

Riassunto Tesi

Contributi di telerilevamento all'analisi geologica e di impatto ambientale dell'attività geotermica nell'area del Monte Amiata (Si)

Introduzione

Il presente lavoro di tesi è inserito in un più ampio Progetto promosso dalla Regione Toscana, ed ha come obiettivo l'individuazione dei rischi d'inquinamento, delle eventuali azioni e limitazioni conseguenti allo sfruttamento delle risorse geotermiche nell'area amiatina (Si).

Infatti, in quest'area, è stato effettuato un lavoro trans-disciplinare in cui sono state approfondite le conoscenze geostrutturali ed idrogeologiche dell'apparato vulcanico amiatino. Inoltre è stato valutato il rischio ambientale ed umano attraverso l'analisi geochimica dei diversi comparti ambientali (aria, acqua e suolo) e l'analisi ecotossicologica su piante e licheni nelle zone di particolare criticità ambientale come le aree di sfruttamento dei campi geotermici di Piancastagnaio e Bagnore, l'area geotermica di Bagni San Filippo, le miniere di Abbadia San Salvatore e del Siele.

Per quanto concerne più specificamente il lavoro di tesi, esso si è focalizzato sul supporto che dati telerilevati di diversa natura possono dare alle suddette analisi; in particolare:

- supporto allo studio geologico strutturale ed idrogeologico attraverso l'analisi di fotografie aeree, sia a scala regionale che di dettaglio, con tecniche di **fotogrammetria digitale** mediante *fotointerpretazione*;
- verifica mediante **Interferometria Radar Differenziale** della presenza di eventuali meccanismi di subsidenza indotti dalle attività di sfruttamento del campo geotermico e di valutazione dell'eventuale esistenza del *volcanic spreading* ipotizzato in precedenti lavori (Borgia et al., 2006)
- analisi della situazione relativa alla dispersione di contaminanti negli ambienti limitrofi alle centrali geotermiche mediante **rilevamenti spettrali in situ** su diverse matrici: piante, licheni e suoli. Per quanto concerne il comparto vegetale sono state utilizzate diverse tecniche interpretative, basate sull'analisi del **Red edge Shift**, una variazione della pendenza del coefficiente angolare della riflettanza nel tratto di lunghezza d'onda 600-800 nm (al limite tra il rosso e l'infrarosso vicino) (Gates et al., 1965)

Inquadramento geologico

L'area oggetto di studio è caratterizzata da un alto strutturale di 1738 m s.l.m. ubicato nella zona Sud-Orientale della Toscana, vicina al confine con il Lazio, tra le province di Siena e Grosseto. Si tratta di un vulcano inattivo di età quaternaria che posa su di una base di rocce sedimentarie eoceniche. L'area fa parte di contesto strutturale caratterizzato da diverse fasi sull'ultima delle quali, di tipo estensionale, si è imposta l'attività vulcanica susseguente ad un fenomeno di **anatesi crostale**. La struttura dell'Amiata è caratterizzata da colate vulcaniche trachitiche-latitiche (0.3-0.2 Ma - Ferrari L., 1996). I numerosi pozzi più o meno profondi, prodotti da ENEL fin dagli anni '50, hanno mostrato che la Falda toscana alla propria base comprende la formazione carbonatico-evaporitica delle **Anidriti di Burano** del Triassico superiore e che, a scala regionale, appoggia su una serie di elementi tettonici metamorfici di basso grado che potrebbero rappresentare il prolungamento orientale dell'Unità Monticciano-Roccastrada, affiorante ben più ad occidente dell'Amiata (Brogi, 2004). Al di sotto dell'apparato vulcanico amiatino, che contiene un imponente acquifero idropotabile, esistono due diversi *serbatoi geotermici* sfruttati per la produzione di corrente elettrica dall'ENEL e posti a differenti profondità (Bertini et al., 1995). Il campo geotermico che si riscontra è un sistema ad acqua dominante, con temperature che raggiungono i valori di 350°C a circa 3 km di profondità (Baldi et al., 1995). Dei due serbatoi geotermici, quello più superficiale è ubicato in corrispondenza

dell'orizzonte formato dalle *evaporiti Triassiche* e le soprastanti *formazioni carbonatiche di età Giurassica*. Il serbatoio geotermico profondo insiste, invece, entro le *formazioni metamorfiche tettonizzate* ad una profondità che va dai 2000 ai 4500 metri circa.

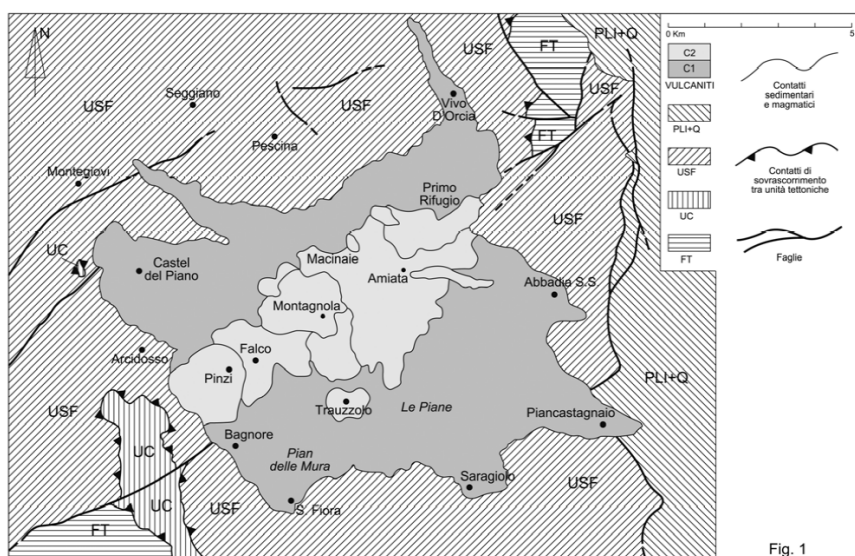


Figura 1: Schema geologico semplificato derivato dalle carte geologiche in scala 1:10.000 del Progetto di Cartografia Geologica della Regione Toscana (sezioni 320 070-080-110-120-150-160 e 321 050-090-130). **C1:** vulcaniti del complesso eruttivo basale; **C2:** duomi e colate del secondo complesso eruttivo; **PLI+Q:** depositi pliocenico-quadernari del graben di Radicofani; **USF:** Unità di S. Fiora; **UC:** Unità di Canetolo; **FT:** Falda toscana.

Il serbatoio geotermico più superficiale è sormontato dalle Liguridi e dai sedimenti marini mio-pliocenici che vengono a costituire una barriera impermeabile, spesso varie centinaia di metri, che si interpone tra il serbatoio stesso e l'acquifero idropotabile cui attinge l'Acquedotto del Fiora per la distribuzione ad un vasta utenza all'intorno.

I fluidi geotermici del monte Amiata hanno la seguente composizione tipo:

- Vapor d'acqua (fase condensabile), costituisce circa a 84 – 95% in peso del fluido.
- Gas (fase incondensabile), costituito principalmente da CO₂, H₂S, CH₄, H₂ a cui si accompagnano minime quantità di NH₃, Hg e composti volatili dell'Arsenico e dell'Antimonio.

L'anidride carbonica è il maggior costituente della fase incondensabile coprendone circa il 96– 98 % in peso, mentre il secondo componente risulta essere l'acido solfidrico, con circa lo 0,4 – 2 % in peso. Mercurio, Arsenico ed Antimonio sono presenti in minime quantità, l'Hg, tra i tre il più abbondante, non supera generalmente il 5 x 10⁻⁴% in peso del gas. L'area del monte Amiata, dove attualmente avviene lo sfruttamento del campo geotermico per la produzione di energia elettrica, comprende i territori di Piancastagnaio e Santa Fiora.

