finite-elements analysis of slopes. *J. of Geotechnical Engineering, ASCEE*, 122, 7, 557-596.

Fadda A. F. (1990), *L'evoluzione del paesaggio in Sardegna: geomorfologia e idrografia*, Coedisar

Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 261-272

Fernández, C., Vega, J.A., Vieira, D.C.S., 2010. Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in NW Spain: performance of rusle and revised morgan–morgan–finney models. *Land Degrad. Develop.*, 21, 58–67.

Fister W., Iserloh T., Ries J.B., Schmidt R.-G., 2012, A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements, *Catena* 91, 72–84.

Gabet, E.J., 2003. Post-fire thin debris flows: sediment transport and numerical modeling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 1341–1348.

García-Ruiz J. M., Arnáez J., Gómez-Villar A., Ortigosa L., Renault N. L., 2012, Fire-related debris flows in the Iberian Range, Spain, GEOMOR-03960; N°of Pages 10;

Glade, T., 2005. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology*, 66 (1), 189-213. 22. Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology of the Environment*, 65, 341-411.

Goldschmidt V.M., (1937), The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc.*, 655-673.

Goldschmidt V.M., (1954), *Geochemistry*. Oxford University Press, Oxford.

González-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-García, E., Rubio, J.L., 2006. Hydrological properties of a Mediterranean soil burned with different fire intensities. *Catena*, 68, 186 – 193.

González-Pelayo, O., Andreu, V., Gimeno-García, E., Campo, J., Rubio, J.R., 2010. Effects of fire and vegetation cover on hydrological characteristics of a Mediterranean shrubland soil. *Hydrological Processes*, 24, 1504–1513.

Grant, F.S., West, G.F., 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*, McGraw-Hill, New York.

Hallet, P.D., Baumgartl, T., Young, I.M., 2001. "Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 184-190.

Imeson A.C. , Verstraten J.M., van Mulligen E.J., Sevink J., The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest, *Catena*, vol 19, 345-361.

Inbar, M., Wittenberg, L., Tamir, M., 1997. Soil erosion and forestry management after wildfire in a Mediterranean woodland, Mt. Carmel, Israel. *International Journal of Wildland Fire* 7, 285–294.

Kirkham, M.B., 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations* Elsevier Academic Press: Burlington, MA. pp. 145-172.

Fox, D., Berolo, W., Carrega, P., Darboux, F., 2006. Mapping erosion risk and selecting sites for simple erosion control measures after a forest fire in Mediterranean France. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 606–621.

Fox, D.M., Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. *Hydrological Processes* 21, 2377–2384.

Jebari S., Berndtsson R., Olsson J., Bahri A, 2012. Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation, *Journal of Hydrology* 436–437, 102–110.

Johnson, A.M., Rodine, J.R., 1984. *Debris flow, Slope instability*, Wiley, Chichester.

Lewis S. A., Wu J. Q. and Robichaud P. R., 2006. Assessing burn severity and comparing soil water repellency, *Hayman Fire, Colorado. Hydrological processes*. 20, 1–16.

Lichner L., Hallett, P.D., Feeney, D., Dugova, O., Sir, M., Tesar, M., 2007. Field measurement of soil water repellency and its impact on water flow under different vegetation *Biologia*, 62, 537-541.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996a. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys.Prospec.*, 44, 499-523.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996b. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospec.*, 44, 131-152.

Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J., 2002. Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. A case study in the Flysch Sector of the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development* 22, 32–39.

Lorente, A., Beguería, S., Bathurst, J.C., García-Ruiz, J.M., 2003. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 683–692.

Marcello A., Mazzella A., Pretti S., Valera P., Fiori M. (2005), *Sedimenti fluviali (stream sediments) e suoli: analisi delle correlazioni esistenti fra le due tipologie di campioni. Primi risultati*". Resoconti Associazione Mineraria Sarda, Iglesias, anno CX. pp 49-57.

Marcello A, Muscas F., Pretti S., Valera P. (2008) "Il ruolo delle campionature "stream sediments" nella definizione dei tenori elementali normali del territorio: esempio del Foglio IGMI 549 - Muravera". In: *GEOBASI - Il Foglio IGMI N° 549 - Muravera*, "Pacini S.p.A.", Pisa. Licence by "Pianetaterza - Le Scienze della Terra per la Società - Commissione Italiana". ISBN 978-88-7781-926-0. pp. 33-57 e abbinamento editoriale (CD) contenente 25 Carte tematiche.

Miller C. F. & Wark D.A., *Elements*, V. 4, n. 1, 2008

Mason B. e Moore C. B. (1982). *Principles of Geochemistry (4th Ed.)*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 344 p.

