



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOLOGICHE, GEOLOGICHE
ED AMBIENTALI

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA
IN SCIENZE DELLA TERRA
XXVI CICLO

Tesi di Dottorato di LUIGI ZAPPALÀ

*ANALISI ED IMPLEMENTAZIONE DI METODI
GEOMATICI PER L'ELABORAZIONE DI DATI
GEOPETROLOGICI
INTEROPERABILITÀ, GEOSTATISTICA E CLASSIFICAZIONE DI
IMMAGINI MULTISPETTRALI A RAGGI X*

Coordinatore:
Prof. CARMELO MONACO

Tutore:
Prof. GAETANO ORTOLANO

Co-tutore:
Prof. STEFANO CATALANO

Anno di discussione 2013

Sommario

| | |
|---|----|
| PREMESSA..... | 4 |
| 1 - INTRODUZIONE | 10 |
| 1.1- LA GEOMATICA: DEFINIZIONE E APPLICAZIONI | 10 |
| 1.2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEODINAMICO DELL'AREA PILOTA | 13 |
| 1.2.1 - Il massiccio delle Serre | 21 |
| 2 - L'INTEROPERABILITA' DEI DATI GEOSPAZIALI | 30 |
| 2.1 – ONTOLOGIE E WEB SEMANTICO | 30 |
| 2.1.1 - Geoscientific Mark Up Language - GeoSciML | 33 |
| 2.1.2 - Infrastructure for Spatial Information in the European Community - INSPIRE | 37 |
| 2.1.3 - Catalog Service for the Web – CSW | 39 |
| 2.1.4 - ESEMPI DI INTEROPERABILITA' A LIVELLO NAZIONALE: il Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT) | 40 |
| 2.2 - LA PETROLOGIA NEI GEODATABASE INTEROPERABILI..... | 45 |
| 2.2.1 – Osservazione Analisi e Mappatura | 47 |
| 2.2.2 - Le infrastrutture dei database geochimici: EarthChem, PetLab, MetPetDB | 56 |
| 2.3 - IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO “FOS2MAN” | 58 |
| 2.3.1- Database Design | 61 |
| 2.4 -SINTESI CONCLUSIVA | 71 |
| 3 - APPLICAZIONE GEOSTATISTICHE PER LA MAPPATURA GEOCHIMICA: ANALISI SEMIVARIOGRAFICA ED INTERPOLAZIONE DI INDICATORI PETROGENETICI MEDIANTE TECNICHE DI “KRIGING” SUI CAMPIONI PROVENIENTI DAL BATOLITE DELLE SERRE (CALABRIA, ITALIA) | 72 |
| 3.1 - LE MAPPATURE GEOCHIMICHE: AMBITI E STUDI PRECEDENTI | 72 |
| 3.2 - CENNI DI GEOSTATISTICA E TECNICHE DI INTERPOLAZIONE | 74 |
| 3.2.1-Approccio probabilistico | 75 |
| 3.2.2-Modelli stazionari | 77 |
| 3.2.3-Modelli stazionari di ordine 2 | 77 |
| 3.2.4-Modelli non stazionari | 78 |
| 3.2.5-Modelli con deriva | 79 |
| 3.2.6-Modello intrinseco di ordine k..... | 79 |
| 3.2.7-Variogramma sperimentale e teorico..... | 79 |
| 3.3-TECNICHE DI STIMA | 83 |
| 3.3.1-Tecniche deterministiche..... | 85 |
| 3.3.2-Tecniche geostatistiche (o Kriging) | 86 |

| | |
|---|-----|
| 3.4-STUDIO GEOPETROLOGICO DELLE ROCCE PLUTONICHE DI SQUILLACE-PETRIZZI | 88 |
| 3.4.1-Metodologia di studio applicata all'area pilota | 93 |
| 3.4.2-APPLICAZIONI GEOCHIMICHE E GESOSTATISTICHE NELL'AREA PILOTA | 94 |
| 3.5-ANALISI GEOSTATISTICA – SEMIVARIOGRAMMI, TREND E KRIGING..... | 106 |
| 3.5.1-Studio della SiO ₂ | 106 |
| 3.5.2-L'analisi del K ₂ O..... | 111 |
| 3.5.3-L'analisi del Na ₂ O | 114 |
| 3.5.4-Analisi della MI (Maficity Index) | 115 |
| 3.6-GENERAZIONE DELLA MAPPA LITOLOGICA | 118 |
| 3.7-RISULTATI..... | 122 |
| 4 - PROGETTAZIONE ED IMPLEMENTAZIONE SU PIATTAFORMA “GIS” DI UN METODO DI “IMAGE PROCESSING” PER L'AUTOMAZIONE DELL'ANALISI MODALE E MICROSTRUTTURALE: LO STUDIO DEI GRANATI ZONATI DI MAMMOLA PER LA RIDEFINIZIONE DEI VINCOLI PER LA COSTRUZIONE DEI “P-T PATH” | 127 |
| 4.1-FINALITA' PROGETTUALI | 127 |
| 4.2-LE IMMAGINI MULTISPETTRALI E L'IMAGE PROCESSING DELLE MAPPE A RAGGI X A FINI PETROLOGICI..... | 133 |
| 4.2.1-Statistica multariata applicata alle immagini SEM-EDS | 136 |
| 4.2.2-La firma spettrale: l'algoritmo introduttivo alla classificazione | 139 |
| 4.2.3-Metodi e tecniche per la classificazione delle immagini multispettrali..... | 140 |
| 4.2.4-Il filtraggio delle immagini | 143 |
| 4.3-PROCEDURA “X RAY MAP ANALYZER”: APPLICAZIONE AL CASO STUDIO | 145 |
| 4.3.1-L'acquisizione delle immagini | 149 |
| 4.3.2-Il primo ciclo: classificazione del microdominio | 151 |
| 4.3.3-Il secondo ciclo: distribuzione minero-chimica in un singolo minerale..... | 160 |
| 4.4-SINTESI CONCLUSIVA | 161 |
| 5- CONCLUSIONI GENERALI..... | 165 |
| RINGRAZIAMENTI..... | 169 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 171 |
| SITOGRAFIA..... | 182 |

PREMESSA

Geomatica è un neologismo di recente diffusione che riguarda le varie discipline per lo studio del territorio e dell'ambiente e comprende un ruolo determinante che oggi ha l'informatica negli sviluppi delle attività geoscientifiche. La Geomatica promuove un approccio sistemico integrato multidisciplinare per selezionare gli strumenti e le tecniche appropriate utili ad acquisire dati in modo metrico e tematico, integrando, trattando, analizzando, archiviando e distribuendo dati spaziali georeferiti con continuità ed in formato digitale (Gomarasca, 2004). Essa svolge inoltre un ruolo chiave in tutti i settori relativi allo sfruttamento e alla protezione del territorio, con metodi e strumenti tecnologici che ci consentono di misurare con precisione le dimensioni e le caratteristiche di varie entità geolocalizzate. Essa è inoltre capace di sintetizzare l'insieme delle conoscenze fornite dalle discipline del rilevamento, le mette a disposizione di innumerevoli altre discipline interessate allo studio di dati georeferenziati spesso caratterizzati da variabili di tipo dinamico.

Tra le problematiche attuali inquadrate nella realtà geomatica ricade l'acquisizione, il processamento e l'archiviazione dei dati geologici, solo di rado caratterizzati da un comune denominatore trasversale alle varie branche geoscientifiche, specie se confrontate a livello internazionale. Esistono diversità, talora sostanziali, vuoi sul piano sintattico, lessicale oltre che concettuale, nel modo di intendere alcuni termini delle geoscienze, allorchè ad esempio, nell'intento di catalogare le proprie analisi stratigrafiche, strutturali, petrografiche e geochemiche non sempre ci si attiene agli standard suggeriti dalla IUGS (*International Union of Geological Sciences*). In tale contesto, è anche evidente come certi tematismi risultino poco omogenei e coerenti, specie al variare dell'ambito geografico o della fonte di acquisizione. Non è raro, infine, riscontrare modalità di geomappatura ove il tematismo esprime parzialmente l'entità a cui è associato, men che meno l'esattezza e l'autenticità dell'informazione che si cela dietro il simbolo. Già da qualche tempo, le comunità scientifiche operanti nel settore geologico ed ambientale hanno rivolto l'interesse verso la "modellazione delle informazioni", nell'esigenza di sancire una maggiore omogeneità ontologica e terminologica, ancor più per delineare un assetto informativo strutturato del dominio geologico, finalizzato alla continuità della rappresentazione geospaziale oltre i limiti regionali o nazionali e, perdipiù, alla compatibilità tra sistemi differenti di "geo data mining". Ciò significa favorire una migliore diffusione ed interscambio dei dati, in quanto organizzati secondo una logica sistemica che garantisce l'interoperabilità anche tra piattaforme software differenti.

La costruzione di un simile modello si fonda sugli schemi di rappresentazione dall'ormai consolidato linguaggio UML (Unified Modeling Language), universalmente adottato per la modellazione di informazioni nei più svariati ambiti disciplinari. Mutuato dall'informatica per la rappresentazione dei modelli object-oriented¹, ben si presta per la definizione dell'ambito geologico e per coadiuvare la generazione di un linguaggio specifico per le geoscienze: il GeoSciML (Geoscientific Markup Language).

Il progetto GeoSciML è stato avviato nel 2003 sotto l'egida del gruppo di lavoro CGI (Commission for the Management and the Application of Geoscience Information) sul modello del Data Model Collaboration e propone uno schema concettuale in armonia con le direttive IUGS per quanto attiene agli aspetti ontologici, semantici e lessicali. La commissione comprende una larga partecipazione di figure specialistiche su scala internazionale finalizzata alla tutela ed al rispetto del pluralismo culturale e scientifico. Inoltre, quale derivato dal GML (Geographic Markup Language), eredita e comprende i relativi riferimenti di certificazione ISO (International Standard Organization) fornendo schemi di conformità con le maggiori direttive che regolamentano la trattazione dei dati e dei metadati di tipo geospaziale.

GeoSciML ha l'obiettivo di consentire l'interoperabilità delle informazioni geologiche fornendo gli strumenti utili ad uniformare le mappature e le viste dei dati dei relativi database. Ha preso spunto da numerose esperienze e proposte precedenti sulla modellazione di dati per le geoscienze, da attività intraprese in seno agli organi istituzionali quale il Servizio Geologico Britannico e quello Giapponese, in contesti multi-giurisdizionali quali l'NADM (North American Geologic Map Data Model) o orientati al settore industriale, evolvendosi gradualmente fino a raggiungere ad oggi la versione GeoSciML 3.2, già sufficientemente articolata per la descrizione di diverse branche del domino geologico. Taluni argomenti, come la geomorfologia, invece, sono ancora in fase di approfondimento.

Ispirandosi a questa rivoluzionaria innovazione che ha interessato più o meno dettagliatamente le molteplici discipline operanti in ambito geoscientifico, il primo degli scopi di questo lavoro si è incentrato sulla modellazione e la progettazione di un sistema informativo GIS Based applicato all'ambito della catalogazione coerente di dati petrografici, petrochimici e minerochimici ricollegabili a campioni di rocce plutoniche e metamorfiche in aree di basamento cristallino. Ciò al fine di consentire l'integrazione e l'armonizzazione di dati di tipo geologico, anche di natura

¹ Termine ereditato dal paradigma della programmazione ad oggetti che permette di definire oggetti software in grado di interagire gli uni con gli altri attraverso lo scambio di messaggi. È particolarmente adatta nei contesti in cui si possono definire delle relazioni di interdipendenza tra i concetti da modellare (contenimento, uso, specializzazione).

differente, acquisiti con le più svariate metodologie: rilevamento e misurazione diretta sul territorio, telerilevamento, indagini strumentali di vario tipo fino a quelle più sofisticate, quali i dati ricavati dalle analisi XRF (X-ray Fluorescence) dal SEM EDS (Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray spectroscopy) o dalla EPMA WDS (Electron Probe Microanalyzer - Wavelength Dispersive System) ovvero a quelle relative alle analisi di tipo isotopico e geocronologico ottenute, ad esempio, allo SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe). Un siffatto sistema informativo mira a contenere e correlare dati scaturiti da analisi di laboratorio su campioni a scala differenziata, ovvero dall'analisi micrometrica al SEM EDS alle analisi isotopiche allo SHRIMP eseguite alla scala della sezione sottile, al fine di consentire correlazioni dirette ed intuitive tra queste ultime e le analisi alla mesoscala. Scopo ultimo di tale sistema è stato quello di servire, ove possibile, ad ottenere mappature geotematiche derivate in cui ciascun dato è fruibile anche da sistemi remoti, nel rispetto dei recenti schemi di "interoperabilità" proposti in scala internazionale dalla CGI.

Sovrapporre dati, mappati o alfanumerici, è infatti ormai quasi indispensabile per poter condurre studi di comparazione tra fenomenologie di diversa natura. Ancor più peculiare ed inedita è l'analisi e la correlazione dei dati geopetrologici e mineralochimici quale risultato di elaborazioni da parte di software specifici per la ricostruzione termodinamica e termobarometrica, perché tali dati siano a loro volta rappresentati in modo organico e connesso all'interno dei geodatabase. Si parla, quindi, di dati ottenuti da un processo analitico che non solo fornisce valori delle proprietà intrinseche del campione, ma informazioni metriche o qualitative che caratterizzano esso stesso ed il contesto geologico di provenienza, indipendentemente dalla scala di riferimento.

Si è compiuto un ulteriore studio comparativo dei dati acquisiti con tecniche di osservazione diverse per peculiarità e raffinatezza, transitando dalla macro alla micro scala senza perdere di vista l'importanza di ciascuna acquisizione ed il valore che essa assume allo stadio finale della campagna di rilevamento, laddove il raggiungimento di un dettaglio analitico su un campione non annulla le informazioni acquisite a scala superiore bensì le integra nel particolare. Si tenga conto che le analisi di dettaglio, ovvero la microscopia ottica o elettronica su sezioni sottili, hanno sempre un focus puntuale, tant'è che i dati ottenuti vengono estesi alla scala dell'affioramento o dell'intera unità geologica, in virtù della "rappresentatività" del campione stesso. Durante la fase di ricerca bibliografica il concetto di "rappresentatività" del campionamento sembra non sia stato mai realmente quantificato e qualificato. Per tale ragione nella presente attività di ricerca è stato inoltre eseguito uno studio teorico sulla coerenza dei dati, dall'acquisizione di campagna alla sezione sottile, pervenendo così al concetto di "Sharpness Rock Index" (SRI), definito come il grado di intelligibilità di una roccia analizzata alla mesoscala o campione a mano in rapporto con

le osservazioni analitiche condotte a scala inferiore. Tale indice si pensa possa essere utile per quantificare se, ad esempio, il grado di attendibilità di un'osservazione mesoscopica condotta con l'ausilio della sola lente di ingrandimento portatile, sia alto o basso. Con un alto valore di "SRI" i limiti litologici tracciati in campagna acquisiranno un alto grado di attendibilità, essendo i litotipi oggetto di studio facilmente intellegibili, diversamente, qualora tale indice si attesti su bassi valori, i limiti litologici tracciati potrebbero risentire della difficoltà oggettiva ad esser definiti durante l'attività di rilevamento, ovvero, si renderà necessario l'integrazione dei dati analitici di laboratorio a supporto anche dell'attività di rilevamento e mappatura.

E' evidente, dunque, come tutto quanto costituisca il patrimonio informativo di una roccia, ossia i dati acquisiti con qualunque metodo scientificamente supportato, vada reso disponibile in modo organico e non ambiguo, codificato e collocato all'interno di un sistema di raccolta, o geotadabase, opportunamente progettato nel rispetto delle regole ontologiche, sintattiche e semantiche che assicurano i requisiti per una piena interoperabilità dei dati.

In concreto si è compiuto uno studio geopetrologico sistematico del basamento cristallino affiorante nel settore centrale della Calabria e più specificatamente all'interno del Massiccio delle Serre (Calabria meridionale), basato sull'acquisizione di dati di letteratura opportunamente rielaborati dopo l'integrazione con nuovi dati.

La scelta del Massiccio delle Serre non è stata casuale. Esso rappresenta infatti una porzione del cosiddetto Orogene Calabro Peloritano (OCP) (Pezzino et al., 2008), costituita da una sezione crostale Ercinica quasi completa, comprendente rocce ascrivibili ad una crosta profonda (metagabbri e paragneiss migmatitici) (Acquafredda et al., 2006; 2008), oggi affioranti nella zone settentrionale del Massiccio, passanti nella zone intermedia ad un corpo batolitico complesso caratterizzato dalla presenza di rocce plutoniche suddivisibili in più facies (Caggianelli et al., 2013), per arrivare, nell'attuale zone meridionale, all'affioramento di rocce ascrivibili ad una crosta medio-superiore costituite da paragneiss albitici e micascisti granatiferi evolventi a filladi (Angi et al., 2010). Tale peculiarità geologica risulta ad oggi relativamente rara a livello planetario essendo possibile osservare, studiare e campionare in posizione pressoché totalmente esposta rocce provenienti da una sezione crostale quasi completa, dalle zone più apicali che conservano ancora la loro copertura sedimentaria Mesozoica per arrivare ai termini più profondi che a tratti sembrano congelare il passaggio con una vera e propria MOHO relitta.

In tale contesto geologico si inserisce quindi l'intera ricerca che ha previsto:

- I. una prima parte del lavoro incentrata sulla catalogazione ed armonizzazione dei dati petrografici, petrochimici e minerochimici di rocce provenienti dal Massiccio delle Serre con particolare riferimento alle rocce plutoniche medio-crostali e a quelle metamorfiche

ascrivibili alla crosta superiore, con lo scopo di ottenere una banca dati potenzialmente in grado di fornire output pluri-geotematici basati, fin dove possibile, su una logica interoperabile secondo i più moderni schemi internazionali;

- II. la sperimentazione di alcune tecniche di interpolazione di dati geografici (p.es. Spline, IDW – Inverse Data Weigthed e Kriging) utilizzando i dati delle analisi petrochimiche delle rocce plutoniche affioranti nella zone nord-orientale delle Serre (zona di Squillace), in un'area dove il numero e la distribuzione dei campioni ha consentito un processo di interpolazione con un grado di attendibilità relativamente elevato. Esse hanno consentito di valutare la distribuzione spaziale degli elementi chimici contenuti nelle rocce plutoniche affioranti, evidenziando diverse peculiarità di interesse petrologico;
- III. la generazione di una mappatura geochemica automatizzata per mezzo dell'implementazione di un algoritmo integrato su piattaforma Esri ArcGis®, compilato in Python, in grado di ricostruire, a partire dalle analisi chimiche dei campioni, una mappatura litologica interpolata, ove ciascun punto della mappa derivata è classificato sulla base del diagramma TAS 1985 (Middlemost, 1985);
- IV. l'automazione di una tecnica di indagine geopetrologica che ha avuto per oggetto l'elaborazione di X-Ray Map¹, immagini multispettrali rappresentative della distribuzione dei singoli elementi su sezioni sottili di campioni di roccia. Più nello specifico è stato progettato ed implementato un metodo di image processing largamente basato su funzioni disponibili su ESRI ArcGis® versione 9.3 e successive che ha previsto la scrittura di oltre 1500 righe di codice Python, largamente basato su funzioni di analisi statistica multivariata opportunamente integrate con originali funzioni cicliche atte a minimizzare i tempi di lavoro e a massimizzare la resa degli output (Ortolano et al., submitted). La sua applicazione sui campioni esaminati ha evidenziato risultati di indiscusso interesse petrologico che costituiscono parte del patrimonio dati da trattare all'interno del geodatabase (Fiannacca et al., 2012; Ortolano et al., submitted).

Quest'ultima tecnica è stata maggiormente utilizzata per studiare i rapporti tessiturali di alcuni campioni di micascisti granatiferi appartenenti alla sezione di crosta superiore del Massiccio delle Serre (Paragneiss di Mammola), con lo scopo di definire quantitativamente i vincoli paragenetici su base minerochimica utili alla costruzione di PT path per mezzo di tecniche geotermobarometriche avanzate (p.es. modellizzazioni termodinamiche con Perplex – Connolly,

¹ Rappresentazione ad 8bit del contenuto degli elementi chimici presenti nel campione di roccia analizzato ricavate da rilevatori EDS e/o WDS.

1990; Connolly e Petrini, 2003; Cirrincione et al., 2008; Angi et al., 2010). La sua applicazione sui campioni esaminati ha evidenziato risultati di indiscusso interesse petrologico che costituiscono parte del patrimonio dati da integrare e quindi potenzialmente trattare all'interno del geodatabase.

Al fine di strutturare un percorso logico-concettuale di tipo schematico relativamente all'utilizzo delle tecniche geomatiche sopra descritte in campo geo-petrologico, la parte seguente dell'elaborato ha previsto, dopo un'introduzione finalizzata alla schematizzazione del concetto di geomatica *l.s.* e all'inquadramento geologico generale dell'area pilota:

- I. una prima parte, largamente incentrata sulle modalità operative con cui è stato deciso di strutturare il geo-database contenente le informazioni relative alle analisi dei campioni di roccia alle diverse scale di osservazione e provenienti da diverse fonti strumentali;
- II. una seconda parte dove si sono inizialmente approfondite tutte le tecniche relative alle metodologie di interpolazione conosciute, con lo scopo di verificare la tecnica di interpolazione più idonea che tenga in considerazione i limiti intrinseci di una campionatura in campo geologico (ad es. distribuzione randomica e discontinua dei punti di campionamento). A questo si è poi affiancato lo sviluppo del nuovo algoritmo atto a realizzare in maniera automatica mappe geo-litologiche su base TAS, applicato in prima istanza sull'area pilota di Squillace-Petrizzi (Calabria centro-orientale);
- III. una terza parte, dove si sono descritte le modalità con le quali si è arrivato allo sviluppo di un insieme di strumenti atti ad analizzare, attraverso tecniche di analisi statistica multivariata, immagini a raggi X di campioni di rocce metamorfiche provenienti dall'area di Mammola (zona meridionale del Massiccio delle Serre – Calabria) con lo scopo di integrare i dati minero-chimici puntuali con mappe micro-tessiturali di tipo quantitativo ottenute su metapeliti a granato già utilizzati per vincolare l'evoluzione tettono-metamorfica della crosta superiore delle Serre (Angi et al., 2010).

Infine, le conclusioni di ognuna delle tre parti, in cui è stata suddivisa l'attività di ricerca, sono state sintetizzate enfatizzando il ruolo centrale della geomatica *l.s.* quale strumento fondamentale utile all'archiviazione, trattazione, elaborazione e sviluppo di tecniche di interpolazione ed analisi quantitativa di dati provenienti da diverse fonti di acquisizione in campo geoscientifico.

1 - INTRODUZIONE

Scopo principale della presente tesi è quello di fornire al lettore uno strumento completo e versatile sullo stato dell'arte ad oggi dell'utilizzo delle tecniche geomatiche in ambito geopetrologico.

A tal fine nella parte introduttiva si è reso necessario strutturare un excursus sul concetto di geomatica *s.l.* per arrivare a specificarne i tratti salienti inerenti le applicazioni di tipo geopetrologico suddivise secondo gli scopi del presente lavoro in tre parti distinte, benché collegate da un denominatore comune: la geomatica e la sua utilità in campo petrologico.

Nella seconda parte dell'introduzione si è invece sintetizzato un quadro geologico relativo all'area di riferimento presa quale modello pilota per il test delle tecniche geomatiche applicate, in parte sviluppate ed ampliate dalla stesura di nuovi codici implementati in Python, largamente basati su piattaforma ArcGis® 9.3 o successive.

1.1- LA GEOMATICA: DEFINIZIONE E APPLICAZIONI

Se in altri paesi del mondo gode da alcuni decenni di una propria identità ed una specifica connotazione nell'ambito delle discipline geoscientifiche, la Geomatica in Italia è stata codificata solo nel 2012 come disciplina ingegneristica applicata al territorio. Non vi è mai stata una specifica scuola di Geomatica e le discipline che trattano del rilievo metrico sono state sempre interpretate come argomenti di base o ancillari per l'ingegneria edile, civile ed ambientale, architettura del territorio, oppure a supporto dei geologi e in alcuni casi di archeologi.

Per queste ragioni, l'Italia rappresenta un fenomeno raro nella comunità geoscientifica internazionale avanzata, ove già da tempo molti paesi hanno caratterizzato dei corsi di studio specializzati (solo da qualche anno è comparso di rado un corso accademico in informatica ad indirizzo geomatico). Diversamente sono le Scuole di Dottorato la sede in cui avere un approccio teorico completo sulle discipline Geomatiche con lo scopo di formare nuovi ricercatori e/o docenti che abbiano l'esigenza di integrare con nuove metodologie di elaborazione i propri dati geologici nel senso più ampio del termine.

La ricerca sulla Geomatica soffre ancor più a causa di tendenze nazionali ed internazionali finalizzate a sostenere i progetti di ricerca sulle applicazioni pratiche.

Le principali attività di ricerca della geomatica applicata alle geoscienze riguardano infatti:

- creazione di banche dati territoriali;
- metodologie per la realizzazione dei piani di intervento legati al territorio, quali protezione civile regionale, comunale ed intercomunale;
- realizzazioni di cartografia tematica anche tramite web mapping;

- tecniche di modellazione geodinamica 2D/3D;
- analisi ed elaborazione di immagini satellitari, aeree e microscopiche.

In tale contesto si inserisce solo di recente il prorompere della geomatica in ambito nazionale, con tutte le novità connesse di tipo epistemologico, che vede svilupparsi una nuova centralità del trattamento delle osservazioni, sempre più incentrate sullo sviluppo di tecniche di elaborazione quantitativa possibilmente di facile utilizzo anche per i non addetti ai lavori. Le tecnologie dell'informazione fra le quali spiccano i sistemi informativi e l'informatica grafica hanno non solo favorito (ed imposto) il passaggio dall'analogico al digitale delle suddette tecniche, ma anche promosso l'avvento di nuove tecniche di restituzione (Mussio L., 2009). Inoltre, ha altresì preso in considerazione temi fondamentali della geomatica applicata, quali il mondo dei ben noti GIS (Geographic Information System) per arrivare fino agli ancora meno noti LIS (Local Information System)¹, passando per la galassia dell'analisi delle immagini satellitari, sancendo di fatto il passaggio dalla descrizione qualitativa o perlomeno semi-quantitativa delle osservazioni, alla geomatica s.s. (potenzialmente in grado di svilupparsi quale nuova disciplina a se stante trasversale a molte altre). Essa ha l'ambizione di prendere in considerazione non solo gli aspetti numerici e quantitativi dei dati, ma anche quelli tematici e qualitativi, ad esempio, con la foto-interpretazione di sequenze, immagini, mappe, scene e modelli 3D. In questo modo, la foto-interpretazione e la cartografia informatica (cui fa riferimento tutto il mondo dei GIS e indirettamente dei LIS, per quanto riguarda gli aspetti più legati alle discipline del rilevamento) s'avvicinano e scambiano importanti contributi con le tecnologie dell'informazione.

Un altro aspetto, non secondario, delle odierne trasformazioni in atto è il progressivo interesse delle stesse discipline del rilevamento per le scienze umane, in parte corrisposto, nella volontà di queste ultime di darsi strumenti quantitativi per misurare la qualità.

Oltre alla fotogrammetria, la geodesia, la cartografia, di recente sono emerse nuove tecniche quali i sistemi di posizionamento satellitare, l'immagine o il laser scanning 3D, il telerilevamento con sensori operanti anche al di fuori delle bande del visibile ed i sistemi informativi geografici che, nella distribuzione web-gis, trovano un importante metodo di disseminazione e distribuzione di informazioni (Carlucci R., 2013 – Archeomatica.it).

Inoltre, per studiare gli aspetti matematici salienti delle discipline del rilevamento significa innanzitutto prendere in considerazione le stesse discipline del rilevamento (dalla geodesia e cartografia alla fotogrammetria ed alla fotogrammetria digitale, come pure dalle tecniche di

¹ Sistemi informativi scissi dal contesto geografico (ad es. la mappatura tematica di una sezione sottile o di un circuito elettronico su una piastra di silicio) benché potenzialmente ricollegabili ad una primitiva geografica (ad es. il punto di campionamento)

posizionamento alle reti geodetiche e topografiche), mettendone in evidenza proprio tali aspetti peculiari. Dopodiché l'elenco delle principali caratteristiche del trattamento delle osservazioni parte dalla statistica descrittiva, fa riferimento alla stima di parametri di modelli ed alle relative classi di problemi ed affronta i problemi dell'inferenza statistica multivariata, per applicare il tutto alla compensazione di reti di tipo geodetico ed alla geodesia integrata I.s..

Pertanto è necessario sviluppare nuove strategie al fine di sostenere gli studi di base su nuovi strumenti e algoritmi. Tale sforzo richiede una più profonda comprensione dei fondamenti di tali discipline ed una produzione di libri di testo che fissino i principi di base e nuove realizzazioni teoriche (Rinaudo F., 2011).