I temiprincipali del lavoro di tesi

Alla luce delle varie metodologie adottate si è potuto apprezzare a pieno l'importanza degli approcci multidisciplinari in studi complessi come quello in esame. Le diverse tecniche di telerilevamento hanno permesso di raggiungere dei risultati molto interessanti che hanno trovato riscontro nella maggior parte dei casi con le tecniche classiche di analisi del territorio. I risultati dei diversi studi sono riassumibili secondo 3 temi principali:

1. STUDIO GEOLOGICO STRUTTURALE ATTRAVERSO L'ANALISI DI FOTOGRAFIE AEREE

Le fotografie aeree sia a scala regionale che di dettaglio, utilizzate con tecniche di fotogrammetria digitale, hanno consentito di supportare l'analisi geologica mediante fotointerpretazione individuando i lineamenti principali, classificandoli in base a criteri di evidenza in accordo con i dati cartografici disponibili e con il lavoro di campagna. I dati topografici, fotografici e la letteratura geologica (carte geologiche e pubblicazioni) acquisiti ed utilizzati nell'ambito del Progetto sono i seguenti:

1.1 Dati topografici

- Cartografia Topografica Regionale, formato vettoriale (*.dwg). Sezioni in scala 1:10.000 CTR dei fogli 320-321.
- Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione spaziale pari a 10 m derivante dalla cartografia topografica.

1.2 Fotografie aeree, ortofoto e immagini satellitari

- Fotografie aeree pancromatiche, formato digitale:
 - i. scala nominale 1:13.000, anno 1976 (Regione Toscana – volo EIRA); strisciata 163 (501-512), strisciata 164 (490-499), strisciata 78c (479-486), strisciata 79c (403-421), strisciata 80a (406-413), strisciata 80b (458-476), strisciata 81b (343-367), strisciata 82b (533-544), strisciata 82c (528-534), strisciata 83b (591-600).
 - ii. scala nominale 1:70.000, anno 1988/89 (Compagnia Generale Riprese Aeree - PR); strisciata 42 (9028-9031), strisciata 43A (060-063).

1.3 Cartografia geologica

- Cartografia geologica in scala 1:10.000, disponibile dal Progetto Regionale CARG in formato vettoriale.
- Cartografia geomorfologica riferita alla nuova cartografia in scala 1:25.000 della Provincia di Siena (ad oggi inedita) resa disponibile per gentile concessione dal Prof. M. Coltorti dell'Università di Siena direttore del rilevamento.
- Inventario dei Fenomeni Franosi Italiani (IFFI), in scala 1:10.000, banca dati relativa alla gestione di tutte le frane presenti sul territorio nazionale aggiornata al 2006.

Il processing delle fotografie aeree è stato effettuato con la suite LPS dal software Leica Geosystems™ ERDAS Immagine Ver. 9.2. Il modello orientato permette, tramite il software *StereoAnalyst*, di osservare la stereoscopica e contestualmente fotointerpretare (Figura 2).

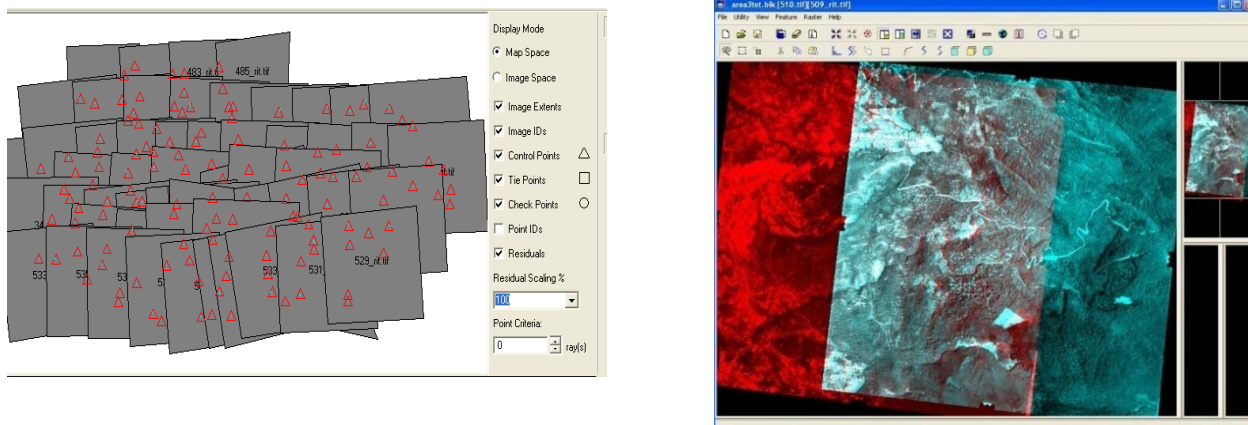


Figura 2: blocco orientato (a sinistra) e stereoscopia (a destra)

Orientate le foto in scala 1:13000 e 1:70000 si è passati alla fase interpretativa. Le tecniche di fotogrammetria digitale per l'interpretazione stereoscopica, hanno consentito il trasferimento diretto in ambiente GIS dei risultati intermedi di interpretazione delle foto aeree, e quindi il confronto continuo con la cartografia esistente ed i dati di campagna.

Al fine di rendere fruibili durante le fasi di interpretazione le informazioni cartografiche esistenti, le carte sono state rese digitali, corrette geometricamente e coregistrate rispetto alle basi topografiche della CTR della Regione Toscana in scala 1:10.000. Successivamente, tutte le informazioni ritenute significative sono state vettorializzate ed è stata costruita una banca dati costituita da entità poligonali (formazioni geologiche), lineari (contatti geologici, faglie, lineamenti ecc.) e puntuali (giaciture della stratificazione). Questa struttura dati georeferenziata e coregistrata rispetto alle immagini telerilevate, ha costituito un importante supporto per la fotointerpretazione.

Inoltre, l'uso integrato di fotografie aeree a differente scala, ha facilitato il riconoscimento di variazioni litologiche e discontinuità morfologiche riconducibili a lineamenti geologici. Per la corretta individuazione dei lineamenti, si è proceduto innanzitutto alla verifica dell'assetto geologico-strutturale risultante dalla banca dati esistente esaminando la distribuzione ed i rapporti tra le diverse unità litologiche. Successivamente, sono stati fotointerpretati i lineamenti. L'insieme di queste informazioni è stato raccolto nella banca dati degli elementi telerilevati, rappresentata nelle Figura 3. Per tenere conto delle diverse informazioni estraibili da ogni immagine e per limitare la soggettività nell'interpretazione, rendendola il più possibile riproducibile, si è scelto di associare ad ogni elemento lineare individuato, un codice numerico descrittivo dell'evidenza. Tali codici possono assumere valore intero da 1 (poco evidente) a 3 (molto evidente). E' da sottolineare che il valore del campo non è in alcun modo correlato con la natura geologica del lineamento, ma ne esprime unicamente la "visibilità" attraverso le immagini telerilevate. Tramite un processo di classificazione delle direzioni dei lineamenti in ambiente Esri™ ArcInfo, sono stati raggruppati secondo valori di orientazione simili. Sono stati individuati 4 sistemi di fatturazione come confermato dal Diagramma a Rosa di Figura 4: E-W, NE-SW e secondariamente ESE-WNW e NNW-SSE.