Olivella M.A., Ribalta T.G., de Febrer A.R., Mollet J.M, de las Heras., F.X.C. T, 2006, Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine waters after Mediterranean forest fires, *Science of the Total Environment* 355, 156– 166

Ollesch G., Vacca A., Turnover dei fosfati e dei processi di degradazione in un ecosistema a pascolo in Sardegna, 1999, Bollettino della società italiana della scienza del suolo 48, 329-348.

Parise, M., Cannon, S.H., 2011. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Natural Hazards*. doi:10.1007/s11069-011-9769-9.

Parsons, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., Clark J. T., 2010. Field guide for mapping post-fire soil burn severity. General Technical Report RMRS-GTR-243, USDA, 49 pp.

Rivoira, G.; Roggero, PP.; Bullitta, S.; 1989. Improvement techniques and erosion of hillside pasturelands, *Rivista di agronomia*, 23/4, 372-377.

Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G., 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. General Technical Report RMRS-GTR-63. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station (85 pp.).

Robichaud P.R., Brown R.E., 2002, Silt Fences: An economical technique for measuring hillslope soil erosion, USDA Forest Service Gen. Tech. Rep., RMRS – GTR – 94.

Robichaud, P.R., Ashmun, L.E., Sims, B.D., 2010. Post-fire treatment effectiveness for hillslope stabilization. USDA General Technical Report RMRS-GTR-240 (62 pp. Fort Collins, CO).

Robichaud, P.R.; Elliot, W.J.; Pierson, F.B.; Hall, D.E.; Moffet, C.A.; Ashmun, L.E. (2007), *Erosion Risk Management Tool (ERMiT) user manual (version 2006.01.18)*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-188. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 24 p.

Rose A. W., Hawkes J. E. e Webb J. S., (1979). *Geochemistry in mineral exploration*. Academic Press, London and New York, 657 p.

Rose, C.W., 1966. *Agricultural Physics* Pergamon Pres. Ltd.

Santarato G. – *Lezioni di geofisica applicata – Geoelettrica*, 2008- dispense di lezione

Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.

Self S. & Blake S., *Elements*, V. 4, n. 1, 2008

Shakesby, R.A., 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105, 71–100.

Shakesby, R.A., Coelho, C.O.A., Ferreira, A.D., Terry, J.P., Walsh, R.P.D., 1993. Wildfires impacts on soil erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal. *Int. J. Wildland Fire* 3 _2., 95–110.

Soldovieri M.G. , 2004. Prospezioni geoelettriche: ottimizzazione in acquisizione e ricostruzione 3d per problematiche ambientali e archeologiche, tesi di dottorato. Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di scienze matematiche, fisiche e naturali - dipartimento di scienze della terra -223 pp.

Swanson, F.J., 1981. Fire and geomorphic processes. In: Mooney, H.A., Bonnicksen, T.M., Christiansen, N.L., Lotan, J.E., Reiners, W.A. (Eds.), United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-26. United States Government Planning Office, Washington DC, pp. 401–421.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge

Tillman, R.W., Scotter, D.R., Wallis, M.G., Clothier, B.E., 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. Aust. J. Soil Res. 27, 637-644.

Vacca A., Loddo S., Ollesch G., Puddu R., Serra G., Tomasi D., Aru A., 2000. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia_Italy Catena 40, 69–92.

Varela, M. E., Benito, E., Keizer, J.J., 2010. Wildfire effects on soil erodibility of woodlands in NW Spain. Land Degrad. Develop., 21, 75–82.

Varnes, D.J., 1984. Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris, 63.

Zachar D., *Developments in Soil Science, Soil Erosion, , Forest Research Institute, Zvolen. Czechoslovakia* Elsevier scientific publishing Company Amsterdam Oxford New York 1982.

Zhang, R. 1997. "Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer." Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1024-1030

siti internet consultati.

<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/>

<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/fswepp/ermit/ermit.pl>

<http://www.actlabs.com>

www.sardegnageoportale.it/

www.regione.sardegna.it/autoritadibacino

www.comune.ittiri.ss.it

www.sardegnaambiente.it/foreste

Indice delle figure:

Figura 1 Modello di erosione post incendio (Swanson, 1981).....	12
Figura 2 Inquadramento territoriale del test site di Villacidro	15
Figura 3 Individuazione del versante di Monte Omo in cui sono state fatte le misure geofisiche.....	16
Figura 4 Inquadramento geologico dell'area di Monte Omo a Villacidro.....	18
Figura 5 panoramica del versante incendiato di Monte Omo.....	19
Figura 6 Linee di ruscellamento superficiale nel versante di Monte Omo.....	20