Come detto, un obiettivo preminente della geomatica riguarda la mappatura tematica del territorio, che può comprendere una moltitudine di ambiti applicativi di quanto mai svariata natura. Al giorno d'oggi il settore della geo-informazione sta subendo grandi cambiamenti e la transizione dai sistemi di mappatura tradizionale, cartacea ed anche digitale, sta evolvendo verso frontiere sempre più ampie ed innovative. Ormai una notevole quantità di dati geologici, 2D o 3D, sono memorizzati in banche dati. Gli esperti ed i ricercatori sono consapevoli del fatto che i nuovi meccanismi di conoscenza e di controllo della qualità hanno bisogno di integrarsi ai sistemi di database, al fine di assicurare e garantire dati ad alte prestazioni. E' necessario, tuttavia, introdurre degli schemi concettuali composti da relazioni tra entità e vincoli tra le relazioni stesse, utili a garantire la realizzazione di piattaforme operative interoperabili per la promozione del workflow scientifico interdisciplinare e professionale, evitando errori concettuali e tecnici a garanzia della stessa qualità dei dati, siano essi puri o derivati.

E' vero che le relazioni tra entità e rispettivi vincoli possono essere formulati utilizzando linguaggi naturali, ma qualunque linguaggio naturale è soggettivo e varia tra individuo ed individuo, tale che le espressioni possono essere ambigue e facilmente causare confusione. E' per questo che, ad esempio, i vincoli spaziali sono oggetto di astrazione utilizzando la geometria che raffigura la forma esatta ed anche la topologia che rivela la relazione spaziale tra geometrie. E' questa la modalità per rendere più chiaro il significato di una relazione o di un vincolo. Inoltre, utilizzando diagrammi UML standardizzati ed espressioni OCL (Object Constraint Language), i geo-vincoli possono essere formalizzati in un misura in cui, non solo gli esseri umani, ma anche le macchine possano comprenderli. Con il cosiddetto "model-driven" (Ingegneria guidata dal modello), architettura supportata da vari software, espressioni OCL possono essere convertite automaticamente in altri modelli o codici eseguibili (ad esempio PL / SQL) solo con alcuni click del mouse.

E' questo il punto verso cui converge l'interesse del geomatico, ovvero adottare al meglio i metodi e gli strumenti più raffinati mutuati dalle scienze dell'informazione insieme a quelle fisiche, chimiche, geologiche ed ingegneristiche per trattare lo studio del territorio a 360 gradi.

1.2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEODINAMICO DELL'AREA PILOTA

La scelta dell'area di studio sulla quale sperimentare le metodologie geomantiche oggetto di questa dissertazione non a caso ricade nella zona centrale della Calabria, ove si trova esposta in maniera pressochè continua una sezione di basamento Paleozoico di pertinenza palinspastica sud-Europea che conserva localmente ancora la relativa copertura Mesozoica. Il basamento, costituito da rocce metamorfiche essenzialmente riconducibili ad un ciclo metamorfico Ercinico intruse da un corpo plutonico composto messi in posto in un regime sin-tettonico di tipo estenzionale, costituisce nel suo insieme con la relativa copertura sedimentaria Mesozoica un profilo pressoché completo di crosta continentale strutturata durante il ciclo orogenico Ercinico (vedi ad es. Angi et al., 2010). La sua attuale posizione fisiografica è stata indotta dalla tettonica Cenozoica tra i cui effetti è visibile l'esumazione dei diversi livelli crostali.

Questo settore dell'OCP è quindi il risultato di un'evoluzione geologico-geodinamica ascrivibile alle fasi derivanti dall'orogenesi Ercinica nel continente europeo. Come è noto l'orogene Ercinico nel suo complesso è il risultato di iniziali processi di accrezione devoniani dei terreni peri-gondwanici. Tale ipotesi è confermata dagli studi del basamento sardo, che costituisce la porzione di catena Ercinica più vicina all'OCP non interessata dagli effetti conseguenti allo sviluppo dell'evoluzione Alpina. In tale contesto si inserisce l'analisi geologico-geodinamica del settore oggetto del presente studio. Taluni dati sembrano confermare che le fasi iniziali dell'evento Ercinico (Devoniano-Carbonifero inferiore) sono segnate da un forte ispessimento crostale (Costa, 1992), dovuto alla crosta continentale della placca Armoricana che sovrascorre sul margine passivo del Gondwana (Carmignani et al., 1992).

Uno stile tettonico di tipo compressivo ha caratterizzato questa fase dando origine a diversi piani di sovrascorrimento lungo i quali si è riscontrato un metamorfismo regionale di tipo Barroviano di media pressione (Menard & Molnar, 1988; Finger et al., 1998; Sylvester et al., 1998; von Raumer et al., 1999a; 1999b; von Raumer et al., 2002), accompagnato da processi di accrezione che via via hanno condotto alla strutturazione della "cordigliera ercinica", prima della collisione finale del Gondwana contro la Laurasia nel tardo Carbonifero e la formazione del supercontinente Pangea. Le varie tesi proposte sull'assetto geodinamico del Mediterraneo convergono nell'asserire l'esistenza del supercontinente Pangea a partire da 300 Ma, ossia nella fase finale del ciclo orogenico, e della sua successiva disgregazione; ciascuna, però, riferisce diverse dimensioni e

geometrie dei blocchi continentali che sono entrati in collisione contro l'Europa meridionale. Importanti fasi distensive che hanno interessato l'intera litosfera si sono registrate alla fine dell'evento orogenetico in oggetto (Menard & Molnar, 1988; Burg et al., 1994) e vengono descritte da Arthaud & Matte (1975) come una "evoluzione tardo ercinica". Tutto ciò ha determinato un indebolimento della crosta in seguito al calore radiogenico e al riequilibrio termico che è continuato per circa 40-60 Ma. La persistenza di forti anomalie nei campi geotermici ha favorito processi di fusione parziale nella crosta inferiore con conseguente risalita di fusi mantellici. In tale contesto geodinamico si sviluppano agevolmente processi metamorfici ed ignei. In particolare il metamorfismo granulitico ha interessato la maggior parte delle rocce di basamento della Calabria, ed è stato datato intorno ai 290-300 Ma, così come i prodotti magmatici, rocce granitoidi e gabbroidi, affioranti nella Sila (Batolite silano) e nelle Serre (Batolite delle Serre). Ad est, la subduzione della Paleotetide sotto il margine euroasiatico e la successiva collisione continentale, nota in letteratura come orogenesi Cimmerica, determinano un magmatismo calcocalcino documentato in tutti i domini ercinici europei.

Nel passaggio Carbonifero-Permiano è segnato dall'inversione delle principali strutture tettoniche la quale ha dato origine al collasso della preesistente "cordigliera ercinica", determinando l'apertura della Neotetide (Stampfli, 2000; Figura 1). Tale braccio oceanico si estendeva dall'Australia fino all'area mediterranea e la sua apertura ha determinato la deriva del "Cimmerian Superterrene" e la progressiva chiusura della Paleotetide nel Triassico medio. La subduzione dello slab della Paleotetide, soggetto a roll-back, provoca l'apertura di numerosi *back-arc basins* lungo il margine euroasiatico, agevolando così il collasso finale della "cordigliera Ercinica" (Ziegler & Stampfli, 2001).

Alcuni bacini vengono chiusi durante la collisione Cimmerica mentre altri, Meliata, Maliac e Pindos (Figura 2), rimangono intatti e la loro subduzione tardiva induce l'apertura di più recenti *back-arc basins* come il Vardar e il Mar Nero (Figura 2). Nel dettaglio, la rotazione dell'Africa rispetto all'Eurasia dopo il Triassico superiore, induce la subduzione dell'oceano Meliata sotto la crosta della Neotetide. Questa subduzione intra-oceanica ha provocato l'apertura dell'oceano Vardar che ha sostituito completamente il precedente bacino oceanico intorno alla fine del Giurassico. Nel Giurassico inferiore la progressiva chiusura della Neotetide instaura un campo di stress che contribuisce alla rottura delle Pangea e all'apertura dell'Atlantico Centrale. Contemporaneamente nell'attuale area mediterranea si forma un nuovo bacino oceanico chiamato Ligure-Piemontese o Tetide Alpina collegato con l'Atlantico Centrale tramite una serie di strutture localizzate grossomodo lungo l'attuale costa settentrionale dell'Africa, delineando una trascorrenza sinistra tra l'Africa e l'Eurasia.

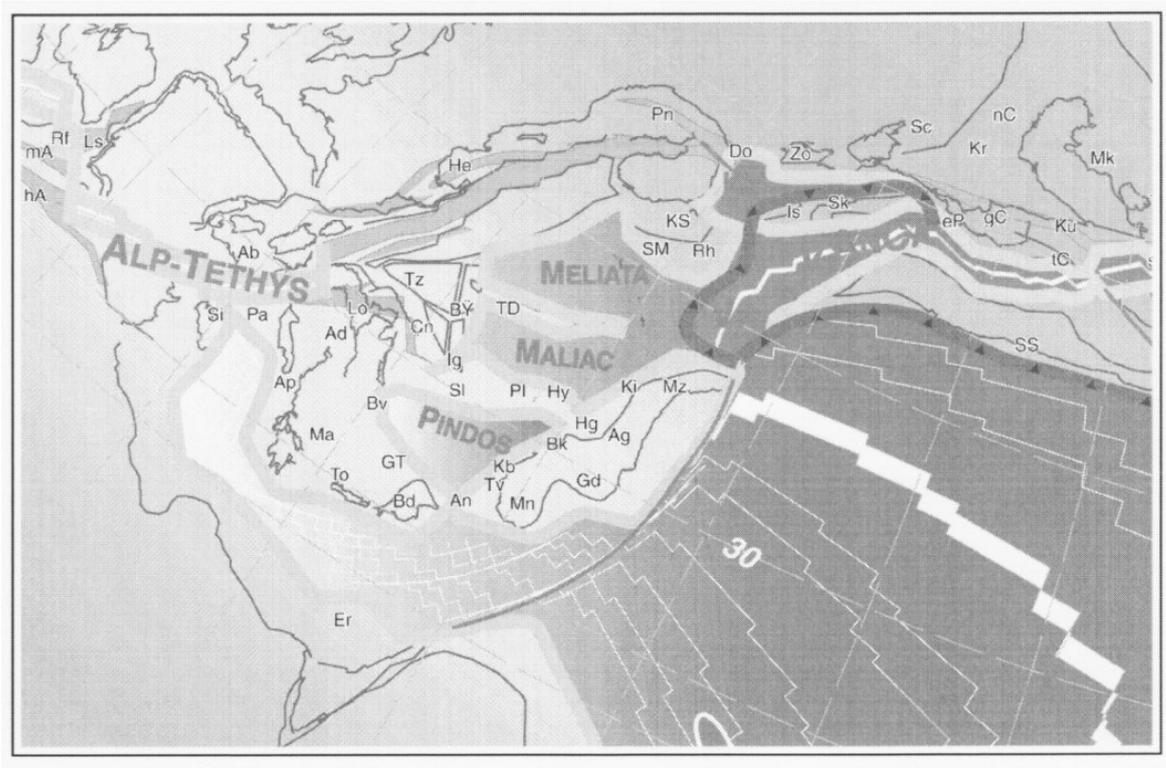


Figura 1- Ricostruzione del Giurassico medio (Aaleniano, 180 Ma). I bacini oceanici Pindos, Maliac e Meliata rappresentano back-arc basins formati in seguito alla chiusura della Paleotetide e al roll-back dello slab che subduce sotto il margine Europeo. Legenda: Ab, Alboran; Ad, Adria s. s.; Ag, Aladag; An, Antalya; Ap, Apulia s. s.; Bd, Beydaghlari; Bk, Bolkardag; By, Beyshehir; Bv, Budva; Cn, Carnic-Julian; Do, Dobrogea; eP, east Pontides; Er, Eratosthen; gC, great Caucasus; Gd, Geydag; GT, Gavrovo-Tripolitza; hA, high-Atlas; He, Helvetic rim basin; Hg, Huglu; Hy, Hidra; Ig, Igal trough; Is, Instabul; Jv, Juvavic; Kb, Karaburun; Ki, Kirshehir; Ko, Korab; KS, Kotel-Stranja; Ku, Kura; Lo, Lombardian; Ls, Lusitanian; mA, middle Atlas; Ma, Mani; Mk, Mangyshlak rift; Mn, Menderes; Mz, Munzur dag; nC, north Caspian; Pa, Panormides; PI, Pelagonian; Pn, Pienniny rift; Rf, Rif external; Rh, Rhodope; Si, Sicani; Sl, Slavonia; Sc, Scythian platform; Sk, Sakarya; SM, Serbo-Macedonian; SS, Sanandaj-Sirjan; Tc, Transcaucasus; TD, Trans-Danubian; To, Talea Ori; Tv, Tavas+Tavas seamount; Tz, Tizia (da Stampfli et al., 2002).

Secondo alcuni autori, tale movimento relativo permane fino all'Eocene quando, a motivo della progressiva penetrazione delle propaggini continentali del margine africano (Adria e Arabia) all'interno dell'Eurasia, inizia una lenta convergenza diretta N-S tra le due placche. Nel Giurassico superiore, il Vardar obduce verso sud sul margine pelagoniano e contemporaneamente subduce al di sotto della Moesia. Infine, il rifting del tardo Cretaceo, che precede l'apertura del Mar Nero, rappresenta la terza generazione di back-arc basins in quest'area (Stampfli & Borel, 2002).

L'apertura della parte più settentrionale dell'oceano Atlantico, tra l'Europa e la Groenlandia, si completa nell'Eocene, con evidenti ripercussioni importanti nell'area mediterranea. Si passa, infatti, da un regime distensivo ad uno compressivo che determinerà la progressiva chiusura dell'oceano Ligure-Piemontese, quest'ultimo in subduzione al di sotto dei settori crostali Africani, dunque la successiva collisione continentale responsabile dell'orogenesi Alpina.

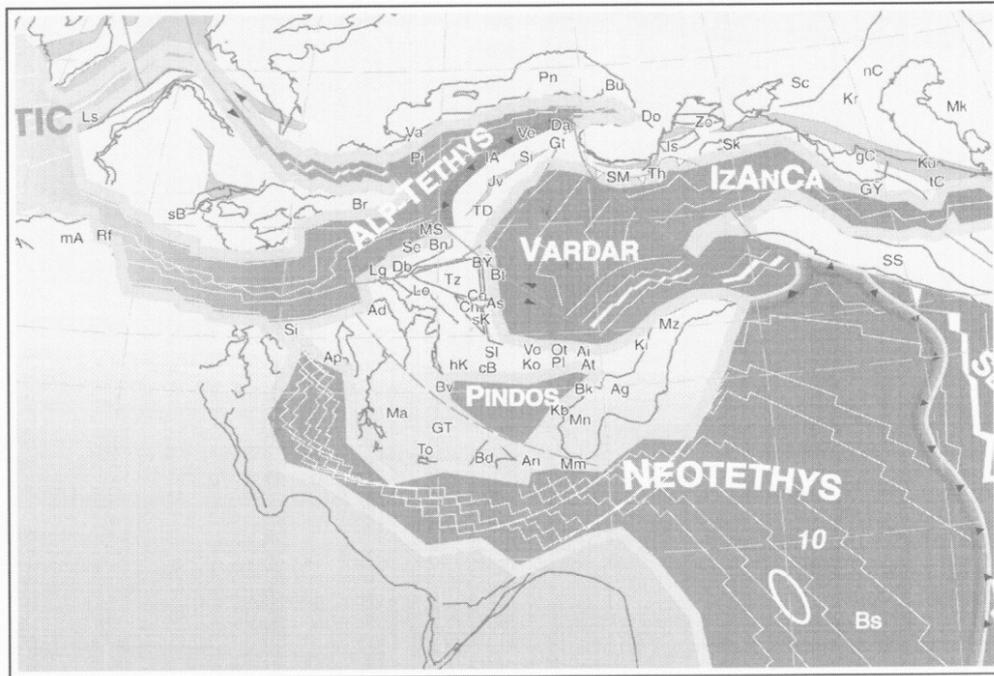


Figura 2 - Ricostruzione del Cretaceo inferiore (Aptiano, 120 Ma). L'apertura del Bacino del Valdar è provocata dalla subduzione intra-oceanica dell'oceano Meliata sotto la crosta della Neotetide. Legenda: Ad, Adria s. s.; Ag, Aladag; An, Antalya; Ap, Apulia s. s.; Ai, Argolis; As, Apusenisouth, ophiolites; At, Attika; Bd, Beydaghlari; Bk, Bolkardag; Bn, Bernina; Br, Briançonnais; Bt, Bator-Szarvasko; Bu, Bucovinian; By, Beyshehir; Bv, Budva; cB, central Bosnia; Cn, Carnic-Julian; Co, Codru; Da, Dacides; Db, Dent Blanche; Do, Dobrogea; gC, great Caucasus; Gd, Geydag; Gt, Getic; GT, Gavrovo-Tripolitza; hK, high karst; IA, Izmir-Ankara; Is, Instabul; Kb, Karaburun; Ki, Kirshehir; Ku, Kura; Lg, Ligerian; Lo, Lombardian; Ls, Lusitanian; mA, middle Atlas; Ma, Mani; Mk, Mangyshlak rift; Mm, Mamonia accretionary complex; Mn, Menderes; MS, Margna-Sella; Mz, Munzur dag; PI, Pelagonian; Pn, Pienniny rift; Rf, Rif external; sB, sub-Betic rim basin; Sc, Scythian platform; Se, Sesia (western Austroalpine); Si, Sicilian; SM, Serbo-Macedonian; SS, Sanandaj-Sirjan; tC, Transcaucasus; TD, Trans-Danubian; To, Talea Ori; Tz, Tizia; Va, Valais trough; Ve, Veporic; Vo, Vourinos (Pindos) ophiolites (da Stampfli et al., 2002).

In tale contesto si inserisce l'evoluzione geologico-geodinamica del cosiddetto segmento orogenico Calabro-Peloritano, quale risultato di una complessa evoluzione tettono-metamorfica, perlopiù ascrivibile alle fasi orogeniche erciniche sia pur localmente riprese più o meno pervasivamente durante le fasi dell'orogenesi alpina. In particolare, la catena alpina, in Calabria, è costituita da un edificio a falde caratterizzate sia da resti di crosta oceanica sia da segmenti di crosta continentale. Vi sono ampie divergenze tra gli studiosi circa l'attribuzione della crosta continentale Calacro-Peloritano nel suo insieme appartenente al margine europeo o a quello africano, mentre sembra condivisa la derivazione tetidea per le scaglie di crosta oceanica. Ipotesi alternative derivano ad esempio dai lavori di Guerrera et al. (1993), i quali ipotizzano la presenza di un microcontinente "Calabro", collocato in una posizione intermedia tra i domini africani e la placca europea.

Inizialmente Bonardi et al. (1976) affermano che la regione cristallina calabro-peloritana è il risultato di una complessa sequenza di eventi geologici, ma va considerata come un singolo

“terrane” durante il Terziario medio-superiore, nonostante la presenza in Sila e nei Peloritani di thrusts africa-vergenti. Successivamente lo stesso Bonardi et al. (1980, 1982a, 1982b) e Scandone (1982) sostengono che l’assetto geologico-strutturale della regione potrebbe essere più complicato poichè l’attuale Calabria sarebbe frutto della collisione di due “terrane” durante il terziario.

L’assetto strutturale descritto da Tortorici (1982), ricostruito sulla base di dati geologico-strutturali delle unità affioranti, distingue due settori della Calabria, separati pressappoco dalla linea teorica tra Capo Vaticano-Valle del Mesima-Soverato. In particolare il settore meridionale sarebbe caratterizzato dall’assenza di unità ofiolitiche e dalla mancanza di unità carbonatiche appenniniche al di sotto delle unità cristalline non raggiunte dalla deformazione alpina. Sulla base di tali osservazioni Bonardi et al. (1982) propongono altresì, un’ipotesi interpretativa per i due settori, secondo cui la deformazione del settore settentrionale, iniziata nel Cretaceo superiore con la formazione della catena Eo-alpina, sarebbe continuata fino alla strutturazione della Catena appenninica, associando quindi l’evoluzione di tale settore al segmento meridionale della suddetta catena; per il settore meridionale, invece, ipotizza una correlazione con la catena maghrebide, di cui rappresenterebbe il dominio più interno indeformato fino all’Eocene.

Più avanti, Bonardi et al. (2001) consolidano il quadro strutturale precedentemente ipotizzato affermando che il il segmento orogenico calabro peloritano altro non sia che un “composite terrane” coniando il termine CPCT (“Calabria-Peloritani Composite Terrane”) in quanto costituito da due “subterrane”: il subterrane meridionale e quello settentrionale. Secondo tali autori è possibile osservare molteplici caratteri geologico-strutturali differenti nelle due aree, ad esempio:

- nel subterrane meridionale (sCPT) affiora una copertura sedimentaria continua dal Lias all’Oligocene, mentre in quello settentrionale (nCPT) si riscontrano maggiori lacune stratigrafico-sedimentarie;
- nel nCPT è osservabile una doppia vergenza delle falde, mentre nel sCPT hanno una singola vergenza verso i domini africani;
- unicamente nel nCPT affiorano rocce ofiolitiche ed evidenze di un metamorfismo di HP/LT;
- nel sCPT si osservano evidenze di un sicuro episodio metamorfico nell’Oligocene;
- dopo lo sviluppo del bacino di Stilo-Capo d’Orlando solo nel settore meridionale, si ha la sovrapposizione del settore settentrionale sulle unità esterne appenniniche;
- sempre nel solo settore meridionale è presente una falda di “argille varicolori”, messasi in posto nel Langhiano sulla Formazione di Stilo-Capo d’Orlando o direttamente sul basamento;

- mancanza nella sCPT di un chiaro raddoppiamento della discontinuità di Mohorovicic (Tortrici, 1982) come invece si evidenzia nella nCPT (Guerra et al., 1981).

Benchè il limite tra i due *subterrane* non sia del tutto evidente, alcuni autori lo assimilano ad uno dei contatti con direzione ENE nelle vicinanze di Cardinale, Serra S. Bruno e Soverato, nelle Serre Settentrionali (Bonardi et al., 1976). Successivamente, Bonardi et al. (2001) lo ipotizzano al di sotto dell'Unità di Stilo; dunque l'aggregazione tra nCPT e sCPT è ascritta con buona probabilità all'Oligocene o comunque non oltre il Miocene medio. Durante questo periodo, un diffuso regime compressivo ha portato il settore meridionale a sovrascorrere sopra quello settentrionale, come suggerito dalla presenza, tra Amantea e Catanzaro, di un klippen dell'Unità di Stilo al di sopra delle unità appartenenti al nCPT. I due settori che compongono il CPCT hanno subito una differente evoluzione geodinamica a partire dall'apertura oceanica Giurassica. In particolare il nCPT, situato tra due aree oceanizzate, è stato interessato dalla fase Eo-alpina che ha comportato la chiusura dell'oceano Ligure-Piemontese e successivamente, durante il Burdigaliano, dal trasporto sull'avampaese Apulo lungo la "Linea di Sangineto", il cui movimento è riconducibile ad una struttura transpressiva sinistra. Il settore meridionale, invece, si è accresciuto tra l'Aquitano inferiore e il Burdigaliano medio e durante il Langhiano entra in collisione con il margine Ibleo attraverso la "linea di Taormina" (Ghisetti et al., 1991) che assume la geometria di un thrust a basso angolo.

Sulla base di ulteriori dati strutturali, geologici e geotermobarometrici, Pezzino et al. (2008) forniscono una nuova interpretazione del Massiccio dell'Aspromonte, apportando nuovi rilevanti contributi alla lettura geologico-strutturale del settore meridionale del CPCT. In accordo con Pezzino et al. (1990, 1992), Puglisi & Pezzino (1994) e Ortolano et al. (2005), gli autori ritengono che le sequenze metapelitiche geometricamente più profonde, denominate Gruppo Metapelitico Inferiore (GMI) o Unità Madonna di Polsi (UMP; Pezzino et al., 1990) e affioranti nelle tre principali finestre tettoniche di Cardeto (Fazio et al., 2008), Madonna di Polsi (Pezzino et al., 1990) e Samo Africo (Ortolano et al., 2005), sarebbero interessate esclusivamente da un'evoluzione metamorfica Alpina. In particolare l'evento metamorfico è caratterizzato da uno stadio precoce di alta pressione (AP) riconducibile ad un'evoluzione Meso-alpina connessa con un ispessimento crostale durante la collisione continentale tardo Cretacea tra il promontorio della Adria e il margine Europeo (Pezzino et al., 2008 and reference therein). L'Unità Madonna di Polsi, a solo metamorfismo Alpino, è interpretata come la continuazione settentrionale della copertura sedimentaria Mesozoica dell'Unità di Mandanici, ovvero la Serie di Ali (Cirrincione & Pezzino, 1991). Sulla base di queste nuove considerazioni, gli autori sostengono che l'evoluzione pre-Alpina dovrebbe coinvolgere un margine continentale assottigliato costituito da un basamento ercinico,

rappresentato dall'Unità di Mandanici e dalla sua copertura sedimentaria Mesozoica. Tale margine, durante la fase Meso-Alpina, subduce sotto la placca Europea determinando la sovraimpronta alpina nei terreni ercinici dell'Unità di Mandanici e lo sviluppo di facies metamorfiche diverse nei terreni che costituiscono la copertura sedimentaria, in risposta a condizioni metamorfiche variabili in virtù dell'originaria collocazione sullo slab (Figura 3).

Durante l'intervallo Oligocene-Miocene inferiore si assiste all'esumazione dell'intero blocco legata ad uno stadio di shearing che, secondo Pezzino et al. (1990, 1992) e Ortolano et al. (2005), avviene in un regime compressivo, a differenza di Platt & Compagnoni (1990) e Heymes et al. (2008) che ritengono sia collegato ad una tettonica estensiva relativa al roll-back dello slab Ionico sotto il cuneo accrezionale calabro. L'evento milonitico determina nel Massiccio dell'Aspromonte il sovrascorrimento dell'Unità Aspromonte-Peloritani su GMI (Pezzino et al., 1990 e Ortolano et al., 2005), mentre nei M. Peloritani UAP si sovrappone all'Unità di Mandanici (Atzori et al., 1994). In accordo con Pezzino et al. (2008), le modalità con cui si sviluppa lo shearing in compressione sono coerenti con il modello di "corner-flow" di Chemenda et al. (2000). Nel caso specifico, l'Unità Aspromonte-Peloritani (APU in Figura 3) rappresenterebbe il backstop del cuneo accrezionale alpino lungo il margine continentale Europeo, al di sotto del quale sottoscorre a profondità variabili al crosta continentale assottigliata costituita dall'insieme delle Unità di Ali, Cardeto, Samo-Africo e Polsi (LMG in Figura 3).

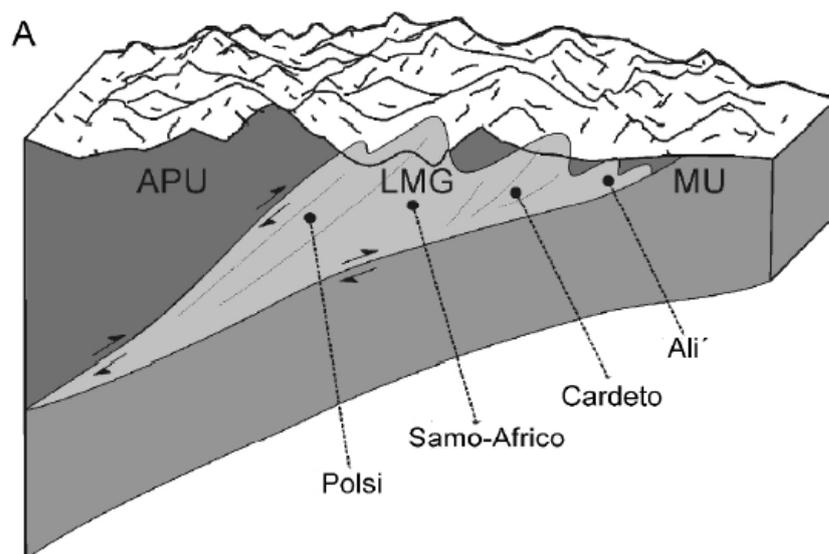


Figura 3 - Relazioni geometriche tra le principali falde che costituiscono l'assetto del Massiccio dell'Aspromonte e del segmento nord-orientale dei M. Peloritani. APU: Unità Aspromonte-Peloritani; LMG: Lower Metapelite Group, ovvero l'insieme delle Unità di Ali, Cardeto, Samo-Africo e Polsi; MU: Unità di Mandanici (da Pezzino et al., 2008).

Se nella porzione meridionale del CPCT, la subduzione è rivolta verso i domini di pertinenza europea, nel segmento settentrionale si assiste ad una inversione della stessa. Da recenti studi, Piluso et al. (2000) e Liberi et al. (2006), si evince che la litosfera oceanica subduce al di sotto del Complesso Calabride e del cuneo accrezionale Liguride, ovvero verso E, determinando una vergenza delle falde verso i domini europei.