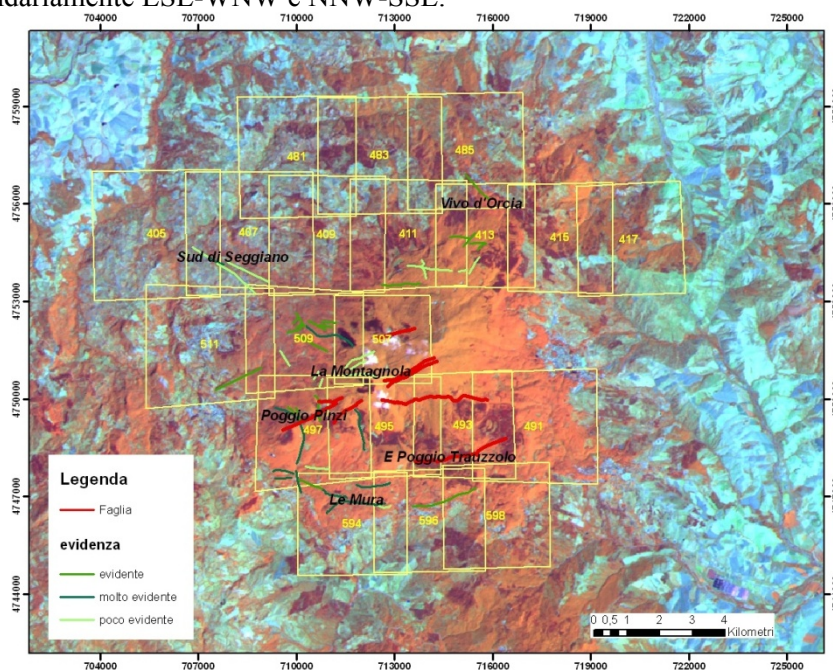
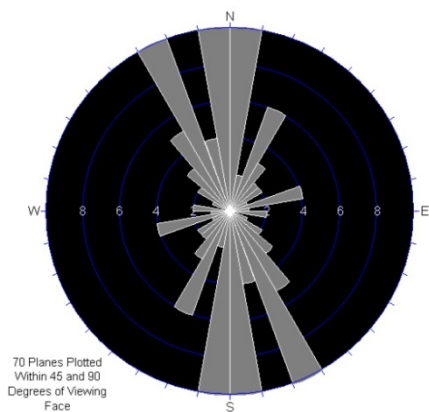


Figura3: I lineamenti fotointerpretati, in giallo le aree di approfondimento della fotointerpretazione mediante osservazione stereoscopica delle foto aeree in scala 1:13.000.



SISTEMA		N° OCCORRENZE	ESTENSIONE LINEARE (m)
I	E-W	29	22786
	NE-SW	20	12299
III	ESE-WNW	12	10599
IV	NNW-SSE	9	5463

Tab. 1: numero di occorrenze ed estensione lineare dei sistemi di lineamenti I, II, III e IV.

Figura 4: Rose Diagram della frequenza dei lineamenti individuati sulle immagini in funzione delle diverse orientazioni.

I

lineamenti sono stati interpretati in chiave geologica in due classi: a) faglie, b) altri lineamenti. Questa distinzione è stata effettuata tenendo conto del valore di evidenza ottenuto durante l'analisi delle immagini telerilevate, della continuità spaziale e dell'orientazione dei lineamenti (Tab.1) e dal quadro geologico desumibile dai dati di letteratura e dal lavoro di campagna. Il confronto dei lineamenti interpretati dalle foto aeree con le evidenze di campagna ha permesso di confutare l'eventuale presenza di indizi legati alla

tettonica gravitativa del *volcanic spreading* e ha permesso di giungere alla conclusione che buona parte dei lineamenti non costituisce faglia; solo in qualche caso, in campagna, sono state riconosciute delle faglie con componente trascorrente per la presenza di strie orizzontali. I lineamenti fotointerpretati hanno permesso di individuare 2 sistemi di fratturazione principali, orientati E-W e NE-SW, e 2 secondari di direzione ESE-WNW e NNW-SSE. Alcuni lineamenti che si possono identificare intorno alla struttura del Monte Amiata in particolare nell'area di Seggiano sono connessi a fattori erosivi relativi al torrente Vivo. I rilievi di campagna non hanno mostrato strutture plicative connesse al *volcanic spreading* responsabili dell'attuale conformazione del reticolo idrografico. Sono altresì da escludere fenomeni di deformazione duttile sviluppatosi in arenarie di tipo Pietraforte in poche centinaia di migliaia di anni. Dall'analisi del *rose diagram* di tutti i lineamenti identificati è possibile evidenziare la presenza di famiglie principali di allineamento, che seguono andamenti di tipo appenninico e N-S legati all'attività tettonica post-eruttiva e attuale regionale. Non sono state riscontrate evidenti strutture di collasso gravitativo come graben "a foglia" e Horst a "cuneo" nelle aree sommitali, né strutture anticlinali di propagazione di faglia e i diapiri localizzati intorno alla base del vulcano. Buona parte delle evidenze di campagna fanno ritenere che queste strutture siano da riferire alla deformazione fragile pleistocenica superiore, a cinematica trascorrente, che ha interessato l'intera regione compresa tra la dorsale del M. Cetona ad oriente e le vaste aree tirreniche ad occidente del vulcano. Esso è stato parzialmente interessato da queste deformazioni fragili, come dimostrano le tracce di mineralizzazioni a cinabro in ganga quarzoso-calcitica lungo alcune piccole faglie negli spessori orientali delle vulcaniti basali (Gaggi et al., 2008). La presenza di faglie a componente principale trascorrente implica l'assenza di una tettonica deformativa guidata unicamente da gravità. Infatti una tale deformazione richiederebbe delle faglie con dominanti movimenti secondo la massima inclinazione dei piani di faglia (cinematica tipo *dip-slip*).

2. INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE PER LO STUDIO DELLA PRESENZA DI EVENTUALI MECCANISMI DI SUBSIDENZA

La tecnica interferometrica differenziale utilizza il valore di fase di dati SAR (*Synthetic Aperture Radar* – Radar ad Apertura Sintetica) relativo a distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici.

Scopo di questa attività è stato quindi quello di monitorare la presenza di eventuali meccanismi di subsidenza indotti dallo sfruttamento e dalla re-immissione dei fluidi esauriti negli acquiferi e di comprendere l'eventuale esistenza del *volcanic spreading*. L'utilizzo di questa tecnica permette infatti di avere una risoluzione temporale e spaziale elevata con un grado di precisione dell'ordine di millimetri. L'interferogramma da immagini satellitari è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e contiene in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase. L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero stimare accuratamente la differenza di cammino ottico dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal medesimo bersaglio a terra. Il processamento e l'analisi delle immagini SAR e dei relativi interferogrammi, è stato utilizzato il software Diapasontm, sviluppato dall'agenzia spaziale francese CNES (Massonnet e Feigl, 1998), e distribuito dalla Altamira Information (2008). Diapasontm è costituito da una suite di software specifici che, dai dati grezzi, focalizza e trasforma le immagini fino al calcolo finale degli interferogrammi attraverso una serie passaggi, più una quarta di *post-processing*. Diapasontm sfrutta il principio del *two-pass*, cioè prevede che le correzioni del contributo topografico vengano eseguite attraverso l'uso di un modello digitale del terreno esterno e non creato attraverso un processo interferometrico. Per il metodo del *two-pass* sono quindi necessarie due sole immagini riprese in tempi diversi più un DTM, per calcolare l'interferogramma relativo alle due scene. La coerenza è quindi un parametro molto importante che esprime la stabilità della fase nel tempo e soprattutto in un intorno spaziale (Hanssen, 2001). L'analisi interferometrica è valida e attendibile solo se eseguita in zone coerenti. Per lo studio della subsidenza nell'area amiatina sono state utilizzate scene satellitari ERS-SAR e ENVISAT-SAR

acquisite rispettivamente in geometria discendente e ascendente. La copertura temporale per le scene ERS va dal 1992 al 2000, mentre per le immagini ENVISAT il periodo di studio è compreso tra il 2003 e il 2007.