Figura 7 Carta della franosità dell'area nel Comune di Villacidro (fonte: studio per la redazione dei progetti preliminari degli interventi urgenti di mitigazione del pericolo idraulico e di frana presenti entro l'abitato – Villacidro (VS) – ATP professionisti vari).....	27
Figura 8. Perimetri delle aree incendiate dal 2005 al 2013.	30
Figura 9 Effetti dell'incendio sul versante. A sinistra lo scavo lasciato dalle radici di un pino.	31
Figura 10 Fenomeni di smottamento avvenuti alle prime piogge dopo l'incendio in corrispondenza dei tagli stradali.	31
Figura 11 Strumento utilizzato Syscal pro (dal manuale d'uso)	35
Figura 12 Stendimenti di elettrodi utilizzati per la misura della resistività del terreno, NSPT e campioni utilizzati per le prove di taglio diretto.	36
Figura 13 2D Electrical Resistivity Tomography with Residual RMS Error of 2.4 % Generated from Extended Survey Line L01 (Wenner-Schlumberger Array).	38
Figura 14 2D Electrical Resistivity Model with Residual RMS Error of 3.0 %, Generated from Line L02 (Wenner-Schlumberger Array)	38
Figura 15 2D Electrical Resistivity Model with Residual RMS Error of 5.6 % for the Line L03 (Dipole-Dipole Array)	39
Figura 16 Visualizzazione 3D dei risultati delle tomografie elettriche.	40
Figura 17 Esempio di quadripolo Wenner (Manuale Syscal pro)	40
Figura 18 (da Santarato G.).....	41
Figura 19 (da Santarato G.).....	42
Figura 20 Come si ottiene una pseudo sezione con il software (da Santarato G.)	42
Figura 21 <i>Schema della cella di taglio diretto</i>	45
Figura 22 <i>Apparecchio di taglio diretto utilizzato</i>	45
Figura 23 Arco circolare critico. Superficie di scivolamento per il modello L03 ottenuto con il metodo semplificato di Bishop. E' possibile osservare l'introduzione di uno spessore superficiale sottile che simula la presenza del suolo bruciato con parametri meccanici modificati dalla combustione dei componenti organici.	48
Figura 24 Modello del pendio indefinito con infiltrazione parallela alla superficie di scorrimento.	49
Figura 25 Variazione del fattore di sicurezza per lo stesso pendio al variare del parametro m prima (linea continua) e dopo il passaggio del fuoco (linea tratteggiata). (a) L01 Profile - (b) L03 Profile	50
Figura 26 Percentuale di riduzione del fattore di sicurezza FS per differenti angoli di attrito tra valori di m=0 (suolo asciutto) ed m=1 (suolo saturo), considerando l'infiltrazione dell'acqua parallela alla superficie di scorrimento per i profili L01 (a) e L03 (b)	51
Figura 27 esempio di associazione geochimica degli elementi (dalle dispense delle lezioni di caratterizzazione geochimica del dott. Valera).....	54
Figura 28 carta metallogenica della Sardegna.....	57
Figura 29 Diagrammi di classificazione delle vulcaniti oligo mioceniche foglio 547 Villacidro. Da progetto CARG.....	58
Figura 30 Modelli di sviluppo dello strato di suolo idrofobo dopo incendio nel chaparral californiano (da De Bano et al., 1977)	59
Figura 31 Volatilizzazione dell'azoto dai compartimenti del suolo e della lettiera in relazione alla temperatura massima raggiunta durante un incendio (da De Bano et al., 1977)	60
Figura 32 Quantità di sedimento eroso a parità di pioggia al variare della copertura vegetale.	61
Figura 33 Punti di campionamento sul versante in esame.....	62
Figura 34 Variazioni del livello di Mn nel tempo.	66
Figura 35 valori di alcuni elementi misurati per il campione n. 3.....	67
Figura 36 Valori degli stessi elementi misurati per il campione 3 a distanza di diversi mesi dall'incendio.	67
Figura 37 Valori di alcuni elementi misurati per il campione 3 nel mese di aprile 2014.....	68
Figura 38 - Inquadramento geografico dell'area. In alto a sn la Sardegna suddivisa in province, in basso a sn in verde è rappresentata la Provincia di Sassari ed il Comune di Ittiri in rosso, all'interno del quale ricade l'area in esame.....	72
Figura 39 In rosso individuazione di Monte Unturzu, localizzazione del test site.	73
Figura 40 Vegetazione dell'area sperimentale	73