Prendendo spunto dal lavoro di Alvarez & Shimabukuro (2009), si evince come dagli studi sin qui riportati si sviluppino diverse controversie interpretative che rimangono quindi ancora aperte. Infatti gli autori in tale lavoro, sulla base delle conoscenze geologiche accumulate negli anni comprendono che ancora non è possibile trarre alcuna conclusione definitiva sulla collocazione paleo-geodinamica relativa tra i blocchi Sardo-Corso e quello/i Calabro-Peloritani prima dell'apertura del bacino neogenico del Tirreno. Su tali basi, gli autori illustrano le possibili configurazioni dei margini di placca durante il Terziario medio-superiore nel caso in cui il CPCT sia costituito da uno o due "terrane" delimitati o da due o da un solo oceano.

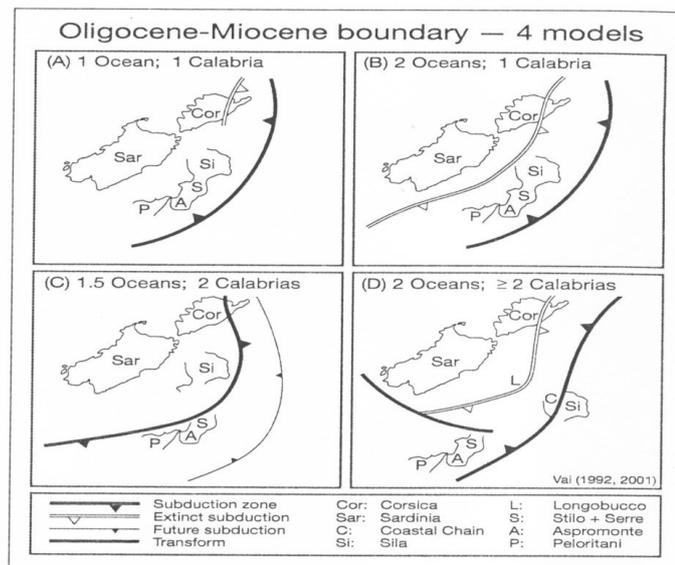


Figura 4 - Schema delle possibili configurazioni dei margini di placca durante il Terziario medio-superiore nelle ipotesi in cui la Calabria sia costituita da uno o due terreni, e limitata da uno o due oceani. In (C), "1,5 oceans" significa un unico oceano nella zona della Sila e due oceani nella zona Stilo-Serre-Aspromonte-Peloritani (da Alvarez & Shimabukuro, 2009).

Il modello che considera la regione Calabria limitata da un solo oceano e costituita da un solo "terrane" (A in Figura 4), implica la presenza di una discontinuità tra le rocce di AP/BT delle Alpi e quelle della Calabria, formate in differenti zone di subduzione con polarità opposta. Secondo questo modello, la Calabria e la Sardegna sarebbero state, a partire dall'Ercinico, un unico e continuo blocco di crosta continentale e la maggior parte delle deformazioni negli Appennini meridionali e nella Calabria sarebbero collegate all'evoluzione di un singolo cuneo accrezionale.

Inoltre per giustificare tale interpretazione geodinamica è necessario che l'intero blocco continentale della Sila si sovrapponga sulle rocce calabre di AP/BT prima che queste siano sollevate e riesumate.

Il modello geodinamico che prevede due oceani e un singolo *terrane* calabro (B in Figura 4) consente di delineare, prima dell'apertura del bacino Tirrenico, un belt continuo che congiunge le rocce di AP/BT calabre con quelle della Corsica alpina e con quelle delle Alpi. Ciò comporterebbe che Calabria e Sardegna siano venute a contatto probabilmente nel Terziario inferiore lungo una sutura marcata da rocce di AP/BT. Una situazione molto più complessa si presenterebbe se la Calabria fosse costituita dall'unione di due "subterrane". Un'ulteriore possibilità è illustrata nel modello C di Figura 4 in cui il subterraneo settentrionale (nCPT) avrebbe fatto parte della Sardegna, quindi di pertinenza Europea, dalla fine dell'Ercinico fino al Terziario medio quando si apre il Tirreno. Il subterraneo meridionale (sCPT), costituito dal Massiccio delle Serre, dell'Aspromonte e dei Peloritani, ha rappresentato un microcontinente che entra in collisione con la Sardegna e con il nCPT poco prima della formazione del Tirreno. Un ultimo modello (D in Figura 4) prevede che il CPCT sia formato da due subterrane separati (o possibilmente più di due), ma nessuno dei due collide con il margine Europeo prima che avvenga la sutura nel Terziario inferiore o medio (Vai, 1992, 2001).

Per quanto detto l'ipotesi più accreditata allo stato attuale delle conoscenze è quella relativa a ipotizzare un segmento orogenico attualmente fuso ma originariamente costituito da almeno due "terrane" caratterizzati da differenti evoluzioni tettono-metamorfiche, benché l'influenza delle fasi tettoniche alpino-appenniniche abbiano scomposto le strutture erciniche preesistenti obliterandone gli originali tratti strutturali.

1.2.1 - Il massiccio delle Serre

Il complesso scenario geologico-geodinamico precedentemente esposto vede Il Massiccio delle Serre e il Promontorio di Capo Vaticano collocabili quale snodo di collegamento tra il sCPT, costituito dal Massiccio dell'Aspromonte e dai Monti Peloritani, e il nCPT, costituito dal Massiccio della Sila e dalla Catena Costiera (Figura 5).

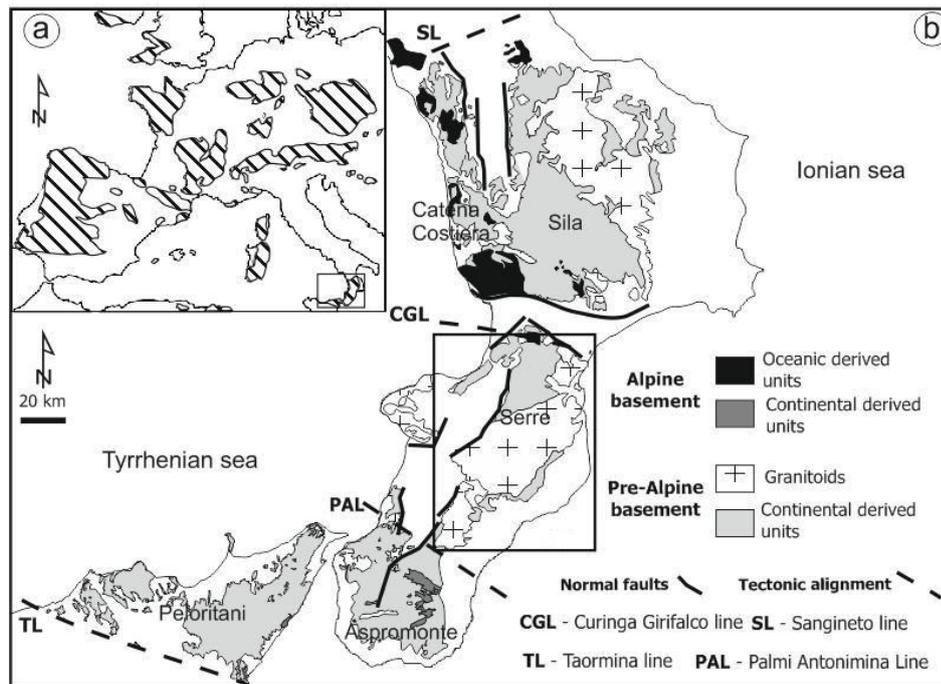


Figura 5 - Distribuzione dei basamenti pre-Alpini in Europa Occidentale. (b) Distribuzione dei basamenti Alpini e pre-Alpini nell'Orogene Calabro-Peloritano e principali allineamenti tettonici (Angi et al., 2010)

In accordo con Pezzino et al. (2008) e Angi et al. (2010) infine, il Massiccio delle Serre sarebbe separato dal Massiccio dell'Aspromonte lungo un'ipotetica linea passante per la shear zone milonitica trascorrente di Palmi (Prosser et al., 2003; Ortolano et al., 2013) e il complesso di faglie trascorrenti osservabili a sud di Anonimina (Figura 5). Tale allineamento ancora non del tutto definito, separerebbe i due domini anche sulla base della quasi certa assenza di sovrapposizione metamorfica alpina riscontrata sulle Serre a differenza del Massiccio dell'Aspromonte dove l'evoluzione Alpina ha giocato un ruolo centrale.

Ad oggi il Massiccio delle Serre può essere suddiviso in tre differenti complessi, che sono:

1. il basamento metamorfico basso crostale in facies granulitica e anfibolitica costituito da metagabbri, granuliti felsiche, metabasiti e migmatiti metapelitiche (Maccarrone et al., 1983; Schenk, 1984, 1989; Fornelli et al., 2002, 2004; Acquafredda et al., 2006, 2008);
2. il batolite tardo-Ercinico di crosta intermedia (Batolite delle Serre) costituito da tonaliti e granodioriti foliate e non foliate con minori quarzodioriti e gabbri, con termini più acidi e peralluminosi verso i livelli crostali più superficiali (Rottura et al. 1991; De Vivo et al., 1992; Del Moro et al., 1994; Fornelli et al., 1994). Nella zona più sud-occidentale, il Batolite delle Serre è intruso dai graniti fortemente peralluminosi di Cittanova (Atzori et al., 1977; Crisci et al., 1979; D'Amico et al., 1982; Rottura et al., 1990; Graessner et al., 2000);

3. la porzione di crosta da intermedia a superiore che affiora nella parte meridionale del Massiccio delle Serre. E' composta da successioni metasedimentarie con minori successioni metavulcaniche in facies da scisti verdi ad anfibolitica del Paleozoico (Colonna et al., 1973; Atzori et al., 1977; Bonardi et al., 1984; Acquafredda et al., 1987; Festa et al., 2003; Angi et al., 2010), localmente intruse da dicchi leucogranitici discordanti/concordanti formanti una rete complessa che si dirama dalla periferia dei corpi plutonici principali (Colonna et al., 1973; Borsi et al., 1976; Bonardi et al., 1984; Del Moro et al., 1994; Romano et al., 2011).

In precedenza alcuni autori hanno considerato il Massiccio delle Serre come il risultato della sovrapposizione di più unità tettoniche, ognuna delle quali con la propria storia tettono-metamorfica. Tali unità sarebbero entrate in contatto tra loro prima dell'intrusione dei corpi granitoidi tardo-ercinici (Colonna et al., 1973; Amodio Morelli et al., 1976; Borsi et al., 1976; Atzori et al., 1977; Gurrieri, 1980; Del Moro et al., 1986). Molti studi recenti considerano invece tale Massiccio come una sezione crostale ercinica quasi completa (Schenk, 1980, 1984; Bonardi et al., 1984; Schenk, 1989, 1990; Thompson, 1994; Caggianelli et al., 2000; Festa et al., 2003; Angi et al., 2010).

Inoltre Schenk (1980, 1989, 1990) fa riferimento ad un'evoluzione P-T caratterizzata da un metamorfismo tardo-ercinico in facies granulitica associato ad un insolito gradiente geotermico, sincrono rispetto alle fasi deformative. Questa prima fase fu poi seguita da un evento metamorfico statico collegato ad un esteso magmatismo granitoide, che si sviluppò a circa 300 Ma (datazioni ottenute con il metodo Rb-Sr su miche e U-Pb su zircone e monazite; Schenk, 1980; Fornelli et al., 1994; Graessner et al., 2000).

La seconda interpretazione, invece, riferisce le fasi finali del metamorfismo ercinico e l'intrusione dei magmi granitoidi ad un regime tettonico estensionale (Rottura et al., 1990; Acquafredda et al., 2006; Caggianelli et al., 2007; Angi et al., 2010). Secondo tale interpretazione la porzione basale della crosta inferiore è il risultato di più fasi di decompressione e disidratazione in condizioni di P-T elevate, passanti da valori di picco di 1100 MPa e 900°C a valori di 700-800 MPa e 650°-700°C per condizioni P-T retrograde (Acquafredda et al., 2008). Viceversa, i paragneiss migmatitici della porzione sommitale della crosta inferiore sarebbero stati coinvolti nell'evoluzione P-T prograde di media pressione in facies anfibolitica, con inspessimento crostale e riscaldamento, seguito da una fase di decompressione e da una fase anatettica, evoluta poi verso un metamorfismo isotermico e un raffreddamento isobarico associato ad una fase finale di esumazione (Acquafredda et al., 2006).

La sezione di crosta superiore affiorante nella parte meridionale delle Serre è caratterizzata dalla sovrapposizione di due complessi separati da un contatto tettonico a basso angolo. In particolare, abbiamo un complesso a più basso grado metamorfico (Complesso di Stilo-Pazzano) e uno a più alto grado metamorfico (Complesso di Mammola). Entrambi risultano interessati da un metamorfismo statico indotto dall'intrusione dei corpi granitoidi tardo-Ercinici (Rottura et al., 1990; Fornelli et al., 1994; Angi et al., 2010).

Le rocce metamorfiche presenti nell'area oggetto di studio appartengono ad un settore crostale di basamento metamorfico, ricoperto localmente da una sequenza sedimentaria Mesozoica non metamorfosata posta in discordanza basale.

Da un punto di vista strutturale, una superficie di detachment a basso angolo separa un hanging wall di basso grado metamorfico rappresentato dal Complesso di Stilo-Pazzano e un footwall di alto grado metamorfico rappresentato dal Complesso di Mammola, entrambi interessati da un overprint metamorfico indotto da intrusioni Tardo Erciniche (Rottura et al., 1990; Fornelli et al., 1994). In dettaglio, l'unità superiore di Stilo-Pazzano comprende metapeliti interessate da metamorfismo in facies greenschist, marmi, quarziti e livelli meta-vulcanici, cui si sovrappongono, in discontinuità, le successioni sedimentarie Mesozoiche (Festa et al., 2003). L'unità inferiore di Mammola comprende invece paragneiss in facies anfibolitica, gneiss leucocratici e anfiboliti. In accordo con Bonari et al. (1984), è possibile affermare che le due unità mostrano la medesima evoluzione tettono-metamorfica e risultano entrambe interessate dalle intrusioni Tardo Erciniche. In particolare, nell'evoluzione tettono-metamorfica dei complessi sopra indicati, è possibile individuare due eventi di metamorfismo a carattere regionale, il primo progrado seguito da un evento retrogrado, accompagnato da un overprint statico termico dovuto all'intrusione dei corpi granitici Tardo Ercinici.

Da indagini di tipo strutturale è possibile evincere che la tessitura milonitica, sviluppatasi in maniera pervasiva durante la fase retrograda, è responsabile del piano principale di foliazione; tuttavia, all'interno della stessa, è possibile riconoscere i relitti strutturali pertinenti ai precedenti eventi metamorfici.

In dettaglio, il più antico è responsabile della formazione di una pervasiva foliazione di piano assiale di pieghe isoclinaliche, con relitti di Qz ai nuclei. Essa si presenta spesso piano parallela sebbene, in alcuni affioramenti, un secondo evento deformativo sia responsabile del micropieggettamento da blandamente ondulato a molto fitto delle preesistente foliazione, che porta alla formazione di un clivaggio di crenulazione irregolare, lungo cui si riscontra una modesta blastesi (Angi et al., 2010). Dai relitti strutturali è possibile, inoltre, riconoscere una terza fase deformativa responsabile della formazione di superfici di tipo milonitico e una chiara stretching

lineation. Questo stesso evento coinvolge localmente dicchi leucogranitici, a sua volta tagliati da dicchi non deformati; ciò suggerisce che la fase finale della terza fase deformativa avviene in concomitanza alla attività magmatica tardo-Ercinica nell'area. Al termine della fase orogenica Ercinica, la deposizione di sedimenti di mare basso Giurassici testimonia un periodo di assenza di attività tettonica. Infine, la successiva evoluzione tettonica consiste in un piegamento asimmetrico con vergenza E-SE seguito da una fase di thrusting fragile. La successiva formazione di un sistema estensionale fragile di faglie con andamento NE-SW, accomodato da un sistema transtensionale NW-SE / N-S, facilita la fase finale di esumazione della catena (Angi et al., 2010). Un dettaglio a parte infine merita la descrizione dell'evoluzione tettono-magmatica del complesso plutonico delle Serre finalizzato a fornire un quadro generale allo stato attuale delle conoscenze relativo alle plutoniti di pertinenza del Massiccio delle Serre e del Promontorio di Capo Vaticano. Le rocce plutoniche del Massiccio delle Serre hanno intruso un basamento di rocce metamorfiche di grado da basso ad alto tagliando le principali strutture regionali (Schenk, 1980, 1984; Rottura et al., 1990). Esse ricoprono un'area di circa 1250 Km² e sono legati ad un'attività magmatica di età Carbonifero-Permiana (Figura 6). Dalle informazioni ottenute mediante datazione Rb-Sr sulle miche e U-Pb su zircone la loro età è di circa 300-290 Ma (Borsi et al., 1976; Schenk, 1980; Del Moro et al., 1982, 1986, 1994; Fornelli et al., 1994).

Le rocce del Massiccio delle Serre sono state attribuite a due differenti suite magmatiche (Rottura et al., 1990, 1991, 1993):

- Una suite calcalalina;
- Una suite peralluminosa.

In particolare, la suite calcalalina presenta un'associazione litologica che va da granodioriti a biotite alle tonaliti con biotite e orneblenda e alle quarzodioriti/gabbri con biotite-orneblenda (Rottura et al., 1990). Questi corpi granitoidi presentano un contenuto di SiO₂ compreso tra il 48 e il 70% e un carattere da metalluminoso a debolmente peralluminoso. Intrudono rocce metamorfiche di grado medio-alto nel settore settentrionale e da medio a basso grado nel settore meridionale del Massiccio.

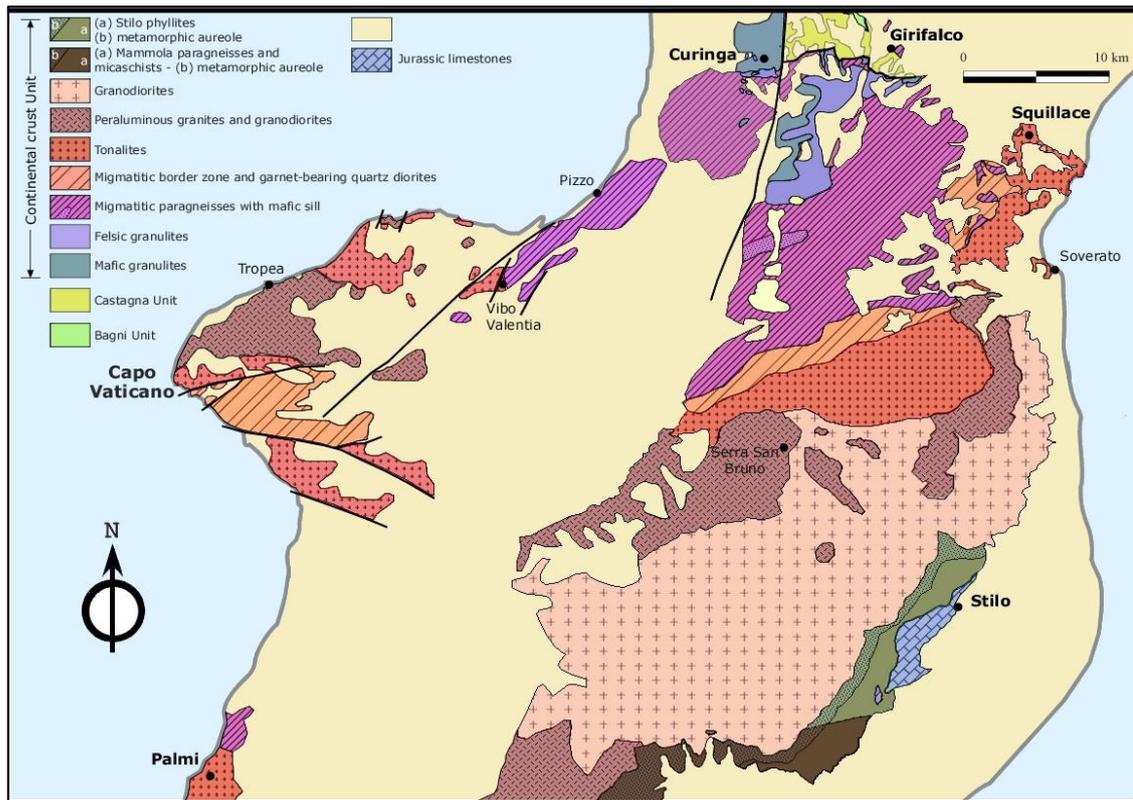


Figura 6 - Mappa geologica del Massiccio delle Serre e del Promontorio di Capo Vaticano (Caggianelli, 2013)

Una diffusa zona di bordo migmatitica segna il contatto primario ancora preservato tra le rocce granitoidi e le metapeliti in facies anfibolitica della crosta inferiore. Nella zona meridionale delle Serre l'interazione con il basamento è evidenziata dalla presenza di un'aureola di contatto in cui i minerali a cristallizzazione statica più comuni sono rappresentati da muscovite, biotite, andalusite, sillimanite, tormalina e localmente cordierite (Colonna et al., 1973; Atzori et al., 1977; Crisci et al., 1979b; Gurrieri et al., 1980; Rottura et al., 1986; Angi et al., 2010).

I granitoidi appartenenti alla suite peralluminosa hanno un contenuto di SiO₂ compreso tra il 67 e il 76% e affiorano all'interno dei corpi calcocalcinali mostrando delle precise caratteristiche mineralogiche e composizionali (Paglionico e Rottura, 1979; Crisci et al., 1980; Rottura et al., 1986). Queste rocce presentano una composizione più ristretta variando da granodioriti a monzograniti con grana mediofine, da non foliate a debolmente foliate. Nelle Serre centrali affiorano anche granodioriti e graniti a megacrystalli di K-feldspato (Del Moro et al., 1994).

I granitoidi appartenenti ad entrambe le suite vengono interpretati come tardo o post-tettonici, probabilmente messi in posto lungo zone di taglio duttili in regime estensionale (Rottura et al., 1990; Caggianelli et al., 2007).

Le tonaliti di Squillace-Petrizzi affiorano su un'area di circa 25 Km² e sono caratterizzate dalla presenza di una foliazione diffusa dovuta all'orientazione delle miche lungo direzioni preferenziali.

Possono essere suddivise in tonaliti biotitiche e in tonaliti biotitiche ad anfibolo (Caggianelli, 1988). Al loro interno si trovano delle rocce più basiche rappresentate da gabbri massivi, a grana medio grossa, e da quarzodioriti.

Le rocce plutoniche di quest'area sono descritte con maggiore dettaglio nel paragrafo dedicato alle mappature geochemiche.

Le granodioriti, tipicamente massive, costituiscono circa il 70% del Batolite delle Serre e affiorano nelle Serre centrali e meridionali. Le composizioni variano da granodioriti a biotite ± anfibolo (BAG) a carattere debolmente peralluminoso, fino a granodioriti a biotite ± muscovite (BMG) da debolmente a fortemente peralluminosi (Fornelli et al., 1994). In accordo con la classificazione petrologica di Barbarin (1990), le BAG e le BMG mostrano caratteristiche tipiche di granitoidi calcocalcinali alti in K, bassi Ca e con distinti caratteri ibridi crosta-mantello. Queste rocce presentano una struttura eterogranulare a causa della presenza di cristalli di biotite anche di grosse dimensioni.

Nelle BAG si ritrovano spesso delle *enclaves* magmatiche microgranulari con dimensioni che possono arrivare fino ad un massimo di 50 cm, la cui abbondanza tende a ridursi drasticamente nella transizione verso le BMG.

In entrambi sono diffusi xenoliti metamorfici (metapelitici e metabasici) e xenocristalli, spesso di piccole dimensioni e con morfologia lenticolare. E' da sottolineare, inoltre, che i BAG e le *enclaves* microgranulari hanno un'impronta leggermente più primitiva dei BMG (Fornelli et al., 1994).

Nel complesso, la genesi di questi corpi granitoidi è stata inquadrata in uno scenario di *underplating* di magmi di derivazione mantellica alla base della crosta dove hanno avuto origine processi di assimilazione e/o mixing (Ben Othman et al., 1984; Vielzeuf et al., 1990; Voshage et al., 1990; Caggianelli et al., 1991; Rottura et al., 1993; Ugidos and Recio, 1993). In particolare, le caratteristiche ibride di BAG e BMG potrebbero essere attribuite a due differenti episodi di contaminazione. Un primo profondo episodio potrebbe essere responsabile della natura ibrida del magma parentale: infatti, le masse di assimilazione crostale sembrano compatibili con processi di tipo MASH e/o AFC (*Assimilation with Fractional Crystallization*) nei livelli più profondi della Crosta Continentale (Hildreth e Moorbarth, 1988; Voshage et al., 1990; Macera et al., 1994). Un secondo episodio di contaminazione crostale potrebbe essersi verificato durante la risalita del magma ibrido (BAG) vicino al livello di messa in posto.

Successivamente, processi di MFC (*Mixing Fractional Crystallization*), caratterizzati da bassi valori del rapporto mixing/frazionamento, avrebbero permesso l'evoluzione da BAG a BMG. In entrambe le tipologie di granitoidi le età Rb-Sr della biotite e della mica bianca variano da 289 ± 4 a 266 ± 3 Ma.

I granitoidi a megacristalli di K-feldspato affiorano nelle Serre centro-orientali lungo una banda discontinua con andamento NE-SW che va complessivamente da Satriano a Soriano Calabro (Hieke Merlin et al., 1973; Moresi e Paglionico, 1975; Fornelli, 1991; Del Moro et al., 1994). Affiorano tra le tonaliti e le granodioriti a biotite e muscovite e mostrano strutture porfiriche per la presenza di megacristalli, talora isorientati, di K-feldspato di dimensioni comprese tra 0,5 e 10 cm. Il range composizionale va da granodioriti a monzograniti. Queste rocce presentano come fasi principali quarzo, plagioclasio eudrale, microclino, biotite, muscovite e, come fasi accessorie, apatite, monazite e ilmenite. Il K-feldspato è originariamente cristallizzato sottoforma di ortoclasio e successivamente trasformato in microclino (Fornelli, 1991).

Sono inoltre presenti rare *enclaves* microgranulari concentrate maggiormente nelle zone periferiche del corpo magmatico.

L'età Rb-Sr della muscovite è di 287 ± 4 Ma (Del Moro et al., 1994). Nei diagrammi di Harker mostrano un incremento di Rb e K_2O e un decremento di CaO, MgO, TiO_2 , FeO, P_2O_5 , V, Zr, Sr e Ba all'aumentare del contenuto di SiO_2 . Sulla base dei dati geochimici ed isotopici, Del Moro et al. (1994) hanno suggerito un coinvolgimento di dominante materiale crostale nella genesi di questi granitoidi. Il carattere crostale potrebbe essere stato assunto per effetto della contaminazione in crosta profonda del magma genitore o per diretta derivazione da rocce cristalline a composizione isotopica eterogenea.

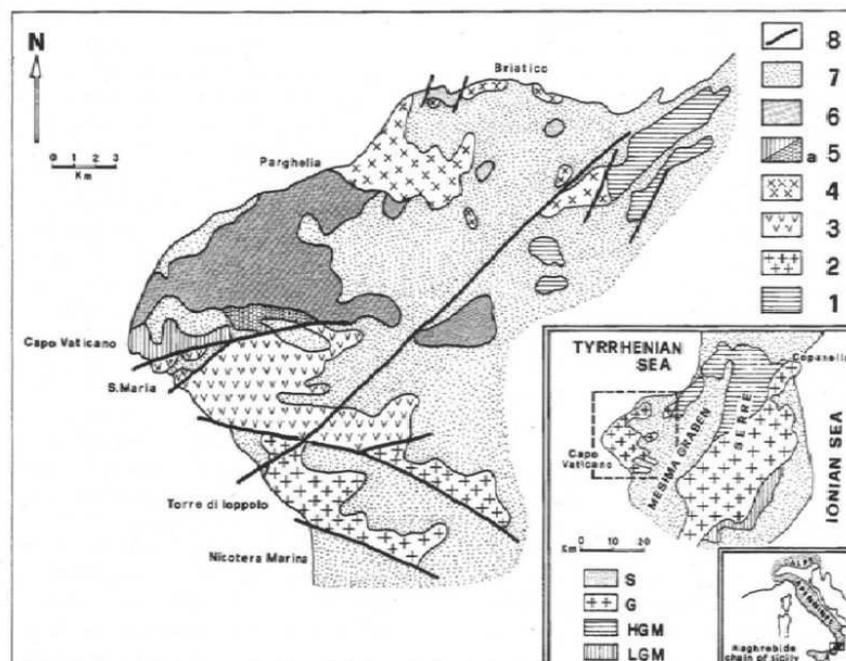


Figura 7 - Mappa geotettonica dell'area di Capo Vaticano (Rottura et al., 1991). Legenda: 1 = Gneiss kinzigitici; 2 = Tonaliti di Ioppolo. 3 = Quarzodioriti e tonaliti di S. Maria. 4 = Tonaliti di Briatico. 5 = Tonaliti e granodioriti. 6 = Granodioriti porfiriche a due miche. 7 = Depositi superiori del Miocene-Quaternario. 8 = Faglia. S = Sedimenti. G = Granodioriti. LGM = Metamorfiti di basso grado. HGM = Metamorfiti di alto grado.