Monte Amiata – Track 122 Frame 2745 – 9 immagini

Sensore	Data	Orbita	Baseline parallela	Baseline perpendicolare
Ers1	19920510	4275	0	0

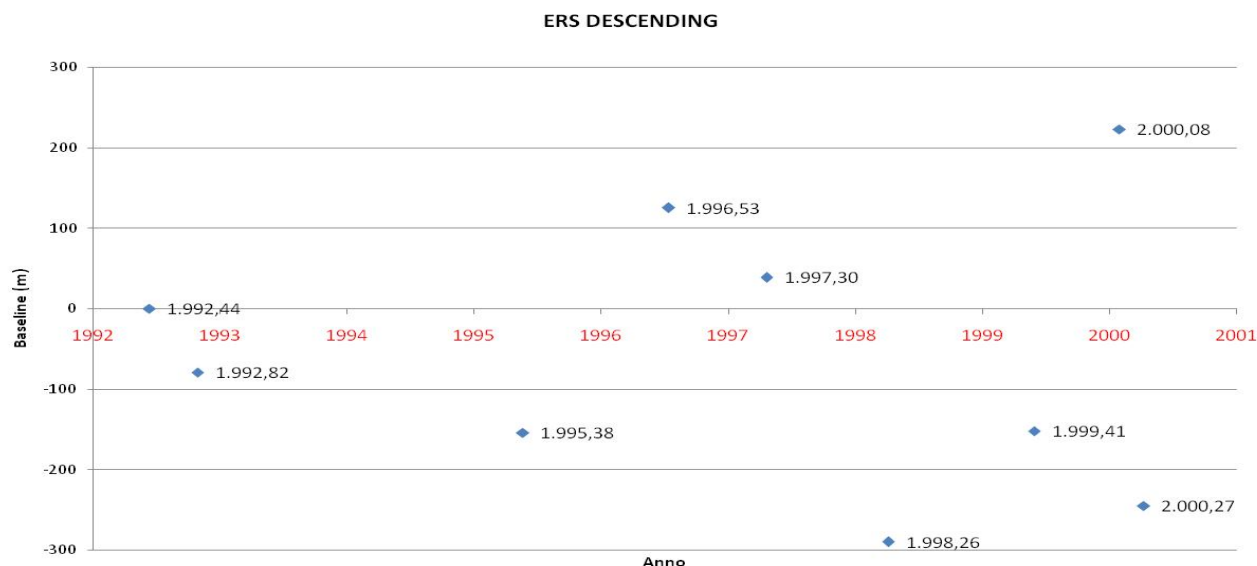


Figura 5: Immagini ERS elaborate (l'immagine di riferimento è indicata in rosso).

Monte Amiata – Track 2444 Frame 855 – 9 immagini

Sensore	Data	Orbita	Baseline parallela	Baseline perpendicolare
Envisat	20050324	16029	0	0

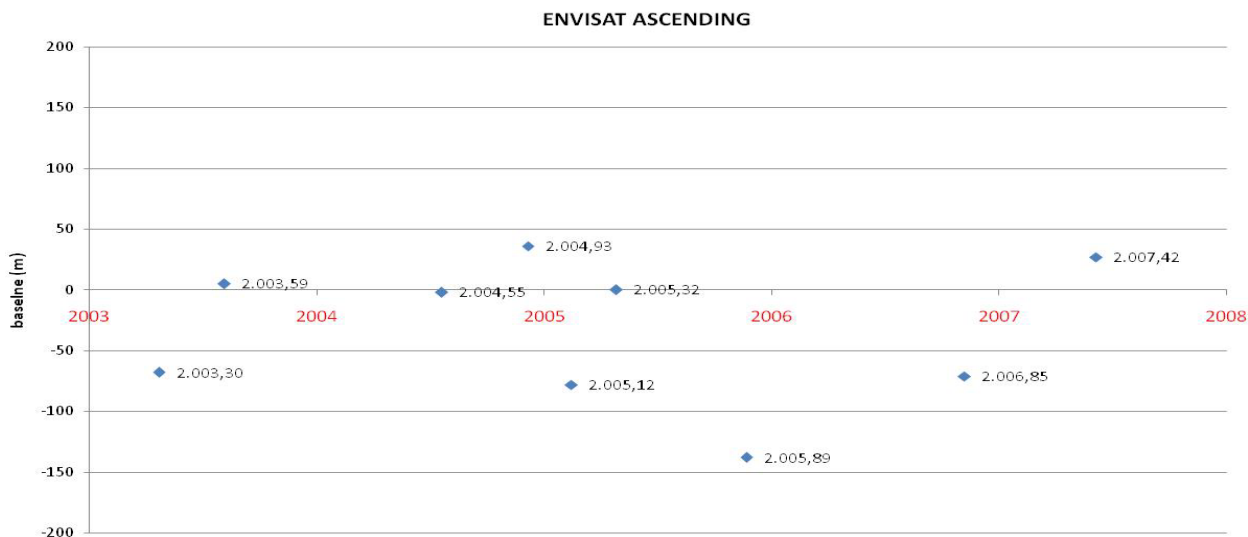


Figura 6: Immagini ENVISAT elaborate (l'immagine di riferimento è indicata in rosso).

La scelta delle immagini è stata effettuata in base alle condizioni meteorologiche presenti al momento della rilevazione e a considerazioni di carattere statistico, legate alla geometria del sistema di acquisizione (bassi valori di *baseline* perpendicolare) e alla distribuzione temporale delle immagini (Figure 5 e 6). In questo lavoro sono stati calcolati 49 interferogrammi utilizzando le scene disponibili ed eliminando i dati con valori di rumore troppo elevati. In Figura 7 è riportata l'immagine di ampiezza della zona elaborata. Si nota la presenza di zone molto riflettenti quali aree urbane, edificate o industriali, su cui in genere è possibile avere

una buona coerenza (Piancastagnaio, Abbadia San Salvatore, l'area delle centrali geotermiche, FlorAmiata) e