Figura 41 Inquadramento geologico.....	75
Figura 42 Bacino del Rio Barca, in rosa, ed in rosso individuazione del sottobacino di appartenenza.	76
Figura 43 Inquadramento pedologico dell'area.	77
Figura 44 Distribuzione dei suoli in Italia secondo il rischio di erosione (elaborazione su dati Corine 1992, da Bazzoffi, 2006).....	79
Figura 45 Classificazione dell'erosione del suolo secondo differenti criteri Zachar riadattata da Bazzoffi, 2006.....	80
Figura 46 Splash erosion – Distruzione della struttura grumosa e formazione della crosta superficiale. (Bazzoffi, 2006).....	81
Figura 47 Effetti dell'intensità del fuoco sulla vegetazione e sulle proprietà del suolo (M. Hankinson, National Park Service, USDA).	85
Figura 48 Esempi di suoli con diversa idrorepellenza in funzione del grado di severità dell'incendio.(Da USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. 2010).	86
Figura 49 Maschera input del modello ERMIT(dal manuale ERMIT - USDA Forest Service RMRS-GTR-188. 2007).....	92
Figura 50 Maschera di output del modello	93
Figura 51 Diagramma di flusso del modello ERMIT (dal manuale di utilizzo USDA Forest Service RMRS-GTR-188. 2007).	94
Figura 52 Pluviometro installato in campo.....	95
Figura 53 dati di pioggia misurati dal pluviometro in campo.	97
Figura 54 Tipologia di silt fences- fonte: Silt Fences: An Economical Technique for Measuring Hillslope Soil Erosion, USDA, 2002.....	98
Figura 55 Silt fence sperimentale	99
Figura 56 Particolare del posizionamento del geotessile	99
Figura 57 - Silt fence - raccolta materiale eroso.....	100
Figura 58 Ubicazione delle silt fences – immagine da Google Earth.....	100
Figura 59 Estensione dell'incendio e localizzazione delle silt fences.	101
Figura 60 Griglia utilizzata per la stima della vegetazione in campo	102
Figura 61 Vegetazione agosto 2013.....	103
Figura 62 Vegetazione febbraio 2014	104
Figura 63 Vegetazione febbraio 2014	104
Figura 64 Vegetazione ottobre 2014	105
Figura 65:tipologia di vegetazione e ripartizione percentuale nella maschera del modello.	106
Figura 66 Risultato delle analisi granulometriche.....	107
Figura 67 Variazione del pH dal momento successivo all'incendio fino a 8 mesi di distanza per due plot differenti.	108
Figura 68 Metodo di misura della pendenza nel modello ERMIT.....	109
Figura 69 Schema delle parti di funzionamento del mini infiltrometro.....	111
Figura 70 Membrana semipermeabile di materiale ceramico del mini infiltrometro che viene posizionata a contatto del terreno.....	111
Figura 71 Gocce d'acqua su un terreno idrofobo.	112
Figura 72 Il grafico mostra l'idrorepellenza del suolo in funzione del grado di severità dell'incendio. Il grafico mostra anche la variabilità dell'idrorepellenza in funzione del suolo minerale esposto rispetto a quello con presenza di lettiera. (dal manuale dello strumento MDI).....	113
Figura 73.....	117
Figura 74.....	118
Figura 75.....	118
Figura 76 Grafico rappresentativo della severità dell'incendio generata dal modello ERMIT, i quadrati di colore più intenso indicano la severità generata per il primo anno dopo l'incendio. I quadrati gialli indicano severità bassa e quelli rossi elevata. I quadrati di colore più chiaro indicano la simulazione per diversi anni dopo il primo. In rosso a destra invece è rappresentato il versante suddiviso nei diversi segmenti (OFEs). Tratto dal manuale del modello.	119

Figura 77 Output del modello ERMiT relativo agli eventi meteo, comprese tempeste, neviccate ed eventi di pioggia intensi simulati sulla base dei dati meteo in ingresso per 100 anni a partire dalle condizioni di input.	121
Figura 78 Stima sedimenti erosi per una probabilità del 20%	122
Figura 79 tipologia di barriere antierosive che è possibile simulare con il modello ERMiT	124
Figura 80 estratto della tabella di output per la probabilità del 20%	124
Figura 81 Andamento erosione silt fence n°6	127
Figura 82: Andamento erosione silt fence n°8	127
Figura 83: Schermata di input del modello	128
Figura 84: Erosione stimata per la probabilità del 20%	128
Figura 85: Sedimenti erosi relativi a diverse probabilità	129
Figura 86: Schermata di input del modello	130
Figura 87: Erosione dei sedimenti stimata per la probabilità del 20%	130
Figura 88: Erosione relativa a diverse probabilità	131
Figura 89: Erosione stimata per la probabilità del 20%	133
Figura 90: Probabilità di erosione relativa a diverse percentuali di simulazione per 5 anni	133
Figura 91: Erosione stimata per la probabilità del 20% di eccedere tale valore.	134
Figura 92 Probabilità di erosione relativa a diverse percentuali di simulazione per 5 anni	135
Figura 93 Perdita di suolo misurata in diversi momenti nelle silt fences. (t/ha).	136
Figura 94 Valori di erosione calcolati dal modello e valori misurati.	137