I granitoidi del Promontorio di Capo Vaticano (Figura 7) affiorano in maniera discontinua tra i depositi del Miocene superiore-Quaternario su un'area di circa 270 Km². Sono costituiti per il 65% da granodioriti porfiriche a due miche e Al silicati (SiO₂ compresa tra il 70,5 e il 73,5%) e per il restante 35% da tonaliti biotitiche (SiO₂ compresa tra il 57,6 e il 67,3%; Rottura et al., 1991).

Le tonaliti si presentano fortemente foliate nella parte settentrionale e meridionale del promontorio e si possono distinguere in tonaliti di Briatico, Santa Maria e Ioppolo (Rottura et al., 1986, 1990). Le tonaliti debolmente foliate di Capo Vaticano, sono intruse dalle granodioriti e costituiscono, assieme ad esse, il nucleo del promontorio (Clarke et al., 1990). La sovraimpronta alpino-appenninica ha generato delle bande milonitiche discordanti nelle rocce foliate ma ha anche prodotto un esteso ringiovanimento dell'età media dei minerali (età K-Ar e Rb-Sr delle miche compresa tra 267 e 128 Ma; Civetta et al., 1973; Del Moro et al., 1986; Laurenzi et al., 1986; Rottura et al., 1991).

Le granodioriti presentano *enclaves* metasedimentarie e xenoliti delle rocce incassanti mentre le tonaliti contengono *enclaves* microgranulari con composizione da quarzodioritica a tonalitica.

Nei diagrammi AFM e Na₂O-K₂O-CaO questi granitoidi seguono dei trend calco alcalini (Rottura et al., 1991). Per quello che riguarda la genesi dei litotipi presenti, probabilmente le granodioriti hanno avuto origine da un processo di *mixing* tra un magma generato per anatessi crostale e uno a composizione intermedia prodotto da un processo di cristallizzazione frazionata o AFC da un magma parentale. Si pensa invece che le tonaliti derivino dall'interazione tra un magma mafico (mantellico) e dei termini estremi cristallini con impronte isotopiche e geochemiche simili a quelle delle granodioriti (Rottura et al., 1990).

Nell'area del Promontorio di Capo Vaticano sono presenti anche dicchi aplitici e pegmatitici che tagliano gran parte dei corpi granitoidi.

In tale contesto geologico-geodinamico si localizza l'area test su cui si sono basate le sperimentazioni delle tecniche geomantiche sviluppate durante la presente attività di ricerca. Nel capitolo seguente sarà affrontata la problematica relativa alla strutturazione di un geodatabase su base interoperabile strutturato secondo le più recenti norme internazionali con lo scopo di fornire all'utente finale (petrologo, geologo od altro) una piattaforma dati in grado di fornire interrogazioni complesse, nonché di fornire la base dati su cui poter sperimentare le tecniche geostatistiche in parte già note ed in parte implementate per la prima volta nel presente lavoro.

2 - L'INTEROPERABILITA' DEI DATI GEOSPAZIALI

“Interoperabilità” in linguaggio informatico indica l’operare senza alcuna barriera nella piena condivisione delle risorse dati, ovvero realizzare ampi canali per lo scambio di informazioni o servizi con altri sistemi o prodotti limitando il più possibile gli errori, favorendo un alto tenore di affidabilità. Il termine “interoperabilità” è stato utilizzato sempre in ambito tecnologico per indicare un elevato grado di sinergia di sistemi diversi col fine di offrire servizi o funzionalità nuove. È direttamente legato alla ormai consolidata tendenza di far convergere su alcune tecnologie evolute una vasta gamma di servizi. Obiettivo dell'interoperabilità è dunque facilitare l'interazione fra sistemi differenti, nonché lo scambio e il riutilizzo delle informazioni anche fra sistemi informativi non omogenei (sia per software che per hardware).

2.1 – ONTOLOGIE E WEB SEMANTICO

Questa nuova tendenza affonda le radici già a partire dal 2001 quando Tim Berners-Lee, l’uomo che inventò il World Wide Web, teorizzava la creazione di un “Semantic Web”, riferendosi alla possibilità di creare una rete di metadati che consentisse l’utilizzo di Internet e le tecnologie del web come strumento per la comunicazione, non solo fra un utente umano e agenti automatici, ma anche fra entità software. A tale scopo, è necessario che il contenuto dell'informazione esposta sul web sia comprensibile, in modo non ambiguo, dai vari programmi che operano sulla rete, esprimendone la semantica mediante opportuni formalismi, non potendo esse contare sulle capacità interpretative dell'utente umano. In tal modo l'informazione viene resa interoperabile in modo efficiente ed automatico.

A più di dieci anni dalla sua concezione, il web semantico e le sue tecnologie sono diventate uno strumento essenziale per la gestione di sistemi informativi in cui la “conoscenza” gioca un ruolo dominante. Questo progetto investe in generale qualsiasi entità che debba pubblicare o ritrovare informazioni sul web, anche di tipo geografico e scientifico. Come tale, esso richiede innanzitutto la possibilità di descrivere i dati secondo qualche formato standard, in modo da facilitare l'interoperabilità fra le diverse applicazioni. Questa possibilità è offerta basando lo scambio di dati sul formato dei file XML, così da semplificarne l'analisi, mentre i linguaggi specializzati derivati da XML, come il GML¹ possono essere utilizzati nei diversi campi applicativi, anche geologico scientifico. Questi linguaggi permettono a gruppi di utenti e organizzazioni diverse di condividere l'informazione disponibile sul web, anche utilizzando software differenti. Gli aspetti semantici di un documento sono associati a metadati, cioè dati integrati nel documento ma che rappresentano una descrizione del suo contenuto. Adottando degli standard per la scrittura di questi metadati,

¹ Per approfondimenti sul linguaggio GML si rimanda al sito <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>

software di diverso genere possono far uso dei dati disponibili su web semplicemente attraverso l'interrogazione di un documento relativo ad un database e quindi interpretarli in base alle loro esigenze. Resta però il problema di identificare univocamente il significato dei dati scambiati. Per questo è stato creato RDF (Resource Description Framework), un linguaggio basato su XML che permette di associare termini linguistici a risorse disponibili su web. Per la natura puramente proposizionale di RDF, per dedurre nuove proprietà dalle sue descrizioni, è necessario adottare particolari logiche formali per stabilire relazioni fra concetti, ovvero introdurre estensioni di RDF che qualificano gli statements (asserzioni) con modificatori quali ad esempio "DEVE, POTREBBE, DOVREBBE, PUÒ, etc".

Se alla mera definizione dei termini si accostano anche degli strumenti logici si realizzano delle ontologie, ossia delle reti di relazioni fra i concetti, le quali consentono ulteriori forme di ragionamento sui concetti stessi.

In genere le ontologie sono basate sulle relazioni di generalizzazione/specializzazione, di composizione, di associazione ed aggregazione. Un sistema di ricerca elettronico è in grado quindi di ritrovare informazioni di interesse sulla base di parole chiave, magari differenti per lingua, cultura o altro, ma facendo riferimento a concetti descritti in ontologie rese pubbliche sulla rete nella stessa lingua e che corrispondono a termini diversi in altre lingue. E' pur vero che non di rado ci si può imbattere in casi di eteronomia in cui il medesimo termine possa assumere significati diversi in contesti differenti. Grazie all'intelligenza artificiale esistono tecniche utili alla risoluzione delle ambiguità, cosiddette "context sensitive", le quali si basano sull'esame del contesto in cui il termine viene usato. Un'ontologia fornisce le definizioni dei termini usati per descrivere e rappresentare un'area di conoscenza. Riferendosi alle risorse disponibili sul web, l'attore di ricerca può individuare in modo univoco il senso in cui un termine va inteso e la rete di rapporti cui esso è associato. Uno strumento utile a definire ontologie, che creano vocabolari per uno specifico dominio o argomento, è ad esempio il linguaggio OWL (Web Ontology Language). Con questo linguaggio è possibile condurre inferenze sulle relazioni esistenti tra i vari concetti oppure sulle loro proprietà quali ad esempio la simmetria, la generalizzazione, le univocità concettuali, etc. Le stesse regole di inferenza possono essere pubblicate e scambiate sulla rete attraverso appositi linguaggi di markup tipo RuleML, affiancati da altri strumenti che ne permettono un utilizzo efficiente, o altri tipi di operazioni interessate al contenuto informatico e documentale sul web, ad esempio quei protocolli che consentono la realizzazione di architetture web service, come il SOAP (Simple Object Access Protocol). Anch'essi esigono che i servizi e le informazioni a esse connesse siano esposti su web e descrivibili in modo non ambiguo, grazie

all'uso di linguaggi come WSDL (Web Services Description Language) o RDF-Schema, nati per soddisfare questa esigenza.

Per la definizione delle ontologie nel campo geoscientifico si fa riferimento a SKOS (Simple Knowledge Organisation System), una famiglia di linguaggi formali, modulari, estensibili facili da utilizzare ed implementare, creata per rappresentare glossari, classificazioni, tassonomie e qualsiasi tipo di vocabolario strutturato. Si basa su RDF e RDFS (RDF Schema) e il suo obiettivo principale è di consentire una pubblicazione semplice e speditiva di vocabolari strutturati per il Semantic Web.

Appare più chiaro quindi come per conseguire l'obiettivo dell'interoperabilità dei dati si sia reso necessario un coordinamento a livello internazionale potenzialmente conseguibile attraverso l'istituzione di nuove organizzazioni sovranazionali, ovvero delegando la stessa mission ad organi internazionali preesistenti (vedi la IUGS in campo geoscientifico). Tutto ciò con l'obiettivo precipuo di sviluppare un linguaggio comune, stilando dei protocolli di intesa ciascuno dedicato ad ambiti disciplinari differenti ma uniti da un unico comune denominatore che, nel caso del trattamento dei dati geoscientifici trattati nella presente tesi, può configurarsi con il concetto di: "la geospazialità"; intesa quest'ultima come l'attribuzione di una precisa posizione in seno al pianeta Terra e la sua relazione geometrica a qualsivoglia entità materiale o astratta.

In tale contesto si inserisce il lavoro di Open Geospatial Consortium (OGC, in precedenza OpenGIS Consortium), un'organizzazione internazionale no-profit, basata sul consenso volontario, che si occupa di definire specifiche tecniche per i servizi geospaziali e di localizzazione (location based). OGC è formato da oltre 280 membri (governi, industria privata, università) con l'obiettivo di sviluppare ed implementare standard per il contenuto, i servizi e l'interscambio di dati geografici implementati su piattaforme GIS che siano "aperti ed estensibili". Le specifiche definite da OGC sono pubbliche (PAS) e disponibili gratuitamente.

Ci sono oltre 30 standard gestiti da OGC, tra i quali:

- WMS - Web Map Service
- WFS - Web Feature Service
- WCS - Web Coverage Service
- GML - Geography Markup Language
- CAT - Catalog Service
- CT - Coordinate Transformation
- SFS - Simple Features - SQL
- CSW - Catalog Service for the Web
- KML - Keyhole Markup Language (standars Google Earth)

- OWS - OGC Web Service Common
- SOS - Sensor Observation Service
- SPS - Sensor Planning Service
- SensorML - Sensor Model Language
- SLD - Styled Layer Descriptor
- WCPS - Web Coverage Processing Service
- WMTS - Web Map Tile Service
- WPS - Web Processing Service
- GeoSPARQL - Geographic SPARQL Protocol and RDF Query Language

OGC ha una relazione stretta con ISO/TC211 (Geographic Information/Geomatics), comitato tecnico che dal 1994 si occupa di standard per le informazioni geografiche e la geomatica.

Facendo riferimento agli standard sopracitati, appare più chiaro, adesso, l'intento della CGI, commissione della IUGS che si occupa dell'interoperabilità dei dati geologici, nel programma CGI Geoscience Concept Definitions Task Group (CDTG) , ovvero la definizione di una geosemantica e di geontologie cui fare riferimento per le applicazioni software interoperabili. Il lavoro svolto dalla CGI sin dal 2003 ha ad oggi portato, tra le altre cose, alla strutturazione di uno schema UML che ingloba ormai quasi del tutto le relazioni esistenti tra le diverse branche delle scienze geologiche attraverso lo sviluppo di un nuovo mark up language definito come GeoSciML (Geoscientific Mark Up Language). Un esempio di quanto esposto è visibile via web all'indirizzo Internet: <http://resource.geosciml.org/vocabulary/>.

2.1.1 - Geoscientific Mark Up Language - GeoSciML

Nel settore delle scienze geologiche, l'interoperabilità ha oggi raggiunto un'evoluzione tecnologica e concettuale tale da potersi sperimentare con ampi margini di successo, nelle metodologie di studio e di analisi, rendendo possibili operazioni di ricerca e di correlazione tra entità (i.e. enti di ricerca; amministrazioni governative etc...) distanti sul piano sia geografico che semantico.

La diversa natura dei dati geospaziali e la scarsità di norme standardizzate pone in essere una grande sfida per l'integrazione dei repertori di dati geospaziali distribuiti. Fino a poco tempo fa nella maggior parte dei GIS commerciali o freeware non erano contemplate le funzionalità di collaborazione, per cui era usuale riscontrare serie problematiche nel tentativo di relazionare dati spaziali provenienti da differenti fonti. Allo stato attuale la maggior parte dei software rivolti alla gestione informatica del territorio implementano invece protocolli di connessione ai sistemi

distribuiti, tipo web-gis, per il caricamento dei layer grafici in formato raster (WMS) o vettoriale (WFS).

Tuttavia, perché si possano manipolare i dati remoti non è sufficiente garantire la presenza di protocolli informatici all'interno del GIS e fornire un facile accesso al database remoto, bensì è opportuno interagire con il database per via di query, più o meno complesse, al fine di ottenere un risultato specifico, filtrato secondo le peculiari esigenze dell'utente finale in maniera il più possibile chiara ed accessibile. E' pur vero che interrogare un database remoto di cui non si conoscano l'assetto e la struttura dati non è un'operazione ammissibile a meno di disporre di un interstrato per la condivisione di elementi, semantici, sintattici e lessicali finalizzata ad un dialogo tra sistemi remoti. Per tale ragione è nata l'esigenza di codificare e strutturare ogni elemento informativo attinente al dominio delle geoscienze, così da operare mediante un linguaggio che unifichi concetti ancora oggi dispersi tra molteplici espressioni ed interpretazioni.

GeoSciML nasce quindi dalla cooperazione di esperti nei diversi campi delle geoscienze riconosciuti a livello internazionale che, insieme, perseguono i medesimi fini, ovvero quello di:

- stimolare la diffusione a livello internazionale di modalità avanzate per il trattamento di informazioni riguardanti le geoscienze;
- stimolare e sostenere le iniziative che stanno sviluppando standard per l'interscambio dei dati geologici;
- rappresentare la IUGS (International Union of Geological Sciences) quale punto di riferimento globale per quanto attiene la materia dell'informazione e del trattamento dei dati geologici.

Già nel mondo esistono progetti di rilevante importanza che stanno sfruttando GeoSciML per le applicazioni più specifiche, comprese ad esempio quelle relative al monitoraggio e gestione delle risorse idriche. Il progetto australiano "Auscope", pioniere nello sviluppo e nell'utilizzo sperimentale di GeoSciML, è un esempio eloquente per comprendere il concetto di "interoperabilità" dei dati geologici, coinvolgendo la ricerca scientifica e le attività produttive industriali geominerarie in un sistema organizzato di Geoscientific Knowledge Management (ad es. Laxton et al., 2010). "Auscope" costituisce il primo reale progetto a grande scala ove ciascuna peculiarità nell'ambito delle scienze geologiche viene univocamente rappresentata ed armonicamente connessa alle altre, grazie ad una infrastruttura logica che accoglie, ordina, classifica ed espone le informazioni rendendole "interoperabili".

Il primo WebGis planetario che trae spunto da GeoSciML per l'assetto e l'esposizione dei dati ed il rispetto dell'univocità dei tematismi è "OneGeology", visibile sul portale

<http://portal.onegeology.org/>. Il progetto si propone l'esposizione a larga scala delle mappe geologiche di base dell'intero pianeta.

Alla stessa stregua procede il progetto OneGeology Europe, visibile al link <http://geoportale.onegeology-europe.org/geoportale/viewer.jsp>, il cui portale offre agli utenti un WebGis ben allestito che implementa servizi interoperabili su database distribuito interrogabile selettivamente mediante protocolli di interoperabilità di tipo WMS e WFS.

In Italia il portale ISPRA Ambiente, anch'esso sviluppato con tecnologia WebGis, pubblica già da qualche anno le mappe geologiche e geocronologiche del territorio nazionale esponendo un servizio di interoperabilità basato su GeoSciML. Risulta quindi evidente che l'implementazione di un'architettura software interoperabile e distribuita che connette i servizi geologici di ciascun paese, ha come scopo fondamentale quello di poter generare una mappatura estesa a scala europea. Essa espone i dati cartografici e tematici allocati presso ciascun servizio geologico nazionale evitando la ridondanza e per di più garantisce l'aggiornamento tematico ogni qualvolta vengano apportate modifiche.

Si evidenzia, quindi, la ormai scarsa praticità delle mappature statiche, quali quelle cartacee, che divengono spesso celermente obsolete per via dell'instaurarsi della necessità di frequenti aggiornamenti a causa di nuovi studi sul territorio che aggiungono o modificano informazioni utili. Come dicevamo, il valore aggiunto di un sistema informativo territoriale distribuito che implementa protocolli di interoperabilità di dati geospaziali sta nella capacità di trasferire da remoto interi dataset attraverso i protocolli WFS, ovvero presentare agli utenti, non solo mappe tematiche corredate di legenda ma tutto ciò che descrive in modo qualitativo e quantitativo il sito di interesse. GeoSciML consente di standardizzare uno strato di interconnessione affinché ciascun database possa essere esposto agli utenti finali secondo un paradigma di riferimento universalmente accettato. Ciò significa che, a meno di possedere già strutture dati totalmente incoerenti col modello in oggetto, ciascun ente può creare delle viste articolate secondo i canoni GeoSciML ed esporre tali dati con tecnologie "web service" lasciando inalterata la struttura dati preesistente. Tale creazione è tanto più semplice o laboriosa quanto più è distante la realtà di fatto dal modello concettuale scaturito su base GeoSciML.

Durante la fase di start up della presente attività di ricerca, scopo basilare del lavoro è stato quello di verificare le modalità di armonizzazione dei dati geologici a livello nazionale. In tale ottica si era creduto inizialmente di essere dei pionieri o quasi nello studio delle strutture dati inerenti i processi di analisi delle rocce, poiché la versione GeoSciML 2.1 non prevedeva ancora in considerazione la necessaria armonizzazione dei dati petrologici s.l. con il resto delle geoscienze. Con la versione 3.0 e poi 3.1 sono state invece integrate le vecchie classi con alcune nuove tra le

quali: **Laboratory Analysis and Geologic Specimen**, specificatamente incentrate sulle modalità di caratterizzazione geochimica *s.l.* di campioni di cosiddetti materiali terrestri (i.e. Earth Material) di cui le rocce sono ovviamente i principali costituenti. Ambedue sono state ben articolate per supportare una progettazione di un database geochimico, specie per quanto attiene ai metadati sulle analisi di laboratorio. Per una descrizione particolareggiata si rimanda al capitolo specifico sulle applicazioni di GeoSciML ai campioni provenienti dall'area pilota.

In questa ottica, se l'obiettivo preposto è quello di governare i processi di archiviazione delle informazioni analitiche per renderli compatibili a modelli internazionalmente standardizzati e quindi facilmente fruibili sulla rete telematica, è obbligatorio guardare verso gli standard di interoperabilità proposti dalla OGC ed invocati dallo stesso GeoSciML.

Il primo di tali standard prende il nome di **SWE (Sensor Web Enablement) Common Data Model**, il cui obiettivo principale è quello di definire e confezionare, a più basso livello, i dati relativi agli output dei sensori, siano anch'essi strumenti di analisi, in modo tale da essere autoreferenziali e semanticamente validi. In altri termini nasce allo scopo di garantire l'interoperabilità, in primo luogo, a livello sintattico, poi a livello semantico (utilizzando ontologie e probabilmente mediazioni semantiche) in modo che i dati del sensore possano essere meglio compresi da macchine, elaborati automaticamente in flussi di lavoro complessi e facilmente condivisi tra nodi di sensori intelligenti connessi via web. SWE Common Data Language non è altro che una implementazione XML di questo modello ed è utilizzato da altre norme esistenti, come Sensor Model Language (SensorML), Sensor Observation Service (SOS), Sensor Alert Service (SAS) ed Sensor Planning Service (OGC[®] SPS).

Per quanto concerne il disegno del database, il modello non include un vero e proprio schema di database per le analisi delle rocce, ma si interfaccia ad uno schema interoperabile implementato sempre dall'organizzazione OGC (Open Geospatial Consortium) nella sezione O&M (Observation and Measurements). Ciò significa che, nell'ottica dell'interoperabilità, tutto quanto riguarda il concetto di "osservazione" e "misurazione" in campo scientifico rimane competenza di altre discipline ed organizzazioni che hanno l'esclusivo compito di standardizzare tecniche, metodi e formati di restituzione dei dati. O&M è l'implementazione in XML di un modello concettuale per le osservazioni e le misure (OGC -O&M - v2.0 anche pubblicati come ISO / DIS 19156), ed include uno schema il quale descrive i caratteri del campionamento o Sampling Features. Questa codifica è una dipendenza essenziale per l'interfaccia standard dell'OGC Sensor Observation Service (SOS). Infatti è necessario armonizzare una struttura dati così da garantire la migliore compatibilità con gli output strumentali dei sensori o strumenti analizzatori dei nostri campioni. Più specificamente, un simile standard definisce schemi XML che includono tutti quegli elementi concettuali e metrici

utili alla raccolta dati circa le osservazioni e le misure effettuate nell'ambito di un campionamento. Tali schemi forniscono modelli di documenti per lo scambio di informazioni che descrivono le azioni dell'"osservare" ed il loro risultato, sia all'interno che tra le diverse comunità scientifiche e tecniche. Talvolta alla fase di osservazione si relega un'importanza inferiore rispetto a quella successiva del campionamento. La norma internazionale ISO/DIS 19156 definisce un insieme comune di "tipi di features" di campionamento classificati principalmente a partire dalla dimensione topologica, così come per i campioni per le osservazioni ex-situ. Lo schema include le relazioni tra le features del campionamento (sub-campioni, campioni derivati).

Le osservazioni e le misure standard (O&M) si riferiscono comunque allo SWE Common Data Model, anche se il modello di osservazione definito nelle specifiche O&M è disaccoppiato da questo standard. Quindi, uno degli obiettivi fondamentali dello SWE Common Data Model è così quello di mantenere la funzionalità necessarie per tutti questi standard correlati.

In parallelo ai lavori della CGI per quanto attiene il dominio dei dati geologici si sta sviluppando una sovrastruttura europea per la condivisione dei dati territoriali nota come progetto INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community – vedi <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm>) basato sull'entrata in vigore di una direttiva UE del maggio 2007, che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale in Europa a sostegno delle politiche ambientali comunitarie e delle politiche o delle attività che possono avere ripercussioni sull'ambiente. Tale infrastruttura per quanto concerne l'aspetto l'interoperabilità dei dati geoscientifici fa riferimento allo GeoSciML.

2.1.2 - Infrastructure for Spatial Information in the European Community - INSPIRE

INSPIRE si basa sulle infrastrutture per l'informazione territoriale create e gestite dai 27 Stati membri dell'Unione Europea. La direttiva affronta 34 temi di dati territoriali necessari per applicazioni ambientali, con componenti chiave specificati attraverso norme tecniche di attuazione. Questo rende INSPIRE un esempio unico di un approccio legislativo "regionale".

Sul piano legislativo la Direttiva 2007/2/CE del Parlamento e del Consiglio europeo, del 14 marzo 2007, istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (INSPIRE), pubblicata nella Gazzetta Ufficiale del 25 aprile 2007. La direttiva INSPIRE è entrata in vigore il 15 maggio, 2007 per garantire che le infrastrutture di dati spaziali degli Stati membri siano compatibili e utilizzabili in un contesto comunitario e transfrontaliero. La direttiva prevede che il regolamento di esecuzione comune (IR) sia adottato in una serie di settori specifici (metadati, dati, caratteristiche tecniche, servizi di rete e il servizio di condivisione e di monitoraggio e reporting), dietro specifici protocolli emanati da regolamenti decisi dalla Commissione e vincolanti

nella loro interezza. La Commissione è assistita nel processo di adozione di tali norme da parte di un comitato di regolamentazione composto dei rappresentanti degli Stati membri e presieduto da un rappresentante della Commissione.

La direttiva INSPIRE sarà attuata in diverse fasi, con la piena attuazione richiesta entro il 2019 anche quale strumento propedeutico ed integrato agli obiettivi posti dal progetto HORIZON 2020. Essa mira a creare una infrastruttura di dati spaziali europea (UE). Ciò consentirà la condivisione delle informazioni territoriali ambientali tra le organizzazioni del settore pubblico per meglio facilitare l'accesso del pubblico alle informazioni territoriali in tutta Europa.

Una vera e propria Spatial Data Infrastructure europea che contribuirà al processo decisionale attraversando i confini geopolitici. Pertanto le informazioni spaziali considerate ai sensi della direttiva, ha come scopo quello di ampliare e comprende una grande varietà di temi basati su una serie di principi comuni quali:

- I dati dovrebbero essere raccolti solo una volta e tenuti ove la manutenzione può essere svolta più efficientemente;
- Le informazioni territoriali dovrebbero potersi combinare senza soluzione di continuità a maggior ragione quando provenienti da fonti diverse in tutta Europa al fine di poterle condividerle con una moltitudine di utenti e di applicazioni informatiche;
- Le informazioni raccolte ad una determinata scala dovrebbero potersi condividere a tutte le scale; permettendo così di ottenere dati dettagliati per indagini più accurate , a puri fini strategici;
- Le informazioni geografiche necessarie ad una buona governance a tutti i livelli devono essere rese disponibili prontamente e in modo trasparente.

Risulta quindi evidente come le norme INSPIRE a livello europeo conglobino all'interno di una scala di sistema tutti i dati territoriali di tipo sensibile, compresi ovviamente anche se in parte, quelli geoscientifici per i quali recentemente si fa esplicito riferimento allo standard GeoSciML.

Ritornando all'Italia è ormai da anni ben nota l'esistenza, per quanto concerne la strutturazione ufficiale dei dati geologico-cartografici, del progetto CARG (CARTografia Geologica) il quale prevede la realizzazione dei 652 fogli geologici e geotematici alla scala 1:50.000 per la copertura dell'intero territorio nazionale.

Al progetto collaborano più di 60 strutture fra Enti territoriali, organi del CNR, Dipartimenti ed Istituti Universitari, oltre a tutte le Regioni e le Province Autonome che assicurano, con il loro concorso finanziario, ulteriori risorse necessarie alla produzione dei fogli geologici.

Il progetto prevede la realizzazione di una banca dati dalla quale poter ricavare carte geologiche e geotematiche di maggiore dettaglio per l'utilizzo del dato cartografato in molteplici applicazioni.

Saranno così disponibili gli strumenti conoscitivi, quali i dati geologici, indispensabili per una corretta pianificazione e gestione del territorio e, più in particolare, per la prevenzione, la riduzione e la mitigazione del rischio idrogeologico.

Da quanto detto traspare quanto la ricerca della standardizzazione di banche dati geologiche sia stato un tema ricorrente negli ultimi 30 anni e quanto sia complessa l'organizzazione e l'omogenizzazione tematica e del linguaggio man mano che si valicano i confini geografici, in primo luogo nazionali, poi europei e quindi internazionali. Ma l'evolversi delle scienze e delle metodologie del trattamento dell'informazione incentivano sempre più la ricerca di piattaforme comuni che, favoriscano larghe intese tra scienze diverse, paesi diversi, sistemi e tecnologie diversi.

Ad oggi quindi si tende da parte dei vari organi preposti a livello nazionale per la gestione ufficiale dei dati territoriali a modificare, fin dove possibile, le strutture dati storicamente già implementate ad esempio dai diversi servizi geologici, inserendo la possibilità di ricorrere a standard quali il già citato CSW (Catalog Service for the Web).

2.1.3 - Catalog Service for the Web – CSW

Il CSW è uno standard dell'OGC che definisce un'interfaccia per servizi di ricerca, di navigazione, di interrogazione di metadati su dati che si riferisce alla pubblicazione su Internet di informazioni su applicazioni spaziali, di geo-servizi e di dati spaziali (metadati) in un'infrastruttura di dati territoriali.

Il servizio include solo i metadati, cioè l'informazione puramente descrittiva dei dati, non i dati stessi. I metadati vengono gestiti secondo le norme ISO 19115 (per applicazioni spaziali e dati geo-spaziali) e ISO 19119 (per geo-servizi).