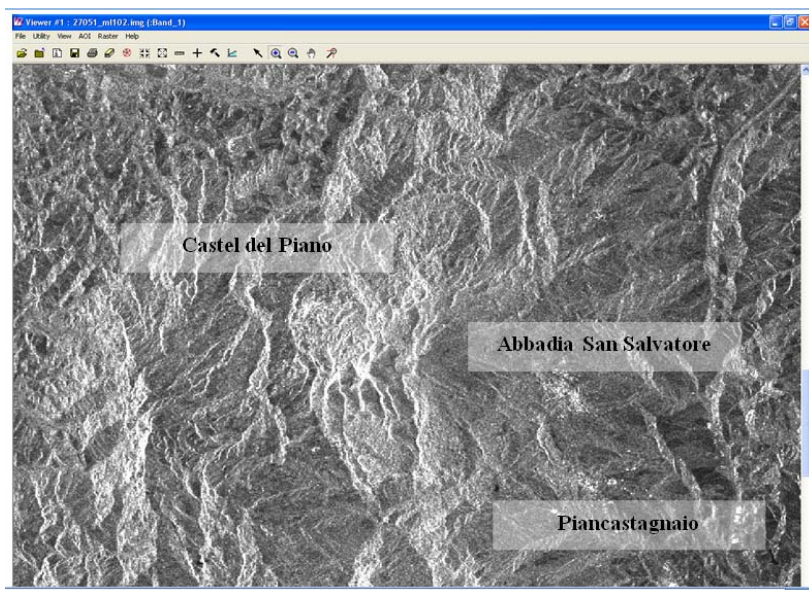


Figura 7: Immagine di ampiezza della zona elaborata.

di zone affette da decorrelazione geometrica su cui non è possibile ottenere misure attendibili (es. tutte le creste delle montagne che risultano bianche in Figura 7 sono affette da *foreshortening*). La scarsa urbanizzazione dell'area e la morfologia montuosa danno luogo a diversi fenomeni di deformazione prospettica che solo in parte viene compensata dalla scelta di utilizzare un dataset discendente (ERS) ed uno ascendente (ENVISAT).

Si è deciso di valutare l'accuratezza degli interferogrammi prodotti mediante il confronto con dati provenienti da livellazioni ottico-geometriche di elevata precisione

effettuate da Enel nel periodo 1988-2006 (Enel, 2006). Teoricamente se la livellazione offre elevata precisione della misura, il dato SAR offre elevate risoluzioni temporali e spaziali, dell'ordine di una misura ogni 40 metri. La densa copertura vegetale, che caratterizza gran parte dell'area, determina una forte decorrelazione sugli interferogrammi (Figura 8). Grazie all'ausilio delle livellazioni si è cercato di tarare gli interferogrammi e definire meglio i fenomeni di spostamento relativo nelle aree con maggiore coerenza. Anche in queste aree comunque, data la frammentazione degli interferogrammi dovuta all'alternanza di zone coerenti e non, è molto improbabile procedere con una analisi quantitativa della deformazione; in questo senso le valutazioni correttamente esprimibili sono da ritenere qualitative sull'eventuale presenza di fenomeni deformativi. Vengono di seguito presentati alcuni esempi di aree con maggiore coerenza (Figura 8) quali Abbadia San Salvatore, Piancastagnaio, Santa Fiora–Bagnolo, FlorAmiata e Arcidosso, confrontati con i dati di livellazione altimetrica (Figura 9).

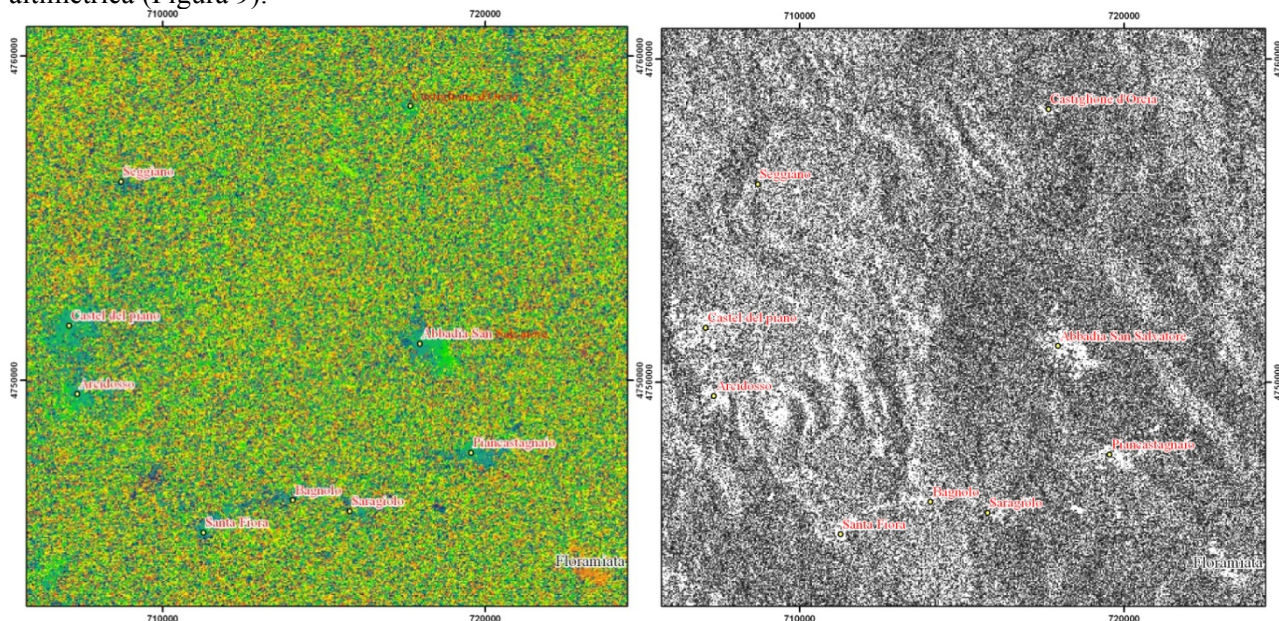


Figura 8: esempio di interferogramma e immagine di coerenza ottenuto dalle immagini Envisat orbite 15027-19035 circa 308 Δ days.

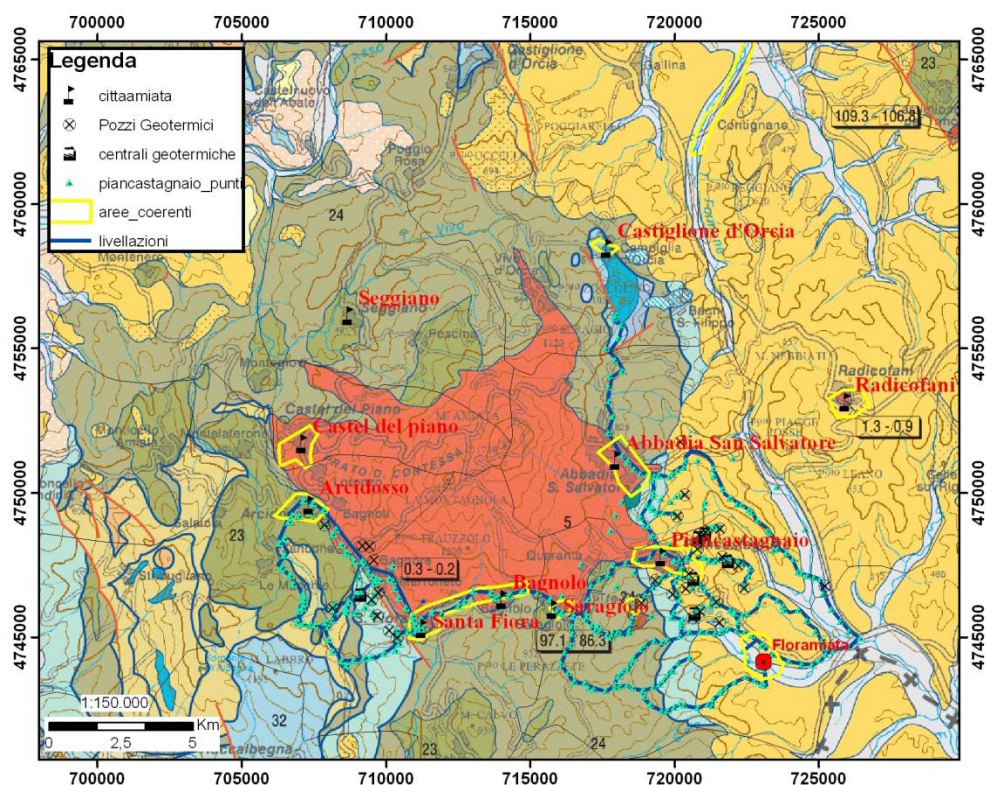


Figura 9: Stralcio della carta geologica in scala 1:250.000 (Carmignani et al., 2004) dell'area amiatina con sovrapposta le reti di livellazione Enel e le aree più coerenti degli interferogrammi.

Gli interferogrammi prodotti in questo lavoro di tesi si riferiscono ad un intervallo di tempo variabile al 1992 al 2007. I risultati della tecnica interferometrica differenziale evidenziano gravi problemi nella coerenza tra le immagini imputabili alla presenza di ampia copertura vegetale e alle morfologie acclivi, al punto che non è stato possibile individuare aree coerenti in cui srotolare la fase. Lo studio si è focalizzato sull'analisi delle variazioni di fase in piccole porzioni a maggiore coerenza corrispondenti alle aree urbane nella fascia pedemontana del Monte Amiata dove è stato possibile individuare variazioni altimetriche al suolo trascurabili (dell'ordine mediamente di 1-2 mm/anno con valori massimi di 4-5 mm/anno solo in alcune aree dell'area di Piancastagnaio). Il risultato ottenuto è stato validato attraverso un accurato confronto con i dati di livellazione topografica di precisione resi disponibili da Enel per l'intervallo 1988-2006. Parallelamente il confronto è stato effettuato, con gli stessi risultati, con un lavoro analogo effettuato da T.R.E. s.r.l. nel 2003 per conto di ENEL. Le minime deformazioni osservate non sembrano quindi tali da indurre condizioni di pericolo per subsidenza naturale o indotta dallo sfruttamento geotermico. Al contrario, gli spostamenti registrati presentano una notevole relazione con i fenomeni di instabilità dei versanti presenti su tutta l'area date le caratteristiche geologiche dei terreni. Tale ipotesi è stata anche confermata dal confronto con le più recenti carte di franosità regionali e della Provincia di Siena (Inventario dei Fenomeni Franosi IFFI della Regione Toscana (2006); cartografia geologica in scala 1:10.000 relativa al Progetto Regionale CARG (2008); cartografia geomorfologica in scala 1:25.000 relativa alla Provincia di Siena - ad oggi inedita, resa disponibile per gentile concessione dal Prof. M. Coltorti dell'Università di Siena direttore del rilevamento). Sono state inoltre approfondite le analisi delle variazioni altimetriche della rete in aree dove sono stati identificati, nel periodo 1988-2006, fenomeni parossistici di degassazione descritti dal dott. Chessa (Chessa, 2008). Il confronto tra le date di questi fenomeni e i rispettivi andamenti delle livellazioni indicano l'assenza di variazioni altimetriche legate a questi eventi.

3. RILEVAMENTI SPETTRALI PER LA VERIFICA DELLA PRESENZA DI CONTAMINANTI NELL'AMBIENTE

L'analisi spettrale di piante e licheni ubicati sia in aree prossime alle centrali geotermiche sia lontane è stata effettuata al fine di valutare l'impatto su di essi di inquinanti dispersi quali Hg, Sb, S, B e As.



Fig. 10 – Fasi di rilevamento delle firme spettrali in campagna.

Per quanto concerne il comparto vegetale, sono state utilizzate diverse tecniche interpretative, basate sull'analisi del *red edge shift* (Gates et al., 1965), una variazione del coefficiente angolare della riflettanza spettrale, ovvero del rapporto tra energia solare riflessa ed energia incidente ad una certa lunghezza d'onda λ nel tratto pari a 600-800 nm, cioè al limite tra la luce rossa e l'infrarosso vicino. Dato che la firma spettrale degli oggetti varia in funzione sia del tipo di materiale e di superficie esposta sia in funzione delle proprie condizioni fisiche, la risposta spettrale di piante e licheni posti in luoghi diversi può indicarne differenti stati di conservazione. Perciò, per avere una informazione sullo stato fenologico della matrice vegetale in funzione dello stato di contaminazione, sono state eseguite misurazioni sia dove il materiale è risultato

indisturbato rispetto all'attività geotermica sia dove esso è stato "contaminato" da essa. Le misurazioni di radianza, condotte con uno spettrometro portatile ASD FieldSpec™FR (Figura 10), a fibra ottica, per un range di λ compreso tra 350 e 2500 nm, sono state effettuate in prossimità delle centrali geotermiche, su discariche di miniera nei pressi di Abbadia S. Salvatore, e in aree geotermiche naturali presso Bagni S. Filippo (Figura 11). Il dataset è stato differenziato in gruppi più omogenei e ristretti costituiti da un minimo di 4 ad un massimo di 92 campioni (per un totale di 142 misure), al fine di meglio determinare le caratteristiche comuni e le variabilità spaziali. È stato analizzato un lichene di riferimento non contaminato, ovvero l'organismo per il quale si è trovata la massima concentrazione di clorofilla ed il più basso contenuto di carotenoidi e Hg. Per quanto concerne le piante del tipo *Rubus ulmifolius schott* (nome comune "Rovo"), campionate nella maggior parte delle località, esse hanno mostrato andamenti caratteristici per i campioni contaminati vicino alle centrali provviste di AMIS

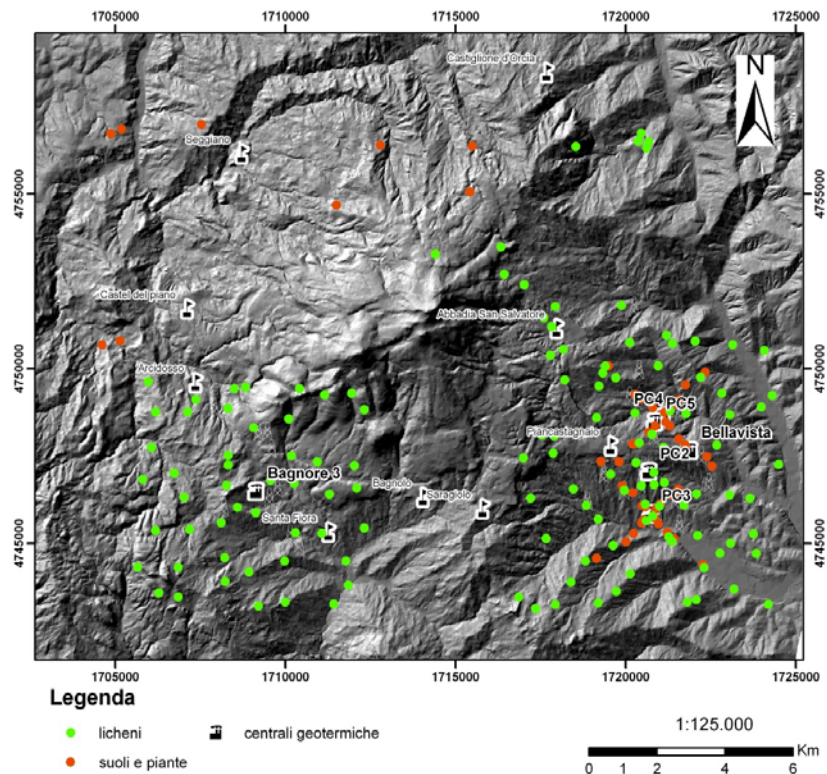


Figura 11: Punti di analisi delle matrici ambientali.