Il CSW ha acquisito particolare importanza della direttiva comunitaria INSPIRE. Esso definisce tre classi di operazioni che un client può effettuare su cataloghi dati via Web:

1. **Service operations** - Operazioni per interrogare un servizio per determinare le operazioni implementate dal servizio stesso:
 - GetCapabilities - permette di recuperare informazioni che descrivono l'istanza del servizio di catalogo
2. **Discovery operations** - Operazioni per determinare il modello delle informazioni del catalogo e effettuare delle query sui record del catalogo:

- DescribeRecord - permette di recuperare uno o più elementi del modello dei metadati (i tipi) supportati dal catalogo
- GetDomain - restituisce informazioni sui valori ammissibili di una o più proprietà di un metadato
- GetRecords - permette di effettuare una query (con filtri o espressioni CQL) per ottenere i metadati, con vari livelli di dettaglio (brief, summary e full)
- GetRecordById - permette di ottenere i record del catalogo utilizzando i loro identificatori [UUID - Universally Unique Identifier], ottenuti per esempio dalla operazione GetRecords

3. **Management Operations** - Operazioni per creare o modificare i record nel catalogo:

- Transaction - definisce una interfaccia per creare (insert), modificare (update) e cancellare (delete) i record del catalogo
- Harvest - permette di definire un insieme di dati che devono essere inseriti o modificati nel catalogo; un job sul catalogo si occuperà in seguito di processare la richiesta e aggiornare il catalogo.

Facendo riferimento ai criteri specificati si fa di seguito riferimento ad alcuni esempi di geospatial infrastructure di tipo interoperabile a livello nazionale.

2.1.4 - ESEMPI DI INTEROPERABILITA' A LIVELLO NAZIONALE: il Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT)

Il Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT) è stato istituito con l'articolo 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale (D. Lgs. 82/2005 e s.m.i.) ed è stato individuato, dal successivo articolo 60, come base di dati di interesse nazionale.

Come previsto dal citato articolo 59 del CAD, le specifiche tecniche con le quali viene individuato il contenuto del RNDT e le relative modalità di costituzione e aggiornamento sono state definite dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni e adottate con il DM 10 novembre 2011 (G.U. n. 48 del 27 febbraio 2012 – S.O. n. 37) del Ministro per la pubblica amministrazione e l'innovazione, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare.

Sulla base di tale contesto normativo, il RNDT costituisce il catalogo nazionale dei metadati riguardanti i dati territoriali e i servizi ad essi relativi disponibili presso le

Pubbliche Amministrazioni nazionali e si configura, altresì, come registro pubblico di tali dati certificandone l'esistenza attraverso la pubblicazione dei relativi metadati.

Dal 2005, a livello internazionale ed europeo, si consolida la standardizzazione dell'informazione geografica (ISO e CEN) attraverso gli Standard della serie 19100 che riguardano più direttamente i metadati di dati territoriali e servizi ad essi relativi (19115 prima e 19119, TS 19139 negli anni seguenti).

Il RNDT è basato dunque sugli Standard ISO 19115, 19119 e TS 19139, prodotti dal Technical Committee ISO/TC211 che si occupa di standard per l'informazione geografica. Il rispetto delle regole tecniche del RNDT in aderenza agli standard ISO di riferimento assicurando la contestuale conformità, senza ulteriori adempimenti, al Regolamento (CE) n. 1205/2008 recante attuazione della direttiva INSPIRE per quanto riguarda i metadati.

Sulla base di tali standard viene definito il modello concettuale del Repertorio, elaborato da un apposito Gruppo di Lavoro istituito nell'ambito delle attività del Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle Pubbliche Amministrazioni.

Come previsto dall'art. 59 del CAD, l'Agenzia per l'Italia Digitale è direttamente investita nella gestione organizzativa e tecnologica del RNDT, in coerenza con le disposizioni che disciplinano il Sistema pubblico di connettività e cooperazione.

L'Agenzia per l'Italia Digitale ha, quindi, realizzato il portale RNDT - interamente con tecnologia open source - attraverso il quale sono fornite le due funzionalità tipiche di un servizio di catalogo:

- la consultazione dei metadati, accessibile a tutti;
- la gestione dei metadati, riservata alle Pubbliche Amministrazioni accreditate.

Negli stessi anni in cui in Italia si definisce il quadro normativo, organizzativo e tecnologico che avrebbe costituito il riferimento per il RNDT, anche in Europa si avverte la necessità di favorire l'interoperabilità nel settore promuovendo l'armonizzazione, l'accesso e il riuso dei dati prodotti e/o gestiti dalle amministrazioni pubbliche.

Come citato nel paragrafo precedente, la Direttiva 2007/2/CE, entrata in vigore il 15 maggio 2007, istituisce, infatti, nella Comunità Europea, un'infrastruttura per l'informazione territoriale (INSPIRE) per supportare le politiche ambientali e le politiche e le attività che hanno un impatto sull'ambiente.

Se INSPIRE è basata sulle infrastrutture per l'informazione territoriale create e gestite dagli Stati Membri, una delle componenti fondamentali dell'infrastruttura sono, appunto, i metadati, definiti come "le informazioni che descrivono i set di dati territoriali e i servizi relativi ai dati territoriali e che consentono di ricercare, creare archivi e repertori e dunque utilizzare tali dati e servizi".

In relazione a ciò, la Commissione Europea, con il Regolamento n. 1205/2008, ha stabilito i requisiti per la creazione e l'aggiornamento dei metadati per i dati territoriali e relativi servizi, al fine di renderli compatibili ed utilizzabili nel contesto comunitario e in quello transfrontaliero.

I metadati sono prodotti dalle singole Amministrazioni responsabili dei dati e servizi, che possono effettuare le operazioni di modifica, aggiornamento e cancellazione dei metadati stessi inviando dei file XML conformi agli schemi XSD di cui al D.M. 10 novembre 2011.

Con l'introduzione della Direttiva INSPIRE e del Regolamento (CE) sui metadati, si è reso necessario un lavoro di adeguamento del profilo originario alle indicazioni europee per garantirne la piena conformità.

L' "Agenzia per l'Italia Digitale" provvede alla convalida di tutti i metadati ricevuti per la loro pubblicazione finale nel Repertorio Nazionale. I controlli dell'Agenzia si limitano ad una verifica di completezza e di coerenza dei file inviati dalle Amministrazioni, che restano le uniche responsabili del contenuto pubblicato.

Una volta pubblicati nel Repertorio Nazionale i metadati sono disponibili per la consultazione.

In tale ambito, pertanto, il RNDT, catalogo nazionale dei metadati, costituisce parte integrante dell'infrastruttura nazionale per l'informazione territoriale e del monitoraggio ambientale, istituita, in Italia, con il D. Lgs. 32/2010, norma di recepimento della Direttiva INSPIRE.

In conseguenza di ciò, esso eroga i servizi di ricerca, definiti come quei servizi che consentono di cercare i set di dati territoriali e i servizi ad essi relativi in base al contenuto dei metadati corrispondenti e di visualizzare il contenuto dei metadati stessi.

Attraverso le funzioni di ricerca il catalogo consente di trovare i metadati relativi a dati e servizi documentati nel RNDT dalle amministrazioni competenti. In particolare:

- i metadati relativi ai dati territoriali di interesse generale, di cui all'allegato 1 del DM 10 novembre 2011, nonché quelli relativi ad altri dati territoriali che le amministrazioni reputino opportuno documentare;
- i metadati relativi ai servizi, riferibili ai dati suddetti, eventualmente resi disponibili dall'Amministrazione;
- i metadati relativi ai dati territoriali che le amministrazioni prevedono di acquisire (nuove acquisizioni).

Per questo, come previsto all'art. 4 comma 1 del D.M. recante le regole tecniche del RNDT, la pubblicazione dei metadati nel RNDT assicura il rispetto degli adempimenti di cui alle norme citate (Regolamento (CE) n. 1205/2008 e D. Lgs. 32/2010 in particolare).

L'accesso all' infrastruttura è garantito attraverso un geoportale comunitario gestito dalla Commissione ed attraverso il geoportale nazionale.

L'accesso ai metadati contenuti nel RNDT, con esclusione di quelli relativi alle nuove acquisizioni, è pubblico e gratuito per tutti gli interessati, così come previsto dall'art. 9 del DM 10 novembre 2011.

Invece, per evidenti ragioni, le informazioni relative alle nuove acquisizioni di dati sono consultabili solo dalle Pubbliche Amministrazioni accreditate e sono gestite in un'area riservata.

Il RNDT pubblica i metadati prodotti e conferiti da ciascuna amministrazione che, come previsto dalla normativa vigente, resta pienamente responsabile della correttezza e dell'aggiornamento degli stessi, nonché della tenuta, della gestione e dell'aggiornamento dei dati cui tali metadati si riferiscono.

La consultazione del catalogo può avvenire:

- in modalità estesa, con l'utilizzo di un navigatore geografico;
- in modalità accessibile con semplici maschere alfanumeriche.

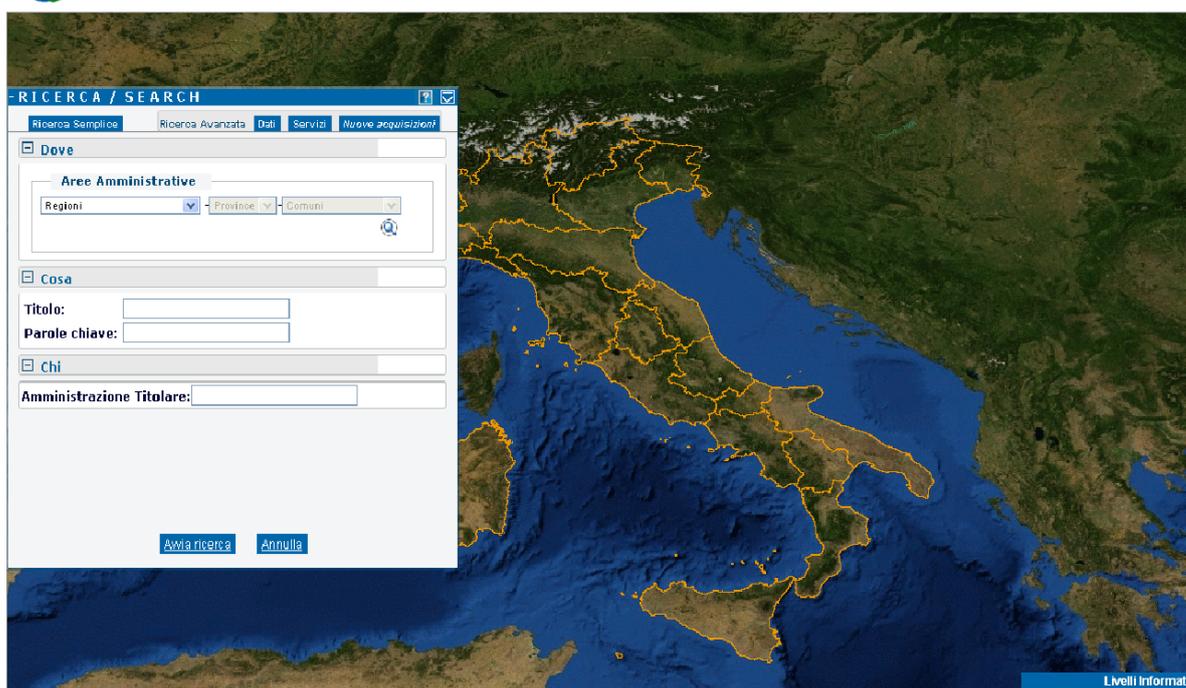


Figura 8 - Portale del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali

Alla rete di cataloghi di metadati che alimentano tramite “harvesting” (estrazione dei dati via web) il RNDT si aggiunge anche il nodo relativo al Dipartimento della Protezione Civile, prima Amministrazione Centrale ad utilizzare lo standard OGC per l'invio dei metadati al Repertorio. Dopo alcuni test di interoperabilità è stato infatti possibile importare nel RNDT i metadati disponibili sul servizio CSW del Dipartimento.

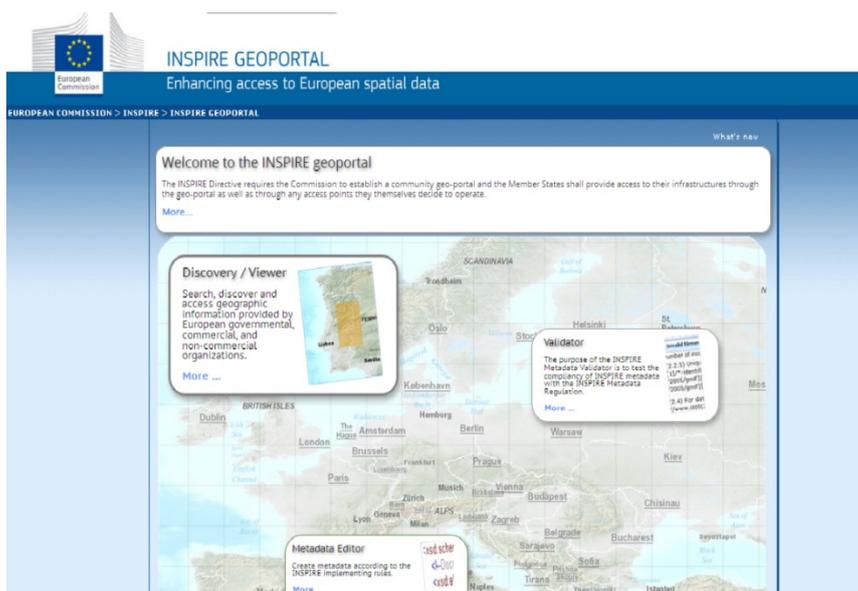


Figura 9- GEOPORTALE INSPIRE **(verifica dove sono state citate queste immagini)**



Figura 10 - Geoportale Nazione **(verifica dove sono state citate queste immagini)**

2.2- LA PETROLOGIA NEI GEODATABASE INTEROPERABILI

Dopo aver introdotto i protocolli per il trattamento informatico e telematico dei dati geologici e geospaziali, avendo illustrato come questi ultimi siano sottoposti a specifiche regole grammaticali e lessicali, si dà inizio alla prima fase del lavoro pensando ad un'infrastruttura che replichi a livello logico e fisico i canoni previsti dal modello organizzativo dei dati.

Nell'intento di affrontare lo studio geologico di un area con lo scopo di estrapolare risultati di interesse geopetrologico, emerge dunque la necessità di definire le metodologie di campionamento seguendo criteri che soddisfino al meglio il cosiddetto requisito di "rappresentatività" del campione rispetto all' "Unità" da cui è stato prelevato, ovvero individuare gli aspetti più oggettivi che è possibile cogliere alla scala dell'affioramento o del campione a mano. Talvolta la conoscenza pregressa di un rilevamento geologico eseguito da altri ricercatori e/o professionisti, induce il campionatore a seguire orme già tracciate, minimizzando l'apporto innovativo che può scaturire da una nuova osservazione di campagna, ragion per cui una modalità che rende meglio omogenea la distribuzione spaziale dei campioni è quella del rilievo/prelievo su

maglia quadrata a passo costante con dimensione della maglia in funzione della scala di rappresentazione dei risultati. La densità dei nodi sarà pari in tutta l'area da rilevare a meno di alcune aree inaccessibili, oppure potrà essere intensificata laddove si riscontra la necessità di dettagliare ulteriormente un sito di particolare interesse.

Tecniche di geostatistica, trattate nel capitolo successivo, concorrono a migliorare la qualità della campagna di campionamento grazie all'interpolazione di dati di letteratura, qualora siano esistenti, oppure ad eseguire dei campionamenti scaglionati, programmati su più fasi esecutive, orientati dalla rielaborazione delle mappe di interpolazione dei primi dati analizzati integrati con i dati analitici dei campionamenti successivi.

Quest'ultimo aspetto è argomento centrale di questa trattazione per quel che riguarda l'acquisizione, l'analisi, il trattamento, l'archiviazione e la rappresentazione dei dati geologici sulla base di criteri quanto più aderenti a standard di tipo internazionale, nel rispetto dell'interoperabilità dei **dati** e dei **metadati** diffusi mediante sistemi telematici di informatizzazione territoriale, strumenti primari per lo sviluppo e la diffusione della conoscenza.

Il modello di riferimento per questo studio è il già citato GeoSciML che ha lo scopo di coniugare i vari aspetti tecnici ed intellettuali a carattere interdisciplinare tra le scienze geologiche e quelle informatiche.

Il GeoSciML si può definire un "metamodello concettuale", originariamente "Application Schema", che sancisce, secondo i canoni della letteratura più accreditata su scala internazionale, le regole ontologiche, relazionali, lessicali riferite alle realtà geologiche, sia esse fisiche che astratte. Attraverso l'uso di un linguaggio di modellazione quale UML¹ definisce in dettaglio i caratteri relazionali quali le generalizzazioni, il rango, i vincoli, etc.. Prevede, inoltre, che la nomenclatura dei termini geologici vada abbinata ad un riferimento "URI"², in particolare un "URN"³ quale link a dizionari geologici esposti online secondo schemi strutturati in "tag", perché l'utente possa riferirsi ad una medesima entità in modo univoco evitando l'uso di terminologie ambigue che limitano l'interoperabilità ed i risultati potenzialmente offerti dai motori di ricerca dedicati (v. CSW). In altri termini si implementa un architettura di web semantico, ossia una struttura che permette ai dati di essere condivisi e riutilizzati fra diversi soggetti, applicazioni, enti, comunità

¹ Per approfondimenti del linguaggio UML si rimanda al sito <http://www.uml.org>.

² L'URI è una stringa che identifica univocamente una risorsa generica che può essere un indirizzo Web, un documento, un'immagine, un file, un servizio, un indirizzo di posta elettronica

³ URN è un URI che identifica una risorsa all'interno di un "namespace", i quali sono mantenuti nel registro della IANA (Internet Assigned Numbers Authority)

scientifiche, etc. I dizionari si basano sul RDF, che integra un varietà di applicazioni che utilizzano l'XML per la sintassi e gli URI per i nomi.

L'utilizzo di un linguaggio come UML per la rappresentazione grafica e modellistica e di un linguaggio di markup, quale XML e GML per la traduzione in codice digitale, è ormai una routine per qualunque sistema orientato verso la standardizzazione.

2.2.1 – Osservazione Analisi e Mappatura

Nello studio del dominio geologico ed in particolare dei metodi di osservazione e rilevamento delle informazioni si può spaziare fra vari ambiti a diverse specificità e fattori di scala. Ad esempio, l'assetto geostrutturale di un sito è connesso tanto alla tettonica regionale quanto ai campi di stress sublocalizzati; entrambi sono osservabili attraverso un approccio telescopico, ovvero un accostamento a scala via via più restrittiva, che inizia dai processi geodinamici che originano intere catene montuose fino alla descrizione delle micropieghe osservabili alla sezione sottile, per finire alle reazioni termodinamiche all'interno di microdomini mineralici in condizioni geoambientali instabili, responsabili di fenomeni termodinamici testimoniati ad esempio dai cambiamenti nella mineralogia delle paragenesi metamorfiche connotabili esclusivamente alla microscala.

Il tradizionale output di un elaborato geologico è sempre stato una rappresentazione grafica cartacea, quale esito di una sintesi interpretativa di osservazioni e misurazioni eseguite su porzioni di territorio a varia scala, da analisi di rocce e sedimenti prelevati in superficie o in pozzo; ma il rilievo più speditivo di campagna si basa perlopiù sull'osservazione degli "affioramenti", il più importante scenario per la raccolta di campioni, misure ed altre informazioni utili alla caratterizzazione geologica dell'area in studio. Spesso, in base al numero ed alla varietà di dettagli acquisiti ed analizzati, non sempre è plausibile stilare elaborati cartografici sinottici, rendendosi necessaria la produzione di svariate tavole indipendenti l'una dalle altre e di non facile sovrapposizione.

Ecco perché con la diffusione dell'era digitale, la tradizionale mappatura cartacea del territorio sta gradualmente lasciando il posto alle mappe digitali, da cui è sempre possibile ottenere uno stampato quale "istant map" dell'area prescelta. Se si considera, quale esempio, un'area di particolare interesse scientifico soggetta a frequenti modificazioni superficiali per cause, geomorfologiche, vulcaniche, sismo tettoniche, geochimiche, i dati registrati dai sensori di monitoraggio sono sensibili di un aggiornamento in real-time o lasched real-time, che rende spesso obsoleto il contenuto delle precedenti mappature. Da qui, l'utilità di confrontarsi oggi con sistemi di gestione delle risorse che, in modo dinamico ed interattivo, possano

restituire dati aggiornati ed in formati interoperabili, rendendo efficace e fruibile lo studio interdisciplinare, come lo studio di fenomenologie connesse alla variazione di uno o più parametri geologici, vedi analisi statistica multivariata, o l'utilizzo di dati pluridisciplinari in processi di elaborazione che correlano un enorme numero di variabili da rendere disponibili per algoritmi di calcolo su sistemi grid.

Una delle prerogative del software GIS è quella di fornire una piattaforma strutturata per il trattamento integrato delle informazioni territoriali, laddove ciascun tematismo è l'espressione di un dato digitale, molto spesso numerico, rappresentato in output come un "layer" grafico, di tipo raster o vettoriale, reso più o meno visibile all'utente dalla regolazione della proprietà di trasparenza. Altro vantaggio è dato dalla georeferenziazione del dato geologico e dalla modalità in cui esso è archiviato, ovvero all'interno di un database relazionale di tipo geografico, quale supporto informatico progettato ad hoc per la gestione di dati con primitive geometriche bidimensionali e tridimensionali, avente un enorme capacità di archiviazione ed ampie potenzialità di calcolo matematico e statistico. Il termine "relazionale" indica che ciascuna entità è connessa alle altre per mezzo di relazioni logiche proprie della matematica discreta, ovvero relazioni: suriettive, iniettive, biiettive e, raramente, semplici (Figura 11). Ciò indica la possibilità di ricostruire logicamente e fisicamente le relazioni concettuali che sussistono tra entità reali, come ad esempio tra una "roccia cristallina" ed "i minerali" che, nella relazione di "aggregazione", concorrono alla sua esistenza e, dunque tra la roccia e l'affioramento in cui essa è presente, così via nei termini Formazione → Membro → Unità.

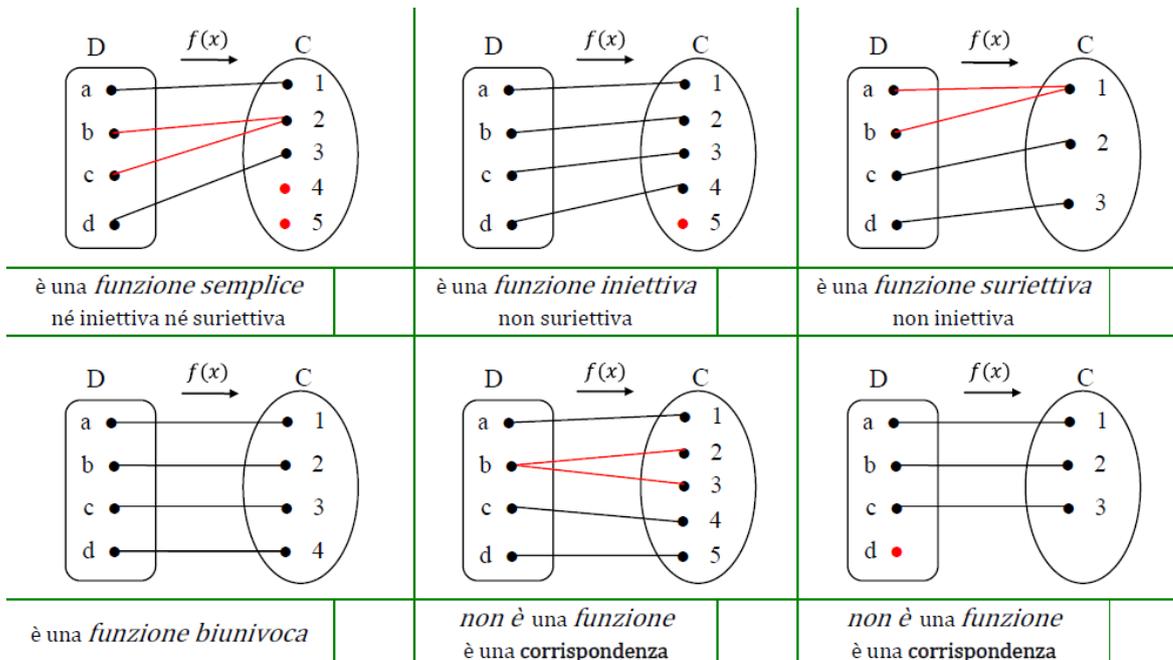


Figura 11 – Relazioni tra insiemi da:

http://www.matematika.it/public/allegati/33/Funzione_definizione_tipi_2_1.pdf

Come è noto, la petrologia è una disciplina che, mediante molteplici osservazioni ed indagini di tipo mineralogico, cristallografico, geochimico e chimico-isotopico, si occupa essenzialmente di problemi inerenti la petrogenesi e/o la potenziale individuazione di relazione di parentalità tra le rocce. Le osservazioni vanno, dunque, dallo studio visivo del cosiddetto “campione a mano”, per analisi diretta di campioni in situ, passando per l’osservazione della sezione sottile al microscopio ottico, fino ad arrivare alle più complesse strumentazioni di laboratorio finalizzate allo studio geochimico della roccia totale ovvero di microdomini areali o puntuali della roccia stessa. Talvolta si cerca di ricreare in laboratorio, anche virtualmente, le presunte condizioni genetiche delle rocce, sia come composizione chimica o mineralogica di partenza, che come parametri di pressione e temperatura, osservando l'evoluzione composizionale della miscela di partenza durante le successive fasi di cristallizzazione dei minerali o, nel caso delle rocce metamorfiche, le reazioni mineralogiche in condizioni di subsolidus.

Da una lunga ed accurata ricerca bibliografica e sitografica, si è riscontrato l’esistenza di svariati database tematici, esposti sulla rete Internet, che archiviano ed espongono i dati analitici di campioni utilizzati per studi scientifici connessi a pubblicazioni editoriali, ad esempio Earthchem con PetDB (www.earthchem.org/petdb), Georoc (georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/), MetPetDB (<http://metpetdb.rpi.edu>), PetLab (<http://pet.gns.cri.nz/>), etc. Non sembra sia ancora stato pubblicato un sistema che integri i dati analitici di tipo geochimico ed altri dati connessi al rilevamento geologico, geostrutturale e geopetrologico del territorio, a partire dall’entità primaria come l’“Unità Geologica”.

Secondo il modello GeoSciML, l’Unità Geologica può definirsi un’entità generica che si specializza in diverse tipologie secondo le caratteristiche che accomuna (Figura 12) (Unità Litologica, Litotettonica, Deformazionale, Cronostratigrafica, etc...).

Altro aspetto riguarda la diversa articolazione delle osservazioni analitiche, ciascuna delle quali apporta un contributo informativo all’“Unità Geologica” la quale, come visibile in Figura 12, è un’entità costituita da una o più parti percentuali di altre Unità Geologiche, ma aventi un rango (rank) pari (nel caso di singola parte costituente) o inferiore. Il termine “Unità Geologica” è ovviamente il più generico ed è adottato in letteratura per definire spesso una roccia unica o una associazione di rocce accomunabili a seguito di uno stesso percorso genetico-evolutivo. Negli studi specifici di settore è normale riferirsi a tipologie di unità che caratterizzano le rocce per altre peculiarità, quali la presenza di deformazioni strutturali omogenee (Deformational Unit), la stessa paragenesi nell’ambito di rocce metamorfiche (Lithotectonic Unit), etc.

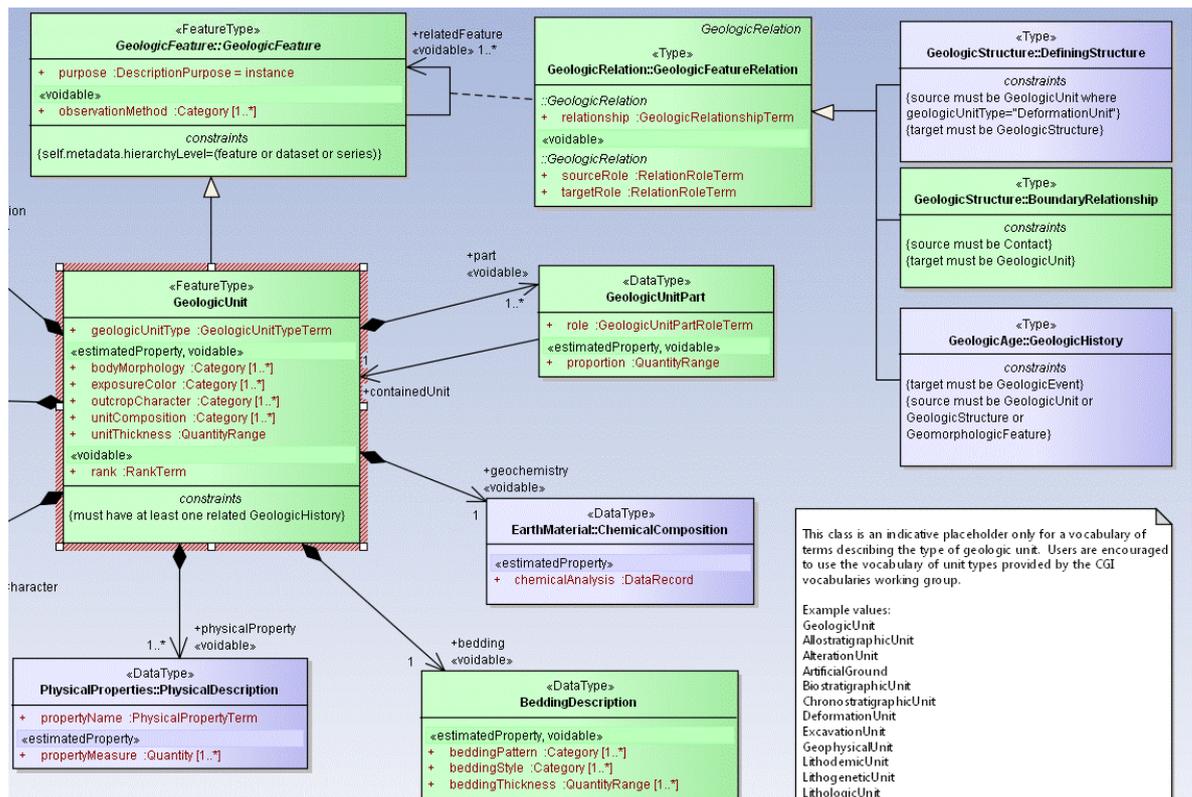


Figura 12 – Schema relazionale GeoSciML v. 3.2 – Geologic Unit (per il significato dei simbolismi vedi nota 1)

Alla luce di tali considerazioni, si può definire l'osservazione geologica come un atto volto a stimare talune proprietà “P_n” dell’oggetto “O”, alla scala di grandezza “G” in un determinato tempo “T”, con uno strumento “S” usando il metodo “M”. La convergenza di tali osservazioni su più elementi vicini tra di loro indica la definizione di zone omogenee, riferendosi preferibilmente a criteri quanto mai oggettivi in cui siano definiti a priori gli intervalli dei valori discriminanti.

Di recente si ripone sempre maggiore enfasi nell’esprimere quantitativamente il livello di certezza del dato geologico, circostanziando quanto più la sua entità in base ai metodi di osservazione e misurazione adottati, oppure l’attendibilità della fonte qualora l’informazione venisse acquisita da terze parti. Si nota quanto importante sia il fattore di scala di osservazione ed il metodo di analisi nel distinguere due entità A e B, dunque ciascun rilievo geologico sarà tanto reale o lecito quanto appropriato è il metodo di indagine applicato per il fattore di scala richiesto. Eseguendo uno studio telescopico dall’affioramento alla sezione sottile, sino a scandire la minerochimica del campione, si ingenera un fenomeno cosiddetto di “ridondanza utile”, ovvero è possibile rideterminare più stime della stessa proprietà, mineralogica, chimica o fisica. Ad esempio, l’osservazione del campione a mano è un’operazione attuabile a costo zero su un ingente numero di campioni, anche in situ, allo scopo di determinare, quando possibile, la percentuale di ciascun minerale, studiandone al contempo anche il fabric dalla superficie ed ivi collocarla all’interno di

una idonea classificazione. Questo vale per le rocce di tipo faneritico, oltremodo si procede con l'osservazione in laboratorio di microscopia e di chimica per poter ottenere i primi dettagli utili alla sua classificazione.

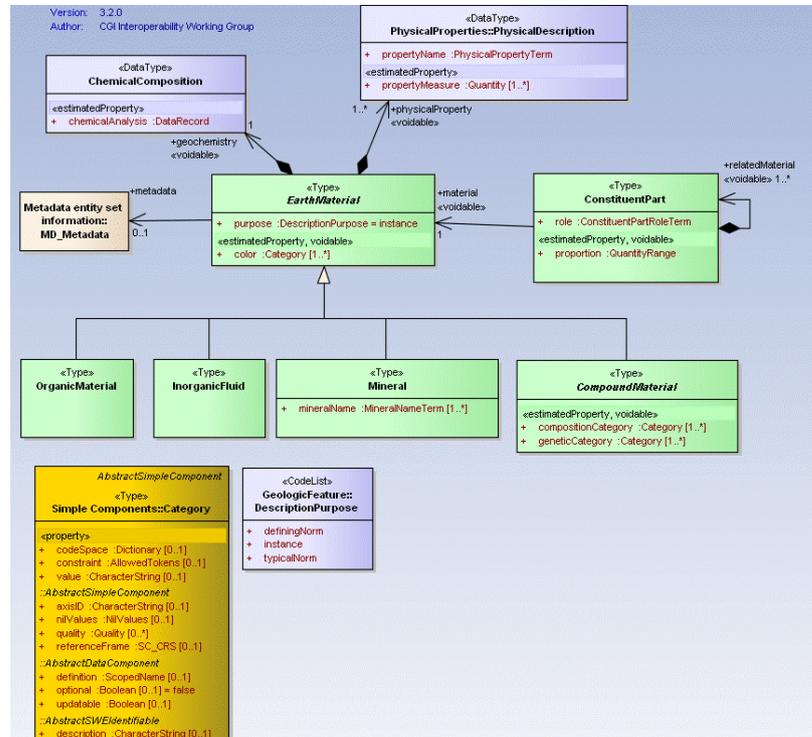


Figura 13 - Schema GeoSciML che indica il punto di partenza da cui si articolano i Materiali Terrestri



Figura 14 – Varie fasi di osservazione e di analisi di un dominio geologico. Esempio di progressione telescopica

Nell'indagine su rocce faneritiche, la prima forma di ridondanza si ha rideterminando al microscopio ottico la percentuale modale mineralica, registrando spesso una sensibile deviazione rispetto al dato osservato alle lente di ingrandimento. Appare scontato che la tecnica microscopica del "conta punti" conduca ad un esito più preciso dell'osservazione a scala mesoscopica, ma essendo essa riferita ad un campione la cui grandezza è pari a qualche centimetro, non vi è alcuna relazione nota, al di là dell'esperienza dell'operatore, che definisca una sezione sottile "un campione rappresentativo dell'affioramento", la cui dimensione può variare dall'ordine del decimetro alle diverse centinaia di metri.

Per rendere più oggettivo tale concetto di rappresentatività del campione ed agevolare il rilevatore nelle operazioni di tracciamento dei limiti litologici e di eventuali ulteriori prelievi di campagna, per quei casi ove sussistano le condizioni di applicabilità si è introdotto il criterio di "intelligibilità della roccia", ovvero quella proprietà di farsi facilmente riconoscere e più correttamente classificare per mezzo di una semplice osservazione visiva. Ciò può dipendere dalla scarsa presenza di alterazione o di altri fenomeni che ne obliterano la lettura ma, per lo più, dalle dimensioni granulometriche ed alla tipologia del fabric, da cui scaturisce in modo più o meno manifesto, la sua reale natura ed i dettagli per la sua collocazione all'interno di un diagramma classificativo.

- **Hand Sample: (Grt=20; Plg=40%)**
- **Optical Microscopy: (Grt= 19%, Plg=34%)**
- **SEM EDS (Grt= 18%, Plg=29%, Alteration=10)**

Figura 15 – Esempio di "ridondanza utile" – Risultati di analisi progressive sullo stesso campione di roccia

Se $M(n)$ e $T(n)$ sono le percentuali modali del minerale "n" presente nella roccia e rilevate rispettivamente alla mesoscala ed alla sezione sottile, avremo che la sommatoria degli scarti ottenuti per differenza tra le quantità modali di ciascuna fase misurate con i due metodi, rapportata a 100 dà un indice variabile tra 0 ed 1, che si è indicato come SRI (Sharpness Rock Index).

$$SRI = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n M(i) - T(i) \quad (1)$$

Quando l'SRI tende a 0 significa che lo scostamento tra la macro e la micro misurazione è piccolo, ovvero il dato petrologico di campagna può essere considerato attendibile.

Nella relazione (2) il calcolo del SRI è effettuato su un numero C di campioni simili prelevati dal medesimo sito si ottiene un valore maggiormente significativo ed estensibile alla scala

dell'affioramento. Il calcolo è indicato

$$SRI_{Tot} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C RSI_i \quad (2)$$

Bisogna tener presente, inoltre, che in tutte le discipline inerenti le scienze osservative esistono modelli comuni di campionamento, i quali forniscono una base per l'elaborazione e la rappresentazione di strumenti simili che dipendono principalmente dalla geometria stessa del campionamento. I termini più comuni sono: campione, esemplare, stazione, profilo, transetto, percorso, scena.

Un termine usato in modo ridondante e talora in modo ambiguo nel nostro linguaggio è la parola: "campione". Con questo termine spesso si indica un esemplare di roccia di volume indeterminato, osservabile ad occhio nudo oppure con strumenti idonei alla rilevazione, in sito o in laboratorio. Così come talvolta si riassume nel termine "analizzare" l'atto di osservare, misurare e quello stesso di analizzare.

Come dettagliato nella parte introduttiva di questo capitolo, il GeoSciML implementa lo standard O&M (Observation & Measurement), grazie al quale si colgono aspetti finemente dettagliati, come momenti diversi della conoscenza di un'istanza concreta e delle sue proprietà.

Si coglie, dunque, una differenza tra il termine Sampling, che indica l'operazione del campionare, ovvero la raccolta di esemplari e di elementi utili a compiere un'osservazione, ed il termine "Specimen", avente una radice lessicale differente, volendo indicare la reale istanza del campionamento, ovvero l'esemplare selezionato sul quale compiere l'osservazione e l'analisi, dunque una sua preparazione qualora l'analisi lo preveda (es. polvere, sezione sottile, soluzione, gel, etc)

Acquisiti i contenuti dell'intero application schema "GeoSciML"¹ si è approfondita l'articolazione delle classi GeologicUnit, EarthMaterial, RockMaterial, LaboratoryAnalysis-Specimen.

Ciò che viene qui schematizzato è un ipotetico percorso conoscitivo a partire dallo scenario di campagna fino al preparato da laboratorio analisi, attraverso la visione dei concetti tipici della teoria ad oggetti, con l'uso di classi, sottoclassi, attributi e metodi.

Riferendosi al caso reale, il percorso conoscitivo procede come segue: in campagna si è di fronte ad una GeologicUnit descrivibile dall'associazione di uno a più EarthMaterial, il quale può essere

¹Lo studio del GeoSciML presuppone una discreta conoscenza dell'UML e della teoria della rappresentazione orientata agli oggetti ed un'analisi molto attenta degli schemi in esso presentati. Non essendo immediata la semplificazione di tale background, per una visione generale dello schema GeoSciML si rimanda al sito www.geosciml.org

composto da uno o più CompoundMaterial. Quest'ultimo, nel caso sia formato da materiale roccioso, si rappresenta come RockMaterial (Figura 16), con tutti gli attributi che lo caratterizzano, ivi compresi quelli ereditati dalle classi da cui è generato.

La classe LaboratoryAnalysis-Specimen comprende a sua volta: LaboratoryAnalysis, Geochronology e GeologicSpecimen.

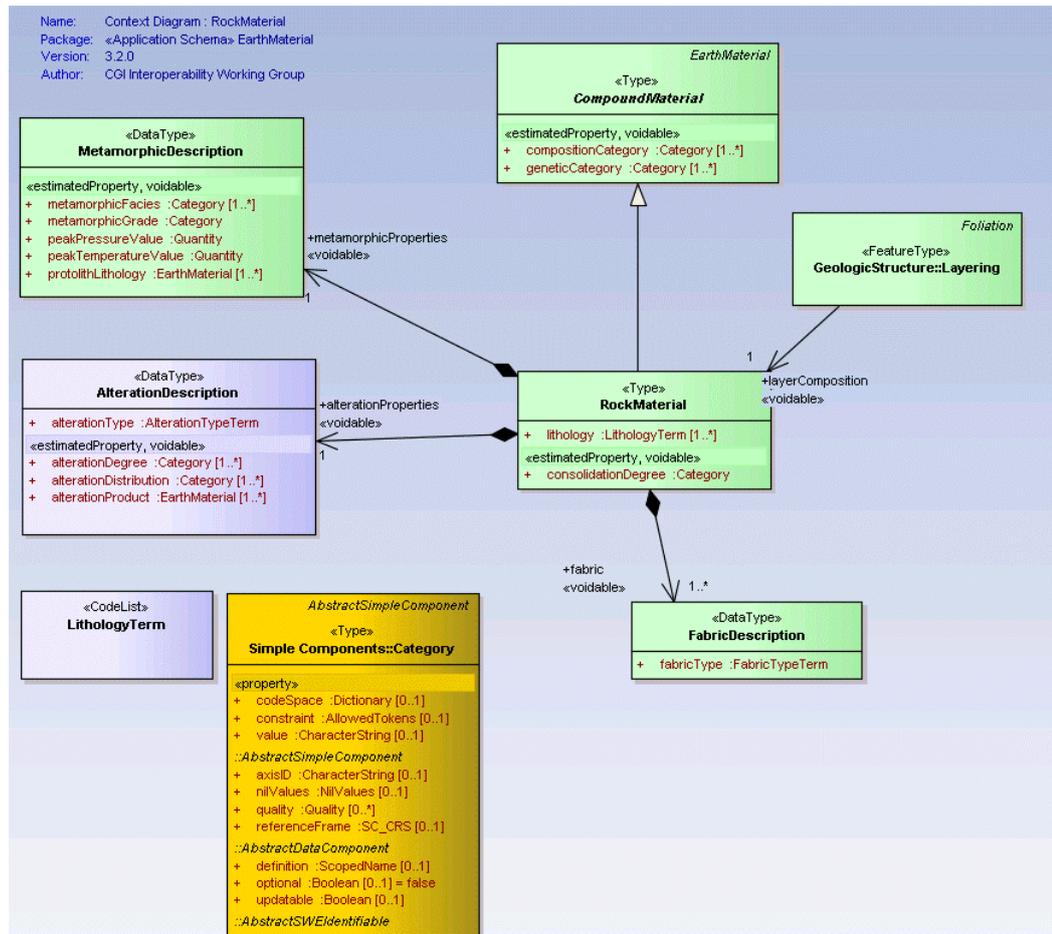


Figura 16 – Rock Material e sue relazioni

L'analisi chimica si instanzia quale una AnalyticalSession che si svolge su uno Specimen proveniente da una SamplingFeatureCollection di una GeologicUnit nel caso di campionamento di campagna o da un EarthMaterial per un campione di provenienza incerta (ad es. reperto museale).

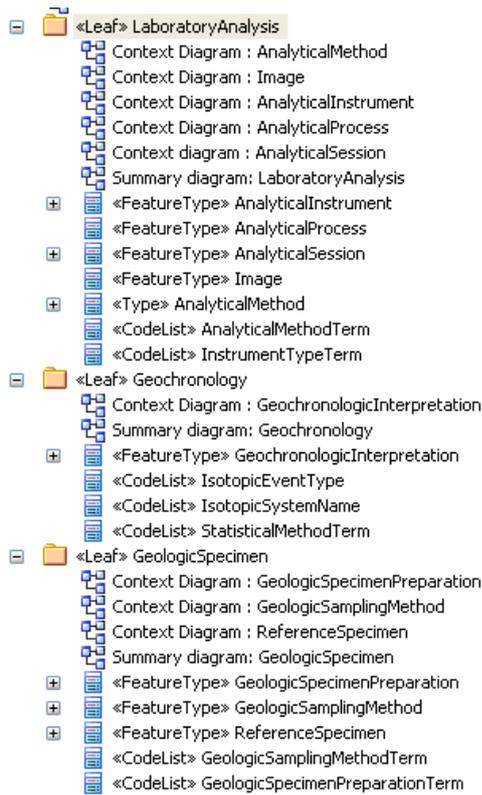


Figura 17 - Estratto dello schema GeoSciML per la classe Laboratory Analysis-Specimen

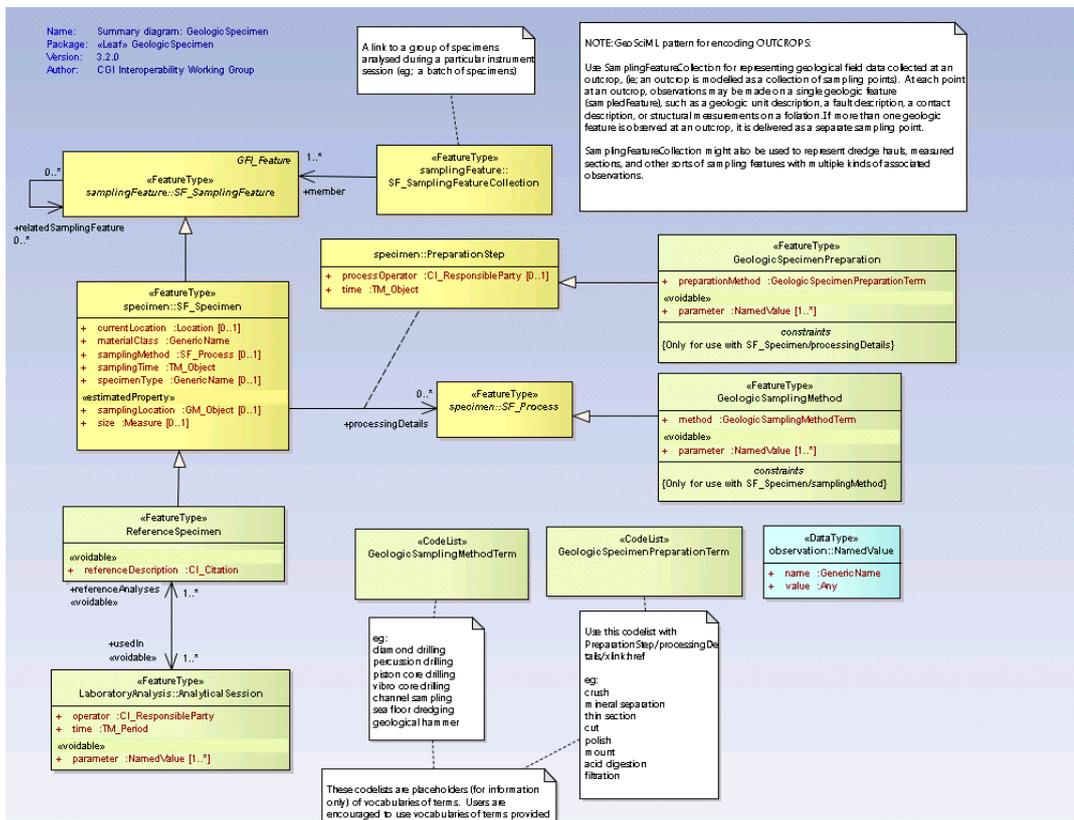


Figura 18 – Estratto dello schema GeoSciML per la classe Geologic Specimen

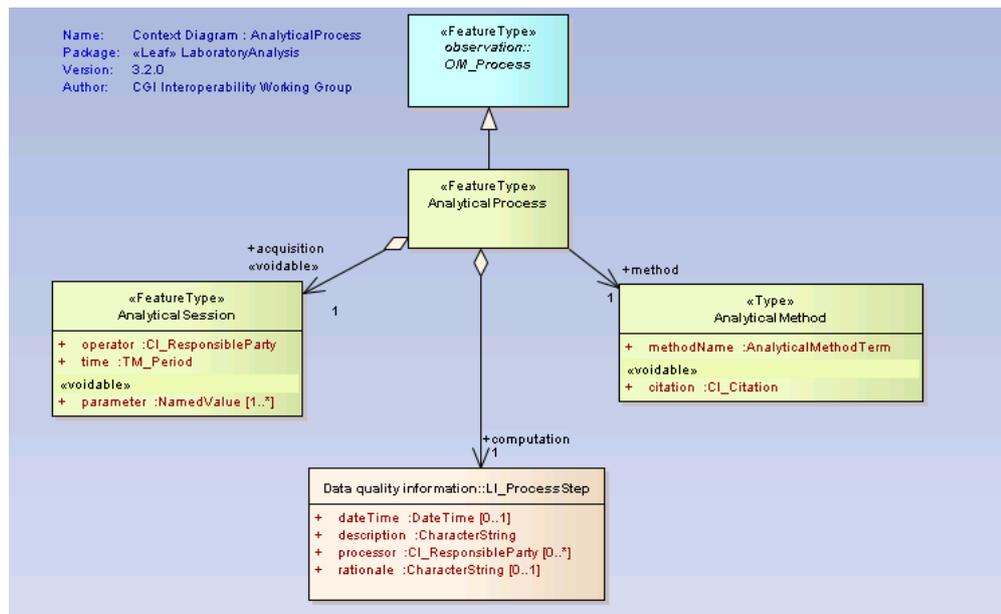


Figura 19 - Dallo schema GeoSciML – Sottoclasse Processo Analitico come implementazione di un O&M Process

Inoltre è opportuno specificare che una sessione analitica si può svolgere attraverso lo studio delle caratteristiche chimiche, fisiche o meccaniche di un campione in un laboratorio utilizzando uno specifico metodo analitico; tuttavia può essere anche il risultato di un processo di elaborazione di dati attraverso procedure di calcolo che restituiscono un output di valori da archiviare e, possibilmente, condividere. In quest'ultimo caso, se la procedura è contemplata negli standard proposti da O&M (v capitolo precedente), essa sarà una sua relativa implementazione.

2.2.2 - Le infrastrutture dei database geochimici: EarthChem, PetLab, MetPetDB

Per conoscere lo stato dell'arte sui database geochimici esposti sulla rete Internet è esemplare la visione dei maggiori sistemi di raccolta dati petrologici esistenti: PetDB, EarthChem e PetLab.

Sono stati analizzati i rispettivi portali per attingere il livello di capillarità dei dati, le relazioni esistenti con altre realtà interdisciplinari, l'atomicità concepita nella strutturazione dei database, l'adeguamento al lessico suggerito dai riferimenti IUGS e tutto quanto altro sia utile per costruire un'infrastruttura locale in che implementi il modello sopra esposto.

EarthChem¹ sviluppa e gestisce banche dati, software e servizi che supportano la conservazione, la scoperta, l'accesso e l'analisi di dati geochimici e facilitare la loro integrazione con la grande varietà di parametri sulle scienze della terra. Partner con MGDS (Marine Geoscience Data System) formano la struttura IEDA (Integrated Earth Data Application) che, tra svariati servizi geomatici, include i database geochimici PetDB e SedDB, la rete dati geochimica EarthChem, la collezione dei

¹ Per l'accesso al portale e la visione dei template dei dati si rimanda al sito: www.earthchem.org

dati di campagna dell'Academic Seismic Portal ed il sistema SESAR (System for Earth Sample Registration).

SESAR, consultabile all'indirizzo, <http://www.geosamples.org>, è un database online a disposizione della comunità scientifica internazionale, il quale consente la registrazione dei campioni di rocce fornendo i relativi metadati, quelle informazioni che contestualizzano i set di dati, consentendone la loro rapida ricerca e la creazione di archivi ad essi associati.

L'utilizzo di SESAR consente inoltre di ottenere un codice IGSN (International GeoSample Number) ovvero un codice alfanumerico di nove cifre in grado di identificare in maniera univoca i campioni prelevati in ambienti naturali e le informazioni più importanti relative al loro campionamento (attrezzature utilizzate per la localizzazione, dimensioni e grado di alterazione del campione, nome della raccolta, etc.).

PETLAB è un enorme catalogo di rocce della Nuova Zelanda implementato per mezzo di un raffinato database geoanalitico. Il catalogo è alimentato da dati provenienti dalle più importanti università neozelandesi, australiane e statunitensi e gruppi editoriali di fama mondiale.

PETLAB ora contiene 184.025 record di esempio; 49.072 dispongono di dati analitici.

I dati possono essere interrogati e scaricati da chiunque gratuitamente. L'accesso al LAB (geochimica, isotopica, età, volumetria e petrofisica) prevede una procedura di registrazione ed una successiva login.

Fra tutte le realtà simili PETLAB sembra costituire il miglior sistema trattamento di dati petrologici mai esposto sulla rete mondiale, evidenziando un concreto lavoro di brainstorming tra scienziati di vario rango ed estrazione culturale che ha condotto a risultati scientifici di alto livello tecnologico.

MetPetDB è un database dedicato alla petrologia del metamorfico progettato e costruito da una comunità globale di petrografi del metamorfico in collaborazione con gli scienziati informatici del Rensselaer Polytechnic Institute come parte dell' Iniziativa Nazionale della Cyberinfrastructure e sostenuto dalla National Science Foundation.

Il progetto sosterrà lo sviluppo, l'attuazione e la popolazione del MetPetDB con lo scopo di:

- archiviazione dei dati pubblicati;
- memorizzazione di nuovi dati per l'accesso immediato ai ricercatori e agli studenti;
- facilitare la raccolta di informazioni per ricercatori iniziano nuovi progetti;
- fornire un meccanismo di ricerca dei dati relativi all'intero globo
- fornire una piattaforma per studi in collaborazione tra i ricercatori, e
- servire come un portale per gli studenti che iniziano i loro studi di geologia del metamorfico.

E' stato importante osservare queste infrastrutture dati per comprendere lo stato dell'arte ed apprendere concetti fondamentali per la strutturazione di un sistema dati geopetrologico globale che implementasse il più possibile il concetto di interoperabilità

2.3- IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO “FOS2MAN”

Per quanto detto fin'ora e dall'osservazione dei lineamenti esposti dal modello GeoSciML, si è giunti alla progettazione di un modello logico di un geodatabase qui denominato “FOS2MAN” (From Outcrop Scale to MicroAnalysis), di cui si espone di seguito uno schema relazionale semplificato (Figura 20) e successivamente l'articolazione del modello concettuale dalla quale ha avuto vita il modello fisico del FOS2MAN. Il modello concettuale FOS2MAN descrive l'organizzazione delle tabelle dati e le loro relazioni di nesso e di molteplicità, replicando quanto più fedelmente l'Application Schema GeoSciML e ricercando la piena interoperabilità anche con le attuali strutture dati articolate da PetLab ed Earthchem, per quanto attiene l'aspetto geochimico, e fornisce nel contempo uno schema organizzativo per un dettagliato rilievo di campagna, specie per il rilievo finalizzato all'elaborazione di dati geopetrologici sui basamenti cristallini.

Lo sviluppo, infatti, procede dall'ambito del rilievo geologico generale, per approfondire il rilievo geologico strutturale, con particolare riferimento agli elementi tipici del metamorfico, all'archiviazione dei campioni, la loro descrizione e la caratterizzazione analitica che spazia dall'analisi chimica alla microstrutturale fino all'“image processing” delle X-ray map quale elaborazione statistica finalizzata allo studio della distribuzione degli elementi nei minerali.

E' stata disciplinata la relazione parentale esistente tra il sito di campionamento, in quanto esso stesso un affioramento roccioso inquadrabile all'interno di una “unità geologica”, il materiale prelevato dal sito, ovvero il campione (sample) o la collezione di campioni, la riduzione nella forma e parte da sottoporre ad analisi, ciascuna da trattare in una sessione di analisi con uno specifico metodo e processo analitico.