(Abbattitori di Mercurio e Idrogeno Solforato), tipo PC2, ben distinguibili dalle firme spettrali eseguite su campioni incontaminati;

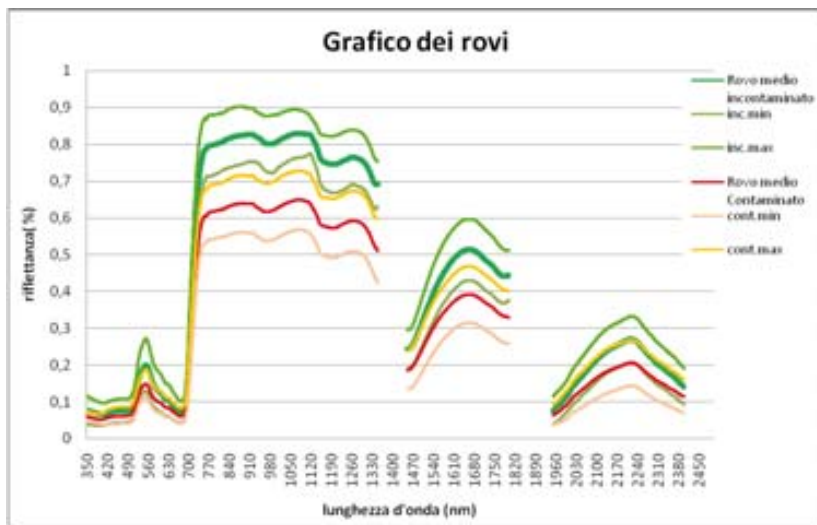


Figura 12 – Firme spettrali del rovo nelle aree potenzialmente contaminate (vicino alle centrali geotermiche) e non contaminate (lontano dalle centrali).

nell'intervallo spettrale 670-800 nm la riflettanza delle piante misurate nelle aree di probabile contaminazione è inferiore (Figura 12). Nelle zone contaminate, infatti, si nota una traslazione del *red edge point* (che corrisponde al punto di massima pendenza della curva di riflettanza tra λ 670 e 800 nm) verso λ minori (*red edge shift*, Horler et al., 1983). Ampiezza e posizione del *red edge* risultano significativamente correlati alla concentrazione clorofilliana delle foglie e ad importanti parametri della copertura vegetale.

Si focalizza qui l'attenzione sul subset del dataset dei licheni attorno a Piancastagnaio (SI) su cui è stata analizzata chimicamente una condizione di stress maggiore rispetto alle altre aree.

Per trovare una correlazione tra le analisi chimiche e la riflettanza sono state seguite due metodologie. Il primo approccio al problema della variazione della contaminazione con la distanza dalle aree geotermiche è stato affrontato in maniera "statica", ovvero calcolando dei buffer attorno alle centrali con raggio di 500, 1000 e 2000m. Per i campioni ricadenti in queste aree è stata effettuata un'analisi statistica utilizzando sia il coefficiente di correlazione lineare di Bravais-Pearson sia quello di Spearman (Buccianti et al., 2003). Dato il numero esiguo dei campioni chimici disponibili sono stati effettuati i test di correlazione a due code con un livello di significatività $\alpha=0.05$. Da tale analisi sono emerse elevate correlazioni tra la maggior parte dei parametri chimici e quelli per esprimere l'andamento della riflettanza nel *red edge* quali la pendenza massima della curva, il massimo della derivata, l'integrale, ed il rapporto di Smith (ovvero il rapporto tra le derivate della curva alle λ pari a 723 e 700 nm; Smith et al., 2004). In particolare la clorofilla ha mostrato un'elevata correlazione negativa rispetto ai principali contaminanti e alle caratteristiche di stress. Inoltre, specialmente nelle aree di 1000m attorno alle centrali si sono rilevate un'importante correlazione inversa tra il rapporto di Smith e H_2S e diretta con la clorofilla.

Considerato che al di fuori del buffer di 1000m l'affidabilità delle correlazioni trovate non è elevata, si può affermare che le maggiori concentrazioni di H_2S nell'intorno delle centrali hanno maggiore impatto sulle condizioni fenologiche della pianta al punto che essa soffre di più, presentando una diminuzione della risposta spettrale e dei suoi rispettivi parametri quantitativi. L'altro approccio per studiare le correlazioni tra i parametri chimici e quelli della curva della

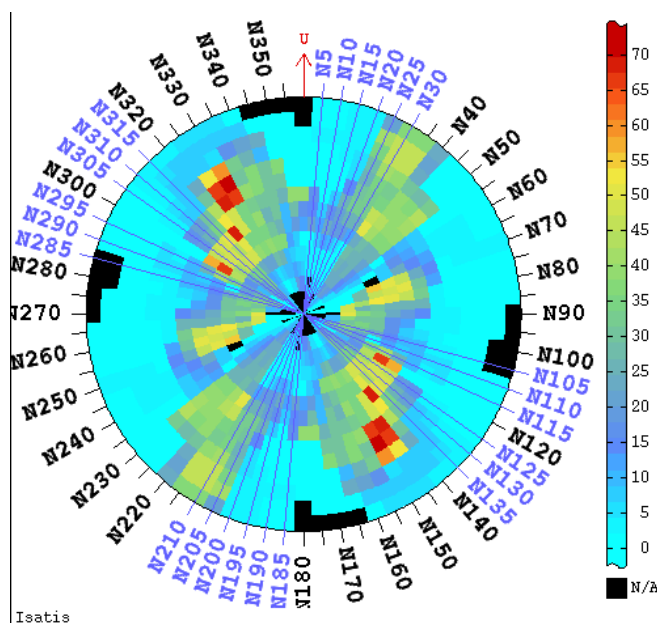


Figura 13: Semivariogramma sperimentale della Conducibilità del lichene

riflettanza ha preso in considerazione la variabilità spaziale di tutti i dati, ed in particolare, la conducibilità (Figura 13), un parametro chimico direttamente proporzionale con lo stato di stress della pianta. Si nota una decisa anisotropia geometrica nella variabilità spaziale (Goovaerts 1997) che ben si accorda con la direzione dei venti dominanti nella zona di studio, nonostante la contaminazione sia mediamente bassa (Gaggi et al., 2008). Sono stati, quindi, trattati statisticamente due nuovi sottoinsiemi di campioni discriminati sulla base di zone di interesse costruite centrando ellissi sulle centrali geotermiche, con semiasse uguali a quelli dell'ellisse dell'anisotropia spaziale (Figura 14). Anche in questo caso, nonostante la complessità legata all'eterogeneità

delle risposte dei diversi fotobionti e l'esiguo numero di campioni analizzati chimicamente, è stata statisticamente confermata la buona correlazione tra il rapporto di λ 723/700 nm con il contenuto di clorofilla, fortemente correlata allo stato di stress. Tale lavoro evidenzia le potenzialità dell'utilizzo dell'analisi spettrale in campagna per affrontare problematiche di siti contaminati: la versatilità delle analisi permette di avere un campione statisticamente valido in un periodo di tempo ristretto e a costi di esercizio ridotti.