SIMPLIFIED ENTITY-RELATIONSHIP DIAGRAM

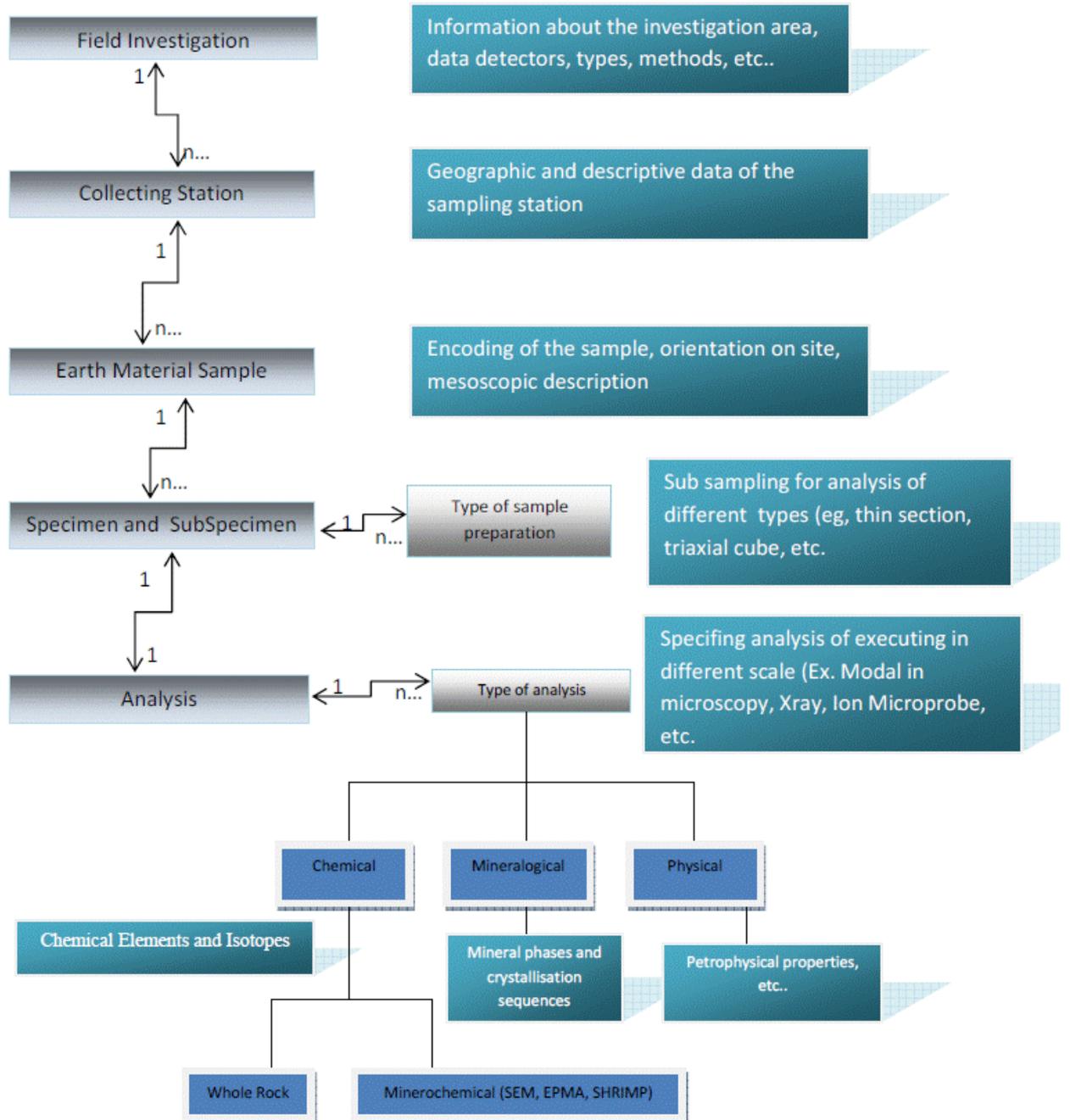


Figura 20 - FOS2MAN – Schema semplificato del modello Entità - Relazione

L'estensione nel modello concettuale (Figura 21) propedeutico al database design si articola, in alcune parti, come segue:

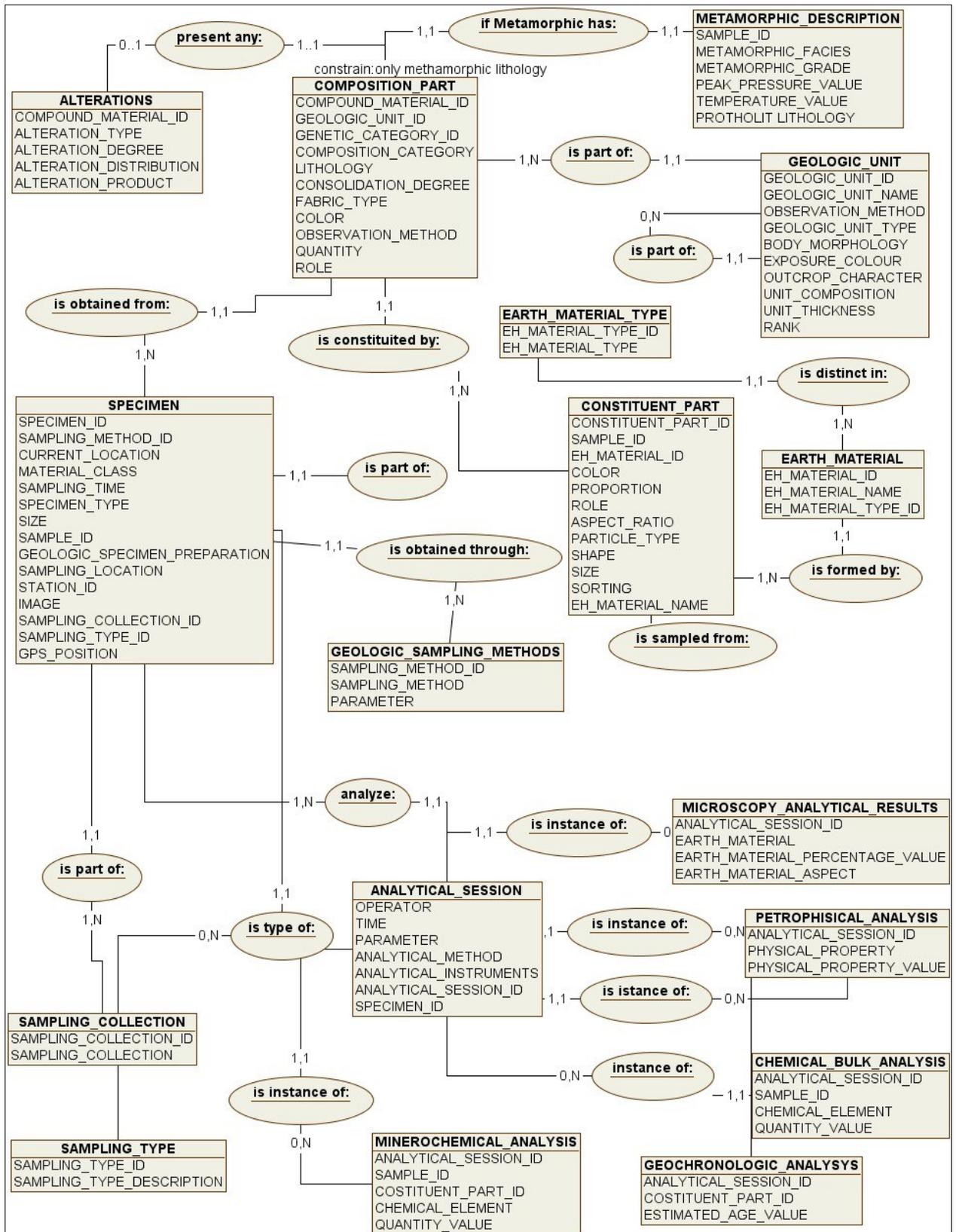


Figura 21 - FOS2MAN - Modello concettuale

2.3.1- Database Design

Nel criterio di acquisizione dei metadati figurano potenzialmente quanti più elementi informativi che contestualizzano il campionamento ed altrettanti si riferiscono alle informazioni relative alla fase di laboratorio, fin'anche alla temperatura di lavoro e al numero seriale dell'apparecchiatura usata per l'analisi. Talvolta, taluni metadati sembrano essere di importanza trascurabile per chi mira maggiormente ai risultati analitici; tuttavia, l'esperienza maturata nel database design ha suggerito che in seno ad una struttura dotata di un certo numero di apparecchiature di laboratorio, spesso soggette a speciali tarature ovvero aventi per natura un *bias* sulla precisione, ritorna molto utile poter interrogare un database utilizzando un criterio selettivo che individui lo specifico strumento associato ad una sessione analitica. Lo stesso vale anche per l'operatore che esegue l'analisi, perché si identifichi e si associ con l'ente cui afferisce ovvero definisca a che titolo compie quell'analisi.

Per quanto attiene la struttura dei metadati connessi alla geografia del campionamento, guardando anche alla struttura utilizzata nel database SESAR si è predisposto un campo specifico per l'IGSN e poi di seguito:

- Description (descrizione del campione);
- Geolocation (informazioni sull'ubicazione del campione);
- Collection (informazioni sulla collezione o raccolta cui appartiene il campione);
- Curation (informazioni sull'archivio di appartenenza del campione);
- Relation to parent (informazioni sul rapporto col Sample Core).

Logica vuole che tali campi vadano popolati nel rispetto del lessico previsto nei dizionari riferiti da un URI, al fine di garantire l'univocità dei lemmi geologici e favorire dunque l'interoperabilità tra i sistemi informativi. Lo stesso SESAR propone un lessico per taluni attributi, quali: "Sample Type", "Material", "Metadata field", "Classification (Rock)", "Classification (mineral)", "Collection method", "Navigation type", "Physiografic feature" e "Platform type".

La versione del vocabolario utilizzata risulta aggiornata al 4 giugno 2013

Per l'implementazione delle tabelle di base è stato compilato il metadata field indicato con "Geolocation", riportando i metadati acquisiti per 309 campioni riferiti all'area delle Serre e di Capo Vaticano.

In Geolocation sono stati inclusi i seguenti campi:

- Latitude: latitudine del luogo in cui è stato raccolto il campione (Start latitude viene utilizzato per i campionamenti lineari come i dragaggi);
- Longitude: longitudine del luogo in cui è stato raccolto il campione (Start longitude viene utilizzato per i campionamenti lineari come i dragaggi);

- Elevation: quota a cui il campione è stato raccolto. Il valore è espresso in metri;
- Latitude (end), Longitude (end), Elevation (end): sono campi specifici per i dragaggi;
- Navigation type: metodo utilizzato per determinare la posizione del campione;
- Physiographic feature: tipo di elemento fisiografico in cui è stato prelevato il campione;
- Name of physiographic feature: nome dell'elemento fisiografico;
- Location description: descrizione libera del luogo di campionamento;
- Locality: nome della località specifica in cui è stato prelevato il campione;
- Locality description: informazioni aggiuntive sulla località specifica in cui è stato prelevato il campione;
- Country: nazione in cui il campione è stato raccolto;
- State/Province: stato o provincia in cui il campione è stato raccolto;
- City/Township: città (o unità territoriale) in cui il campione è stato prelevato.

Avendo ubicato principalmente campioni descritti in letteratura e quindi analizzati da autori precedenti, sono stati aggiunti, inoltre, i campi "Original Name", che riporta il nome originale del campione, e "ID Sample", contenente un codice identificativo univoco ("MEIGEPEG + numero progressivo") utilizzato come chiave primaria della tabella.

Altri attributi per cui sono state definite le tabelle di base riguardano le voci predefinite relative a:

- Collector
- Collection Type
- Strat Unit
- Strat Age
- Rock Type
- Sample Type
- Oriented Sample Marked
- Material
- Analysis Method
- Geochron Method
- Laboratory
- Parameter

La parte infrastrutturale connessa strettamente al rilievo geologico e geologico-strutturale, in specie allo studio sui terreni metamorfici, è stata ampiamente circostanziata poiché rientra negli scopi predeterminati in questo progetto di tesi. Il modello dati si è ispirato ad un frame in uso presso il servizio geologico nord-americano (<http://ngmdb.usgs.gov/www-nadm/>)

Come accennato in premessa, uno degli obiettivi preliminari di un rilevamento è la quantificazione del termine di incertezza del dato acquisito o interpretato

I dati presenti all'interno di un database possono avere origini differenti, per cui si è introdotto a fianco di ogni elemento il suo rispettivo "Data source".

Uno dei fattori rilevanti sull'incertezza di un dato è legato al suo posizionamento sulla mappa. Quando un particolare elemento geologico viene mappato, esso può avere delle coordinate diverse da quelle reali, per ragioni quali: una scarsa accuratezza del sistema GPS, l'oggettiva difficoltà di localizzare in campagna quel particolare elemento (ciò varia in base alla sua natura), o al fatto che esso sia stato prelevato da altre fonti e riutilizzato. L'attributo "Location Confidence Meters" indica un valore dato dalla combinazione di tutti i possibili errori di posizionamento di un elemento o struttura, relativamente ad una posizione certa. Questo valore può essere visualizzato come il raggio, in metri, di un cerchio avente come centro il punto in cui si dovrebbe trovare l'elemento ed entro il quale si ha la maggiore probabilità di trovarlo.

Un ulteriore fattore di incertezza di un dato può essere legato alla sua identità o tipologia, che gli viene assegnata dal rilevatore, come ad esempio l'identità di un contatto tra due litotipi diversi (se stratigrafico o per faglia, e nel secondo caso di che tipo di faglia si tratta, ecc.). Si è adottato il criterio dell' "Existence Confidence" e dell' "Identity Confidence": il primo si riferisce alla reale esistenza di uno specifico elemento in quel particolare luogo; il secondo, invece, sul margine di errore riguardante la scelta della tipologia di dato (ad esempio: si è certi della presenza in un dato luogo di una faglia, ma non si ha la certezza di che tipo di faglia essa sia).

Infine si è dato spazio anche all'incertezza che può presentarsi nel definire l'orientazione di strutture quali foliazioni, lineazioni, fratture, ecc. (strutture orientate appunto), dovuta ad una possibile imprecisione durante le operazioni di misura. Questo valore è di tipo angolare e viene inserito nel campo "Orientation Confidence Degrees".

Per spiegare le caratteristiche petrografiche dei litotipi mappati e i loro rapporti gerarchici, nonché la terminologia adottata per definirli, di seguito si rappresenta l'articolazione della struttura dati:

- Geologic Unit ID: chiave primaria
- Map Geologic Unit: termine identificatore dell'unità geologica (Phyllite, Gneiss, ecc.). I valori presenti in tale campo fungono da chiave esterna tra questa tabella e quella "Map Unit Polys").
- RockName: si è deciso di dedicare questo campo alla differenziazione generica delle diverse rocce metamorfiche in base al loro grado, e a quella tra rocce metamorfiche e sedimentarie

- RockDescription: questo campo testuale permette di dare una descrizione, inerente un particolare litotipo, basata sulle sue caratteristiche petrografiche o ulteriori, se disponibili e si riferisce al vocabolario GeoSciML “General Lithology” per la definizione dei vari litotipi.
- General lithology confidence: campo che serve ad esprimere l’appropriatezza del termine utilizzato in “General lithology”. I termini previsti sono: High, Medium, Low.
- Hierarchy Key: campo numerico che serve ad esplicitare le relazioni gerarchiche tra le diverse litologie o unità.

Ecco un riepilogo delle gerarchizzazioni usate come esempio:

1. Medium and high-grade metamorphic rocks
 - 1.1 Gneiss
 - 1.2 Marble
2. Low grade metamorphic rocks
 - 2.1 Phyllite
 - 2.2 Slate
3. Sedimentary rocks
 - 3.1 Alluvium
4. Other units
 - 4.1 Water.

Source ID: funge da chiave esterna per la tabella “Data Source”

Source: campo testuale atto alla descrizione generale della sorgente del dato.

Notes: campo testuale che fornisce una più completa descrizione della sorgente nelle sue modalità di acquisizione dei dati.

Per rappresentazione dei contorni dei poligoni che delimitano aree a litologia omogenea si è implementata la tabella “Contacts and Faults”

Geologic Unit Polys ID: chiave primaria

Geologic Unit: termine identificatore dell’unità geologica (Phyllite, Gneiss, ecc.). Chiave esterna alla tabella “Description of Geologic Units”.

Identity Confidence: campo in cui va inserito un termine esplicativo riguardo la confidenza con cui un determinato poligono è rappresentato da una specifica litologia. I termini consentiti sono: **certain, questionable, unspecified**.

Data Source ID: chiave esterna alla tabella “Data Sources”.

Questa struttura è stata pensata per inserire tutte quelle features lineari che fungono da contatto tra due litotipi differenti. Tuttavia anche una faglia può essere allo stesso tempo una superficie di contatto tra due diversi litotipi. Qualora diversamente la faglia, lungo la sua estensione, si presenti all’interno di un singolo litotipo, il suo carattere di contatto viene meno, dunque essa non farà

parte, per tutta la sua estensione, di questa feature class. Per le dislocazioni tettoniche, quindi per le faglie, si è fatto uso della feature "Faults", in cui sono stati inseriti tutti i segmenti rappresentanti una faglia, indipendentemente dalla loro possibile funzione di contatto. All'interno di quella specifica feature class lineare è stato dunque possibile caratterizzare tutti i tratti secondo degli attributi caratteristici delle faglie (movement sens, movement type, ecc.). Tornando alla tabella "Contacts and Faults", bisogna specificare che un unico contatto è stato poi anche suddiviso in ulteriori segmenti, in base al grado di certezza della natura del contatto o della posizione di quella particolare feature.

Contacts and Faults ID: chiave primaria

Type: possono essere inseriti diversi termini validi per diversi casi (contact, fault, waterline, glacier boundary, ecc.). In questo caso ciascun elemento è stato definito come "contact".

Is Concealed: questo campo serve a specificare se un contatto sia sepolto o meno, attraverso le semplici iniziali "N" o "Y".

Existence Confidence: termine indicante la certezza riguardo l'esistenza di un particolare contatto in uno specifico luogo. Anche in questo caso i valori consentiti sono "**certain, questionable, unspecified**".

Identity Confidence: termine indicante la certezza riguardo la tipologia di contatto assegnata ad un segmento. I valori consentiti sono "**certain, questionable, unspecified**".

Location Confidence Meters: incertezza in metri relativa alla posizione dell'elemento considerato.

Contact Character: termine che esprime la gradualità del contatto, se improvviso o gradato. In questo caso i termini sono principalmente netti, di conseguenza il termine utilizzato è "**abrupt**".

Contact Type: termine che esprime la tipologia di contatto. Come detto in precedenza, la concezione di contatto espressa da questo modello prevede un limite tra due litologie differenti. Il termine utilizzato è "lithologic boundary".

Per le faglie sono state considerate anche quelle strutture che fungono anche da limite geolitologico. Anche per le faglie è valso il discorso relativo ai contatti, ovvero sia anche esse possono essere state suddivise in più segmenti in base al grado di certezza sulla loro posizione o sulla loro tipologia.

Name: nome da associare alla faglia, in genere si utilizzano delle sigle (F1, F2, ecc.). La stessa sigla viene associata a più tratti di una medesima faglia.

Description: campo testuale libero che è stato utilizzato per suddividere i tratti di faglia in sepolti (concealed) o esposti (exposed), in mancanza di un campo specifico in merito.

Feature type: campo utilizzato per definire la tipologia di faglia in base al movimento relativo tra i blocchi (Normal fault, Transform Fault, ecc.).

Geologic history: campo testuale in cui va inserita, se nota, una breve ricostruzione della storia geologica di una specifica faglia.

Displacement: entità del rigetto in metri.

Movement type: tipologia di movimento, se verticale, inclinato o orizzontale (dip-slip, strike-slip, oblique slip-fault).

Movement sense: senso del movimento (destra o sinistra), nel caso di movimento orizzontale o obliquo.

Deformation style: stile deformativo della faglia. I termini da adottare sono "brittle", nel caso di una deformazione fragile, e "ductile", nel caso di una deformazione plastica.

Position accuracy meters: campo numerico in cui va espressa l'accuratezza del posizionamento di uno specifico tratto di faglia.

Position accuracy: campo testuale in cui si inserisce un termine che esprime a parole l'accuratezza del posizionamento. I termini accettati sono "accurate, approximate, indefinite".

Observation Method: il metodo con il quale si è osservata e posizionata la faglia.

Le stazioni di campionamento e misurazione sono state considerate come features puntuali, inserite inizialmente all'interno della mappa.

Stations ID: chiave primaria (S1, 2, ecc.). I valori devono essere unitari.

Map unit: l'unità o il litotipo in cui si trova la stazione. Esso viene ottenuto per intersezione con la feature class "GeologicUnit Polys". Funge da chiave esterna alla tabella "Description of Map Units".

Plot at scale: campo numerico in cui va inserito il denominatore della scala alla quale viene effettuata l'osservazione o la misurazione.

Location confidence meters: incertezza in metri relativa alla posizione dell'elemento considerato.

Location method: campo in cui va inserito un termine che indichi la tecnica di localizzazione della stazione. Tra gli esempi vi sono: "Recreational GPS (normalmente utilizzato nella maggioranza delle campagne di misurazione, ovvero sia un GPS di fascia di costo medio-bassa), Survey grade GPS, By inspection, By offset, ecc.

Time date: data in cui la stazione è stata localizzata ed esplorata.

Observer: nome della persona che ha localizzato la stazione.

Significant dimension meters: dimensione in metri della stazione, ovvero sia la sua estensione in affioramento.

GPS coordinates: coordinate GPS, misurate in campagna, della stazione.

Map coordinates: sistema di coordinate assegnato sulla mappa alla medesima stazione. Esse potrebbero variare rispetto a quelle ricevute dal GPS, magari per la consapevolezza, da parte del

rilevatore, di un errore dello strumento nella ricezione della posizione, o per evidenze topografiche che vincolano il posizionamento di una stazione (ad esempio la posizione relativa rispetto ad un punto preciso della topografia).

Data source ID: chiave esterna alla tabella "Data Sources".

Per quanto concerne le "Foliazioni" si è convenuta la creazione di una specifica tabella in cui sé possibile inserire tutte le foliazioni medie, stazione per stazione, di tutti i litotipi. Per ogni stazione possono essere presenti più foliazioni medie, caratteristiche di una sola litologia, o di due litologie, nel caso esse si trovino a contatto in corrispondenza della stazione in esame: in questo caso si è pensato opportuno assegnare alle stazioni di questo tipo più record, ovverosia più righe da riempire con ciascuna foliazione media. Tentando inoltre di sopperire alla mancanza di una feature class apposita, si è deciso di inserire all'interno di questa tabella anche le misurazioni relative alle fratture, o joints, differenziandole dalle foliazioni attraverso campi specifici e differenti simbolismi.

La struttura è la seguente:

Stations ID: chiave esterna tra questa tabella e quella "Stations". I valori sono univoci.

Map unit: indica a quale litotipo appartiene la foliazione evidenziata. Questo campo funge da chiave esterna tra questa tabella e "Map Unit Polys" e anche "Description of Map Units".

Plot at scale: campo numerico in cui va inserito il denominatore della scala alla quale viene effettuata l'osservazione o la misurazione.

Location confidence meters: incertezza in metri relativa alla posizione dell'elemento considerato. Va sempre riferita alla posizione della stazione di appartenenza.

Azimuth: valore numerico che indica la direzione del piano di foliazione o di frattura rispetto al N, misurata con la bussola. È stata seguita la regola della mano destra, e il valore previsto va da 0° a 360°. Il valore indicato in tabella è relativo alla ciclografica media (ciò vale anche per l'inclinazione).

Inclination: valore numerico che indica l'inclinazione del piano di foliazione o di frattura, misurata perpendicolarmente alla direzione del piano. Il valore può andare da 0° a 90°.

Identity confidence: campo testuale in cui va inserito un termine che specifichi il grado di certezza riguardante l'identità dell'oggetto che si è misurato (ad esempio se esso sia effettivamente un piano di foliazione o meno). Tra i valori previsti vi sono: "**certain, questionable, unspecified**".

Orientation confidence degrees: valore numerico che esprime l'incertezza in gradi riguardo il dato misurato. Questa incertezza nasce durante l'attività di misurazione, principalmente per possibili errori umani.

Location source ID: questo campo intende esprimere la sorgente che ha fornito la posizione della stazione di appartenenza di una data misura. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella "Data Sources".

Data source ID: questo campo, invece, intende esprimere la sorgente che ha fornito il dato misurato della foliazione, cioè da dove quella data misura proviene. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella "Data Sources".

Continuity: termine atto a distinguere il clivaggio continuo da quello disgiunto.

Defining element: in questo campo testuale è necessario inserire delle parole chiave che esprimano l'elemento che genera una particolare foliazione o frattura. Ad esempio una foliazione è in genere data dall'orientazione dei minerali secondo direzioni preferenziali (oriented particles), mentre le fratture possono essere definite come discontinuità nella roccia (discontinuity). È proprio attraverso questo campo che si è creata una differenziazione principale tra foliazioni e fratture.

Foliation type: questo campo si concentra in particolare sulle foliazioni, richiedendo dei termini specifici per indicare che tipo di foliazione caratterizza una determinata roccia. In genere la tipologia varia al variare del litotipo, motivo per il quale per ciascuna unità si è scelta una terminologia apposita, che fosse anche standardizzata da uno dei vocabolari GeoSciML, denominato appunto "Foliation type".

Intensity: campo testuale in cui va inserito un termine utile a definire quanto la foliazione sia sviluppata nella roccia. I termini previsti sono "**weak, moderate, strong**".

Mineral element: i minerali che definiscono la foliazione della roccia. Nel caso delle filladi, ad esempio, essi sono rappresentati in massima parte da miche. Nel caso dello gneiss invece la biotite e i feldspati.

Orientation: campo in cui va inserita l'orientazione della direzione di foliazione. È possibile riempire questo record con un dato numerico, ovvero il valore dell'angolo di direzione dei piani di foliazione, oppure con un dato testuale che esprima proprio l'orientazione di questi piani.

Spacing: dimensione lineare rappresentante la distanza tra i singoli piani di foliazione o di frattura, ovvero il spessore dei foliation domains. È possibile utilizzare questo campo anche per esprimere lo spessore degli strati costituiti da diversi contenuti mineralogici. Si possono utilizzare termini quali "millimetric, sub-millimetric, centimetric, ecc."

Per le lineazioni la struttura dati è la seguente:

Stations ID: chiave esterna tra questa tabella e quella "Stations". I valori sono univoci.

Geologic unit: indica a quale litotipo appartiene la lineazione evidenziata. Questo campo funge da chiave esterna tra questa tabella e "Geologic Unit Polys"

Plot at scale: campo numerico in cui va inserito il denominatore della scala alla quale viene effettuata l'osservazione o la misurazione.

Location confidence meters: incertezza in metri relativa alla posizione dell'elemento considerato. Va sempre riferita alla posizione della stazione di appartenenza.

Azimuth: valore angolare azimutale riferito alla direzione della lineazione misurata su un piano. Su due possibili valori quello prescelto è stato quello sul lato dell'immersione. I valori previsti vanno da 0° a 360°.

Inclination: valore angolare zenitale corrispondente all'ampiezza dell'angolo compreso tra la linea misurata e l'orizzontale. I valori previsti vanno da 0° a 90°.

Identity confidence: campo testuale in cui va inserito un termine che specifichi il grado di certezza riguardante l'identità dell'oggetto che si è misurato (ad esempio se esso sia effettivamente un clivaggio di crenulazione o meno). Tra i valori previsti vi sono: **“certain, questionable, unspecified”**.

Orientation confidence degrees: valore numerico che esprime l'incertezza in gradi riguardo il dato misurato. Questa incertezza nasce durante l'attività di misurazione, principalmente per possibili errori umani.

Location source ID: questo campo intende esprimere la sorgente che ha fornito la posizione della stazione di appartenenza di una data misura. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella “Data Sources”.

Data source ID: questo campo, invece, intende esprimere la sorgente che ha fornito il dato misurato della lineazione, cioè da dove quella data misura proviene. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella “Data Sources”.

Intensity: campo testuale in cui va inserito un termine utile a definire quanto la lineazione sia sviluppata nella roccia. I termini previsti sono “weak, moderate, strong”.

Lineation type: termine atto a definire il tipo di lineazione. Si possono usare termini appartenenti al vocabolario GeoSciML “Lineation Type”, in particolare “crenulation lineation”.

Mineral element: i minerali che definiscono la lineazione nella roccia. Nel caso delle filladi, ad esempio, essi sono rappresentati in massima parte da miche.

Orientation: campo in cui va inserita l'orientazione della direzione di lineazione. È possibile riempire questo record con un dato numerico, ovvero sia il valore dell'angolo di direzione della lineazione, oppure con un dato testuale che esprima proprio l'orientazione di queste linee.

Per le pieghe si è introdotta la seguente articolazione

Geologic unit: indica in quale litotipo la piega evidenziata è stata rinvenuta. Questo campo funge da chiave esterna tra questa tabella e “Map Unit Polys” e anche “Description of Map Units”.

Plot at scale: campo numerico in cui va inserito il denominatore della scala alla quale viene effettuata l'osservazione o la misurazione.

Location confidence meters: incertezza in metri relativa alla posizione dell'elemento considerato. Va sempre riferita alla posizione della stazione di appartenenza.

Azimuth: in questo campo è stato inserito il valore angolare dell'angolo azimutale corrispondente alla direzione del piano assiale. I valori previsti vanno da 0° a 360°.

Inclination: in questo campo è stato invece inserito il valore dell'angolo zenitale corrispondente all'inclinazione del piano assiale. I valori previsti variano da 0° a 90°.

Identity confidence: campo testuale in cui va inserito un termine che specifichi il grado di certezza riguardante l'identità dell'oggetto che si è misurato. Tra i valori previsti vi sono: **“certain, questionable, unspecified”**.

Orientation confidence degrees: valore numerico che esprime l'incertezza in gradi riguardo il dato misurato. Questa incertezza nasce durante l'attività di misurazione, principalmente per possibili errori umani.

Location source ID: questo campo intende esprimere la sorgente che ha fornito la posizione della stazione di appartenenza di una data misura. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella “Data Sources”.

Data source ID: questo campo, invece, intende esprimere la sorgente che ha fornito il dato misurato del piegamento, cioè da dove quella data misura proviene. Funge da chiave esterna rispetto alla tabella “Data Sources”.

Axial surface orientation: si inserisce in questo campo un termine volto a caratterizzare la geometria di una piega, in particolare quella della superficie assiale. Questa in genere non ha una diretta manifestazione fisica in campagna, tuttavia, essendo ugualmente una superficie geologica, presenta delle proprietà geometriche che in questo caso sono state espresse attraverso una terminologia generica (**upright, inclined, reclined, recumbent, overturned**).

Hinge line curvature: termine che serve ad esprimere la variazione dell'orientazione della linea di cerniera di una piega, distinguendo in tal senso le pieghe cilindriche da quelle non cilindriche. È possibile utilizzare termini quali **“sheath, dome, basin, cylindrical”**.

Hinge line orientation: per esprimere l'orientazione della linea di cerniera è possibile utilizzare sia specificazioni numeriche, cioè dei valori angolari, sia dei termini descrittivi quali **“vertical, sub-vertical, steeply plunging, ..., sub-horizontal, reclined, ecc.”**

Interlimb angle: questo campo sta ad indicare l'ampiezza dell'angolo formato dai fianchi di una piega, cioè l'apertura di quest'ultima. È possibile esprimere questa caratteristica geometrica con

dei valori angolari, oppure con dei termini specifici: gentle (120°-180°), open (70°-120°), close (30°-70°), tight (10°-30°), isoclinal (0°-10°).