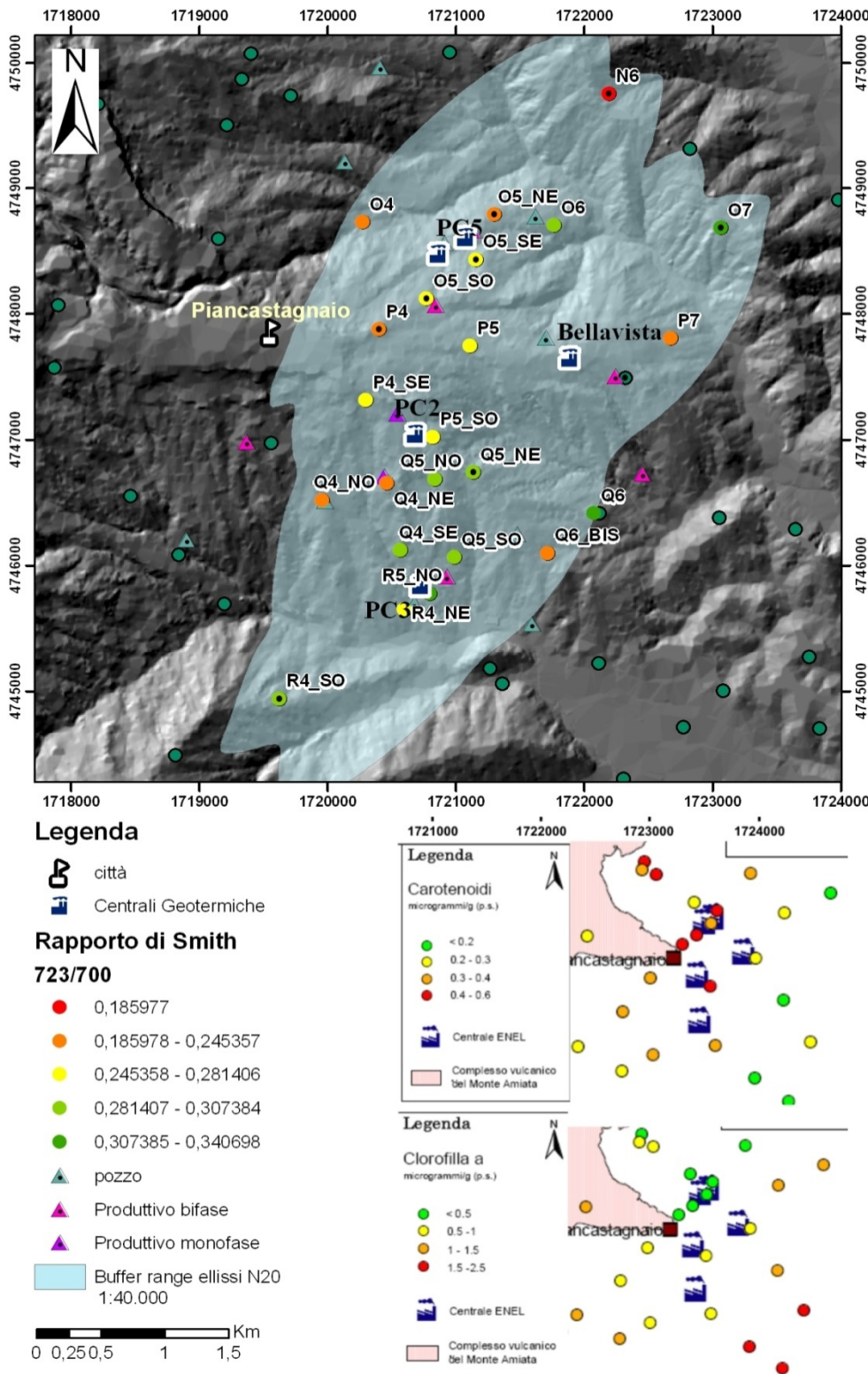


Figura14: mappa del buffer ellittico di Piancastagnaio (i licheni con le analisi chimiche hanno un punto all'interno), in basso le analisi del Prof. Gaggi sulla Clorofilla e Carotenoidi.

Bibliografia

- Bertini, G., Cappetti, G., Dini, I., & Lovari, F. (1995). Deep drilling results and updating of geothermal knowledge of the Monte Amiata area. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, (pp. 1283–1286). Florence, Italy.
- Borgia, A., & Delcroix, C. (2006). Rilievo geostrutturale preliminare dell'apparato vulcanico del Monte Amiata. EDRA.
- Borgia, A., Dalaney, P., & Denlinger, R. (2000). Spreading Vulcanoes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*28 , 539-570.
- Broggi, A. (2008). The structure of the Monte Amiata volcano-geothermal area (Northern Apennines, Italy): Neogene-Quaternary compression versus extension. *International Journal of Earth Science Vol.97* , 677-703.
- Buccianti, A., Rosso, F., & Vlacci, F. (2003). *Metodi matematici e statistici nelle scienze della terra*. Napoli: Liguori.
- Calamai, A., Cataldi, R., Squarci, P., & Taffi, L. (1970). Geology, geophysics and hydrogeology of the Monte Amiata geothermal fields. *Geothermics* , 1-9.
- Capes, R., & Haynes, M. (n.d.). *A brief guide to SAR interferometry (InSAR)* . Retrieved Dicembre 10, 2008, from http://www.npagroup.com/insar/whatisinsar/insar_simple.htm
- Chessa, M. (Anno XIX - N. 2 Giugno 2008,). L'Amiata si scalda di nuovo. *Il Geologo* , 8-14.
- Diaz, A. (2001). *Appunti di Statistica*.
- ENEL (2006), *Monitoraggio Altimetrico delle aree geotermiche italiane – Aggiornamento 2006*". *Relazione tecnica*. 55 pp.
- Ferrari L., C. S. (1996). Volcanological evolution of the Monte Amiata, Southern Tuscany: New geological and petrochemical data. *Acta Vulcanologica* 8 , 41-56.
- Gaggi, C., Barazzuoli, P., Broggi, A., Di Lella, L., Meccheri, M., Protano, G., Riccobono, F., Salvini, R., Salleolini, M. (2008). Studio geostrutturale, idrogeologico e ambientale dell'area amiatina. *Reg.Toscana, Incarico di Ricerca, Relazione Finale*.
- Gates, D., Keegan, H., Schleter, J., & Weidner, V. (1965). *Spectral properties of plants* .
- Gomarasca, M. (2004). *Elementi di Geomatica*. Milano: Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. *Applied geostatistics series* . , 483 p. New York: Oxford University Press.
- Guastaldi, E. (2007). *Dispense di Geostatistica*.
- Hanssen, R. F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, 328 pp.
- Horler, D., Dockray, M., & Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* , 273–288.
- Salvini, R. (2007). *Dispense di Telerilevamento*.
- Salvini, R. (2008). *Dispense Fotogrammetria digitale*.
- Smith, K., Steven, M., & Colls, J. (2004). Use of hyperspectral derivatives ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment Vol.92* , 207-217 .
- Test of significance test Pearson's r*. (n.d.). Retrieved Novembre 24, 2008, from http://www.une.edu.au/WebStat/unit_materials/c6_common_statistical_tests/test_signif_pearson.html
- T.R.E. Tele-Rilevamento Europa (2003)*, Analisi dell'area del comune di Piancastagnaio (SI) e zone limitrofe con tecnica dei permanent scatterers (Permanent Scatterers Technique) geometria ascendente. *Rapporto finale*. 30 pp.
- Vreeling, W. (1999, Giugno). Introduction to interferometry. Enschede, Olanda: ITC.
- Wackernagel, H. (2003). Multivariate Geostatistics: An Introduction with Application. *springer-Verlag* , 387.