Limb shape: in questo campo si differenziano i fianchi dritti da quelli curvi, distinguendo le seguenti pieghe: **kink, a chevron, sinusoidali**, ecc.

Profile type: questo campo serve a specificare la geometria di una piega in termini di concavità e convessità (**antiform, synform**) e in relazione ai rapporti geometrici e di età degli strati piegati (**anticline, syncline, monocline**, ecc.). Nel caso specifico non si sono raccolti i dati necessari per poter definire ciascuna piega secondo questo aspetto, motivo per cui il campo è stato lasciato vuoto.

Symmetry: caratteristica geometrica delle pieghe dipendente dai rapporti giacitureali tra i fianchi delle pieghe stesse: se le inclinazioni dei fianchi sono pressoché uguali si parla di pieghe simmetriche (symmetric), al contrario si tratta di pieghe asimmetriche (asymmetric).

In conclusione si ritiene aver realizzato un'infrastruttura, in grado di archiviare e relazionare dati geologici di campagna e di laboratorio, utile a fornire al petrologo un panorama ed un focus dettagliato sull'oggetto di interesse, come mai prima d'ora si è osservato.

2.4-SINTESI CONCLUSIVA

I dati geoscientifici ad oggi sono sempre più caratterizzati da livelli di approfondimento crescente, grazie alla maggiore diffusione di tecniche investigative via via più sofisticate.

Questa considerazione è ancor più valida se si pensa all'esigenza di organizzare in maniera logica ed interoperabile tutti i dati derivanti dalle analisi di tipo petrológico s.l. che vanno rapportati ad osservazioni multiscalarì cui sempre si rende necessario associare un livello di attendibilità.

Su tali basi operative questa parte del progetto di ricerca ha compreso lo sviluppo di metodi informatici per l'analisi di problematiche petrológiche ed una geodatabase infrastructure interoperabile capace di organizzare ed esporre dati di interesse geopetrologico, che al tempo stesso permetta di trattare ed elaborare dati articolati e spesso disaggregati con metodi geostatistici.

Nel capitolo successivo saranno applicate tecniche di geostatistica sui dati archiviati in questa infrastruttura.

3 - APPLICAZIONE GEOSTATISTICHE PER LA MAPPATURA GEOCHIMICA: ANALISI SEMIVARIOGRAFICA ED INTERPOLAZIONE DI INDICATORI PETROGENETICI MEDIANTE TECNICHE DI “KRIGING” SUI CAMPIONI PROVENIENTI DAL BATOLITE DELLE SERRE (CALABRIA, ITALIA)

3.1 - LE MAPPATURE GEOCHIMICHE: AMBITI E STUDI PRECEDENTI

Tra le molteplici rappresentazioni cartografiche in ambito geologico, in questi ultimi anni si è prestata maggiore attenzione in ambito internazionale alla realizzazione di mappature geochimiche che consentano di visualizzare le variazioni dei contenuti di alcuni elementi chimici rappresentativi sul territorio, per evidenziare la presenza di eventuali tendenze regionali e/o anomalie a fini modellistici, spesso di grande ausilio per lo studio geologico e geodinamico (Wang et al., 2003).

I dati geochimici su campioni di rocce hanno una grande rilevanza non solo da un punto di vista geologico ma anche per i risvolti in campo minerario, agricolo, forestale e di impatto ambientale sulla salute, soprattutto relativamente alla presenza di abbondanti concentrazioni di elementi inquinanti al di sopra delle soglie consentite.

Già nel 1988, nell'ambito dell'iniziativa cooperativa IGCP (International Geological Correlation Program) guidata da UNESCO e IUGS era stato intrapreso il progetto internazionale di mappatura geochimica IGCP 259 (1988-92); questo, aveva lo scopo di creare una rete di scienziati e organizzazioni che lavorassero all'obiettivo di redigere le mappe geochimiche planetarie. La relazione finale conteneva una rassegna completa dei metodi di mappatura geochimica su scala regionale e nazionale e dettagliava i requisiti necessari per la costruzione di un database geochimico globale esposto sulla rete mondiale, le norme per il campionamento a bassa densità sulla base del GRN (Global Reference Network).

Dal 1993 al 1997, il progetto è proseguito come Project 360, Global Geochemical Baselines, sotto la supervisione di Arthur Darnley, successivamente affiancato da David B. Smith e Xueqiu Wang. Il design del GRN è stato perfezionato ed i siti di campionamento sono stati selezionati in modo statisticamente casuale. In tale fase di progetto, grazie alla partecipazione di rappresentanti di oltre 100 paesi, sono stati concordati anche i metodi per eseguire una standardizzazione del campionamento geochimico, la preparazione del campione, l'analisi chimica e la gestione dei dati da utilizzare per condurre l'indagine geochimica su scala globale.

A seguito del completamento dei due progetti IGCP, la IUGS, in collaborazione con IAGC (International Association of Geochemistry), ha istituito, nel 1997, il Working Group on Global Geochemical Baselines, i cui obiettivi rimangono connessi ai temi sui processi di standardizzazione

dei metodi di campionamento, di analisi e di rappresentazione dei dati geochimici e dei database su scala internazionale.

La cartografia geochimica si è affermata dunque negli ultimi anni come uno strumento di fondamentale importanza per l'individuazione delle relazioni esistenti tra la distribuzione degli elementi nelle rocce, nei suoli e nelle acque e le relative implicazioni in diversi e numerosi ambiti, finanche in ambito forense (e.g., De Vivo et al., 2008; Sadeghi et al., 2013). Finora è stata meno utilizzata in studi di carattere geopetrologico, nonostante mostri ampie potenzialità nel suggerire interpretazioni petrogenetiche utili per ricostruzioni geologiche nel dominio spazio-temporale (Mamani et al, 2010). In un recente studio è stato dimostrato come la mappatura geochimica può rivelarsi uno strumento prezioso anche nell'analisi di processi geologici quali la subduzione e le dinamiche del mantello. Più in dettaglio, è stata analizzata la distribuzione spaziale di tre elementi con coefficienti di distribuzione molto simili tra loro (Ba, Th e Nb) nel sistema arco-fossa delle Marianne (Pearce et al., 2005). Le mappe di distribuzione hanno evidenziato l'esistenza di una componente Nb-Th-Ba (derivante da piccoli gradi di fusione parziale di un mantello precedentemente arricchito) localizzata nella parte settentrionale dell'arco, di una Th-Ba (di subduzione profonda) distribuita su tutto l'arco e in parte del bacino di retro-arco, e di una a solo Ba (di subduzione più superficiale) localizzata nella parte centrale e nei margini del bacino di retro-arco.

E' evidente come la mappatura geochimica in ambito geopetrologico può costituire un importante strumento per l'identificazione e lo studio di tutti quei processi geochimici che governano la distribuzione degli elementi nelle rocce ignee, sedimentarie e metamorfiche, ma può rivelarsi d'ausilio anche nel riconoscimento di lineamenti strutturali e di unità litologiche, permettendo di dettagliare ulteriormente le carte geologiche nelle aree d'interesse e consentendo, allo stesso tempo, di comprendere meglio i meccanismi petrogenetici.

Con riferimento all'area pilota, l'obiettivo di questa sezione di tesi è quello di fornire un metodo di indagine e di mappatura geochimica utile allo studio dei processi di messa in posto, interazione ed evoluzione magmatica dei corpi plutonici. L'area utilizzata come caso studio per la realizzazione delle mappature geochimiche è ubicata nella parte centro-orientale della Calabria in provincia di Catanzaro e ricade nel quadrilatero Squillace-Petrizzi-Copanella-Soverato. In particolare, i dati ottenuti a partire da analisi XRF (X-Ray Fluorescence) e ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) condotte su rocce plutoniche carbonifero-permiane affioranti nell'area di interesse sono stati trattati utilizzando algoritmi di interpolazione fondati sull'analisi geostatistica, i quali tengono conto della posizione geospaziale dei punti di campionamento ovvero della loro reciproca distanza per calcolare una stima probabilistica dei valori interpolati su tutta la superficie

areale ed, eventualmente, stimarne l'errore di interpolazione. Al fine di affrontare in maniera consapevole la strutturazione di un processo di interpolazione è stata di seguito redatta una sintesi dei concetti basilari di geostatistica, utili alla comprensione del lavoro svolto.

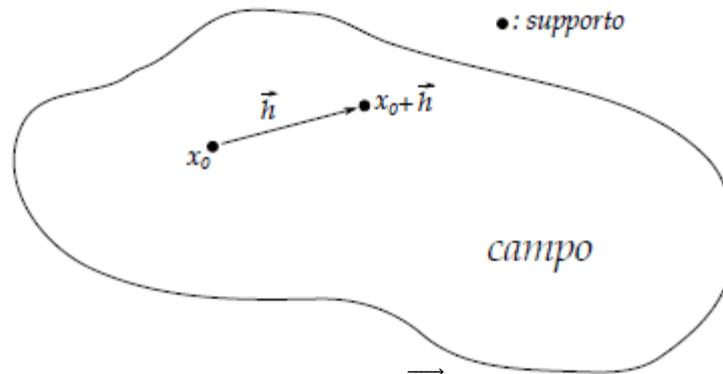
3.2 - CENNI DI GEOSTATISTICA E TECNICHE DI INTERPOLAZIONE¹

La Geostatistica studia i fenomeni naturali che si sviluppano su base spaziale a partire dalle informazioni derivanti da un loro campionamento. In particolare studia la variabilità spaziale dei parametri che descrivono i suddetti fenomeni, estraendone le regole in un quadro modellistico di riferimento e usandole per effettuare le operazioni volte a dare soluzione a specifiche problematiche riguardanti la caratterizzazione e la stima dei fenomeni stessi (Raspa e Bruno 1994a).

Si consideri un fenomeno che ha caratteristiche di variabilità spaziale. Indicando con $z(\vec{x})$ la variabile (es. concentrazione di un determinato elemento chimico) nel punto di coordinate planimetriche $\vec{x} = (u; v)$. Si possono dare le seguenti definizioni:

- **Variabile regionalizzata (VR)**
 - Si intende la funzione matematica $z(\vec{x})$ sopra introdotta. Il termine regionalizzata specifica che si tratta di una funzione numerica il cui valore dipende dalla localizzazione, espressa normalmente dalle coordinate spaziali, e che si presenta strutturata spazialmente.
- **Campo**
 - E' il dominio nel quale la variabile z è suscettibile di assumere determinati valori e, all'interno del quale, se ne studia la variabilità. Coincide con lo spazio di osservazione (o di indagine) del fenomeno in esame.
- **Supporto**
 - E' l'entità geometrica sulla quale la variabile z è definita od anche misurata; essa è caratterizzata dalle sue dimensioni e dalla sua forma. Quando le dimensioni sono molto piccole (rispetto alla scala del lavoro) il supporto può considerarsi puntuale.

¹ Il contenuto del presente paragrafo attinge per larga parte dalle dispense del modulo di Geostatistica del corso integrato "Calcolo delle Probabilità e Geostatistica" del Prof. Ing. Giuseppe Raspa, Università La Sapienza di Roma ed al lavoro di tesi dell'Ing. Alessio Pugliese



Schema 1 – Punti distanti $|\vec{h}|$ nel campo

3.2.1-Approccio probabilistico

Secondo la definizione data di Variabile Regionalizzata la funzione $z(\vec{x})$ che descrive il fenomeno in esame è chiaramente una funzione deterministica.

Consideriamo ora un particolare punto \vec{x}_0 del campo, in esso si può identificare una variabile aleatoria (VA) continua $Z(x_0)$, cioè una variabile che assume valori numerici appartenenti ad un certo intervallo secondo una legge di densità di probabilità $f_0(Z)$. In queste condizioni il valore deterministico $z(\vec{x}_0)$ può essere considerato come una realizzazione della VA $Z(x_0)$. Così come in x_0 può essere definita una VA in ogni altro punto generico x del campo; allora l'insieme di tutte le VA definite nel campo costituisce una Funzione Aleatoria (FA).

La FA $Z(x)$ sarà caratterizzata dall'insieme di tutte le funzioni di distribuzione multi variabili che si possono definire nel campo per qualsiasi intero k e per qualsiasi configurazione dei k punti x_1, x_2, \dots, x_k :

$$F_{Z_1, \dots, Z_k}(z_1, \dots, z_k) = \text{prob}\{Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k\} \quad (3.1)$$

Questo insieme di funzioni, data la natura spaziale del fenomeno che si vuole modellizzare, costituisce la legge spaziale della FA $Z(x)$; nel caso di indipendenza a due a due delle variabili Z_1, \dots, Z_k , la legge spaziale $Z(x)$ si riduce all'insieme di funzioni di distribuzione monovariabile:

$$F_{Z(x)}(z) = \text{prob}\{Z(x) < z\} \quad \forall x \in S \quad (3.2)$$

dove per S è inteso il dominio (campo).

Il vantaggio dell'approccio probabilistico è quello di poter far uso di modelli di cui è necessario stimare i parametri a partire dai dati di campionatura del fenomeno. Per ciò che concerne le stime (o predizioni in termini statistici) sarà sufficiente la conoscenza dei primi due momenti della funzione aleatoria e della funzione più comune in ambito geostatistico, ovvero la funzione variogramma:

- **Momento Primo**

- Sia S il campo di indagine, in accordo con l'interpretazione probabilista, in ogni punto $x \in S$ è definita una VA $Z(x)$ tale che il suo momento primo è dato da¹:

$$\blacksquare m(x) = E[Z(x)] \quad (3.3)$$

- **Momento Secondo**

Si considerino due punti x_1 e x_2 di S , la covarianza in quei punti tra le variabili aleatorie $Z(x_1)$ e $Z(x_2)$ è data da:

$$\blacksquare \text{Cov}(x_1; x_2) = E[(Z(x_1) - m(x_1))(Z(x_2) - m(x_2))] = E[Z(x_1)Z(x_2)] - m(x_1)m(x_2) \quad (3.4)$$

- se i due punti coincidono si ottiene la varianza²

$$\blacksquare \text{Var}(x) = \text{Cov}(x; x) = E[Z^2(x)] - E[Z(x)]^2 \quad (3.5)$$

- **Variogramma**

Sia S il dominio di variabilità della FA $Z(x)$ e siano x_0 e $x_0 + \vec{h}$ una coppia di punti di S e distanti $|\vec{h}|$ (vedi schema 1). La differenza tra $Z(x_0)$ e $Z(x_0 + \vec{h})$ definisce una nuova variabile aleatoria detta incremento:

$$\blacksquare Z(x_0 + \vec{h}) - Z(x_0)$$

- Si definisce “**variogramma**” la sua semivarianza:

$$\blacksquare \gamma(x_0; +\vec{h}) = \frac{1}{2} \text{Var}\{Z(x_0 + \vec{h}) - Z(x_0)\} \quad (3.6)$$

Con questi strumenti statistici è possibile caratterizzare il modello di FA preso in considerazione per lo studio del fenomeno in esame.

Molto spesso però è utile poter restringere il dominio della FA ad una piccola porzione del campo, riducendo così lo studio ad un problema locale in modo da poter controllare meglio le statistiche associate e le stime conseguenti: questa porzione di campo viene chiamata “*vicinaggio*”. L'idea di restringere il campo di applicazione del modello deriva dall'ipotesi di poter traslare il *vicinaggio* in modo da coprire tutto il dominio e per questo motivo viene definito anche “*vicinaggio mobile*”. L'artificio del *vicinaggio mobile* risulta molto utile nella distinzione dei modelli descrittivi del fenomeno naturale che si vuole studiare.

¹ Si ricorda che per definizione il valore atteso di una variabile casuale continua con funzione densità di probabilità $f(z)$ è dato da

$$E[Z] = \int_{-\infty}^{+\infty} z f(z) dz$$

² per definizione la varianza di Z è definita come il valore atteso al quadrato della variabile aleatoria centrata $Y = Z - E[Z]$:

$$\text{Var}(Z) = E[Y^2] = E[(Z - E[Z])^2]$$

3.2.2-Modelli stazionari

I modelli stazionari si basano sulla proprietà di stazionarietà strictu sensu della funzione aleatoria, ovvero sull'invarianza per traslazione della legge spaziale del processo aleatorio. Più precisamente, preso un qualsiasi insieme di k punti $x_1; \dots; x_k$ del campo S e un qualsiasi vettore \vec{h} , i due vettori aleatori $\{Z(x_1) \dots Z(x_k)\}$ e $\{Z(x_1 + \vec{h}) \dots Z(x_k + \vec{h})\}$ hanno la stessa funzione di distribuzione k -variabile di probabilità.

Piuttosto che fare riferimento alla legge di distribuzione, a fini pratici, risulta molto più comodo associare direttamente la stazionarietà ai momenti primo e secondo dei quali si contraddistingue una determinata legge di distribuzione.

3.2.3-Modelli stazionari di ordine 2

Un modello di FA si dice stazionario di ordine 2 quando sono verificate entrambe le due seguenti condizioni:

1. il momento primo esiste ed è invariante rispetto ad x ;
2. la covarianza, o momento secondo, esiste e non dipende dalla posizione assoluta dei punti, ma dalla loro reciproca distanza.

Con la prima condizione si assume che il momento primo (la media) è costante su tutto il dominio, ovvero:

$$m(x) = E[Z(x)] = \text{cost. } \forall x \in S \quad (3.7)$$

Nella seconda condizione, detta \vec{h} la distanza tra i punti x_1 e x_2 tale che $x_2 = x_1 + \vec{h}$, si ammette che $\text{Cov}(x_1; x_2)$ è una funzione di \vec{h} :

$$\text{Cov}(x_1, x_2) = C(x_1, x_1 + \vec{h}) = C(\vec{h}) \quad (3.8)$$

si nota che per $|\vec{h}| \rightarrow 0$ la covarianza decade nella varianza che è quindi anch'essa invariante per traslazione:

$$\lim_{|\vec{h}| \rightarrow 0} C(x_1, x_1 + \vec{h}) = \text{Var}(x_1) = C(0) \quad (3.9)$$

la funzione $C(\vec{h})$ viene chiamata funzione covarianza ed esprime la correlazione tra le variabili $Z(x)$ e $Z(x + \vec{h})$ in funzione della mutua distanza tra i punti del campo. In base alle assunzioni fatte è possibile trovare una formulazione compatta per la funzione variogramma; infatti, tenendo conto dell'invarianza per traslazione del momento primo $E[Z(x + \vec{h})] = E[Z(x)]$, per la (3.6) avremo che:

$$\gamma(x, \vec{h}) = \frac{1}{2} E[(Z(x + \vec{h}) - Z(x))^2] \quad (3.10)$$

sviluppando nell'equazione (3.10) il quadrato del binomio al secondo membro e sfruttando la linearità dell'operatore E (valore atteso), si ha:

$$\gamma(x, \vec{h}) = \frac{1}{2} (\text{Var}\{Z(x + \vec{h})\} + \text{Var}\{Z(x)\} - 2 \text{Cov}\{Z(x + \vec{h}), Z(x)\}) \quad (3.11)$$

in virtù dell'ipotesi di invarianza per traslazione del momento secondo $\text{Var}\{Z(x + \vec{h})\} = \text{Var}\{Z(x)\}$, per cui la (3.11) diventa:

$$\gamma(x, \vec{h}) = \frac{1}{2} [2 \text{Var}\{Z(x)\} - 2C(\vec{h})] \quad (3.12)$$

Infine, tenendo conto della (3.9), si giunge alla formulazione compatta:

$$\gamma(\vec{h}) = C(0) - C(\vec{h}). \quad (3.13)$$

Questa formulazione dimostra che la funzione variogramma, sotto le ipotesi di stazionarietà, è strettamente legata alla funzione covarianza e si può affermare che anche il variogramma è invariante per traslazione.

Poiché, come è ragionevole pensare, la correlazione tra le variabili $Z(x)$ e $Z(x + \vec{h})$ tende ad indebolirsi con l'aumentare della mutua distanza $|\vec{h}|$ tra i punti, si ha che la funzione $C(\vec{h})$ tende a decrescere con h , fino a potersi annullare se le due variabili diventano indipendenti. La funzione variogramma risulta pertanto limitata superiormente da un "sill" (o soglia) (Figura 22), e tale limite è la varianza $C(0)$.

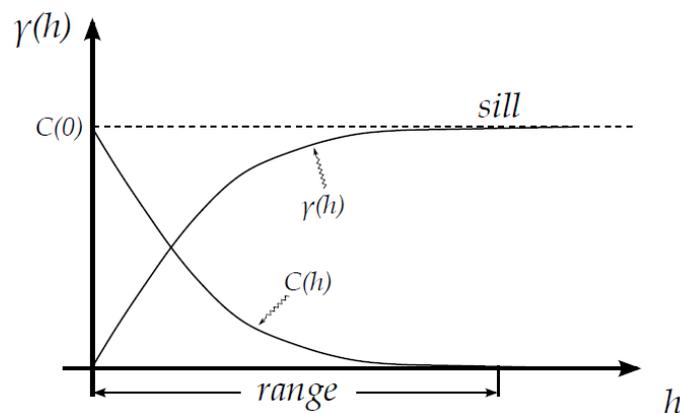


Figura 22 - Andamento delle funzioni covarianza $C(\mathbf{h})$ e variogramma $\gamma(\mathbf{h})$ in funzione della distanza \mathbf{h}

3.2.4-Modelli non stazionari

Le FA non stazionarie sono quelle che soddisfano anche solo una delle due seguenti condizioni:

1. la media $E[Z(x)] = m(x)$ non è costante nel campo;
2. la funzione covarianza non è invariante per traslazione.

Dato che gran parte dei fenomeni naturali descritti da una variabile regionalizzata ha caratteristiche spiccatamente non stazionarie, si cerca di ricondurre l'analisi alle più favorevoli condizioni di stazionarietà attraverso due approcci: il primo considera la *deriva* della FA, il secondo lavora sugli *accrescimenti*.

3.2.5-Modelli con deriva

La FA presenta un trend, vale a dire una variazione sistematica della variabile più o meno accentuata. Tale comportamento può essere modellato considerando la media della variabile calcolata su vicinaggi mobili all'interno dell'area di indagine.

La FA $Z(x)$ viene decomposta in due componenti, una deterministica rappresentata dalla sua media $m(x) = E[Z(x)]$ e detta anche deriva, l'altra stocastica definita residuo $Y(x) = Z(x) - m(x)$. La media viene modellizzata da una funzione polinomiale:

$$m(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^K a_k f_k(\mathbf{x}) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy + \dots \quad (3.14)$$

dove a_k sono coefficienti da stimare e $f_k(x)$ sono monomi di grado crescente delle coordinate spaziali dei punti. La stazionarietà è garantita dal fatto che la media dei residui risulta costante poiché nulla.

3.2.6-Modello intrinseco di ordine k

Piuttosto che considerare in ciascun punto la variabile $Z(x)$ è conveniente riferirsi all'accrescimento $Z(x + \vec{h}) - Z(x)$, ovvero considerare, in maniera più generale, una *combinazione lineare autorizzata*¹ di ordine k della FA $Z(x)$ ²:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.15)$$

dove λ_i sono coefficienti da stimare.

Affinché tale combinazione possa definirsi stazionaria è necessario che venga soddisfatto il vincolo:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f_l(x_i) = 0 \quad \text{con } l = 0, \dots, k \quad (3.16)$$

con $f_l(x_i)$ monomi di grado l delle coordinate spaziali degli n punti. Si può riconoscere che l'accrescimento stazionario $Z(x + \vec{h}) - Z(x)$ è una combinazione lineare autorizzata di ordine 0 a coefficienti rispettivamente 1 e -1.

3.2.7-Variogramma sperimentale e teorico

La stima della funzione variogramma viene effettuata sulla base dei dati provenienti dal campionamento del fenomeno oggetto di studio o da altri dati puntuali indiretti. A partire

¹ per autorizzata si intende che la combinazione lineare ammette varianza finita.

² anche detta FAI-k: Funzione Aleatoria Intrinseca di ordine k

dall'espressione (3.10), scelta una direzione¹ principale, il calcolo del variogramma sperimentale viene effettuato sugli n punti del campo dei quali si hanno informazioni attraverso uno stimatore:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3.17)$$

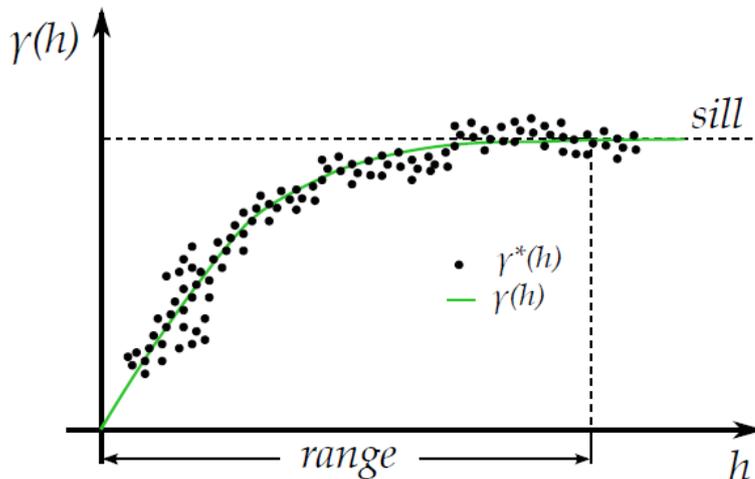


Figura 23- Variogramma sperimentale con valore di soglia fittato dal variogramma

L'andamento del variogramma sperimentale in funzione di h esprime la variabilità del fenomeno considerato e ne rivela il comportamento stocastico, suggerendo di fatto il modello di FA da adottare.

Il variogramma sperimentale può essere analizzato ponendo l'attenzione in due zone principali del grafico:

- **vicino l'origine**

Per $h \rightarrow 0$ è possibile distinguere tre diversi comportamenti riferibili alla regolarità della VR:

1. parabolico. Elevata regolarità e continuità della VR;
2. lineare. Continuità, ma non regolarità della VR;
3. discontinuo. VR con andamento irregolare. La variabilità tra due punti vicini è molto elevata, si ha il cosiddetto effetto pepita (o nugget) nell'origine.

- **per h crescenti**

All'aumentare di h il variogramma aumenta di valore ed evolve secondo due forme:

- raggiunge un valore di soglia (sill). FA stazionaria;

¹ le variabili regionalizzate possono presentare differente variabilità spaziale in funzione della direzione presa per il calcolo del variogramma sperimentale, ciò è dovuto alla presenza di anisotropie tipiche dei fenomeni naturali.

- aumenta indefinitamente. FA non stazionaria.

Data l'evidente scarsa praticità dei variogrammi sperimentali si utilizzano funzioni analitiche che vengono assunte comunemente per descriverne il comportamento. Tali funzioni devono rispondere a determinate proprietà matematiche integrando le principali caratteristiche dei variogrammi:

1. è positiva $\gamma(h) \geq 0$
2. per $h = 0$ si ha $\gamma(0) = 0$
3. è una funzione pari $\gamma(h) = \gamma(-h)$
4. quando la FA è stazionaria $\gamma(h) = C(0) - C(h)$
5. cresce all'infinito meno rapidamente rispetto ad h^2 :

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\gamma(h)}{h^2} = 0 \quad \text{quando } h \rightarrow 0 \quad (3.18)$$

6. deve essere tale da dar luogo a *combinazioni lineari autorizzate*.

La letteratura geostatistica propone alcune funzioni matematiche (Figura 24) adatte a descrivere il comportamento del variogramma sperimentale; una volta scelta la funzione opportuna, tramite il *fitting* dei parametri (solitamente con tecniche ai minimi quadrati) si ottiene il *variogramma teorico*; il risultato è una funzione continua e derivabile $\forall h \in [0; +\infty]$.

3.2.7.1-Modello Pepitico

$$\gamma(h) = c(1 - \delta(h)) \quad \text{dove } \delta(h) = \begin{cases} 1 & \text{in } r = 0 \\ 0 & \forall r \neq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

dove $\delta(h)$ è la funzione impulso di Dirac, il parametro c esprime il *sill* del variogramma. Questo modello esprime una discontinuità nell'origine.

3.2.7.2-Modello Sferico

$$\gamma(h) = \begin{cases} c\left(\frac{3h}{2r} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{r^3}\right) & \text{per } 0 \leq h \leq r \\ c & \text{per } h > r \end{cases} \quad (3.20)$$

r e c sono parametri del modello ed esprimono rispettivamente *range* e *sill*. Il comportamento vicino l'origine è lineare.

3.2.7.3 -Modello Esponenziale

$$\gamma(h) = c\left(1 - e^{-\frac{h}{r}}\right) \quad \text{per } h \geq 0 \quad (3.21)$$

In questo caso il valore c di *sill* è raggiunto asintoticamente, pertanto il *range* risulta infinito. Nella pratica il valore di *range* viene considerato alla distanza per la quale viene raggiunto il 95% del *sill*, cioè pari a circa $3r$.

3.2.7.4-Modello Gaussiano

$$\gamma(h) = c\left(1 - e^{-\frac{h^2}{r^2}}\right) \quad \text{per } h \geq 0 \quad (3.22)$$

come per il modello esponenziale il *range* viene calcolato considerando la distanza alla quale viene raggiunto il 95% del *sill*, ovvero a circa $\sqrt{3}r$.

3.2.7.5-Modelli Potenza

Sono modelli che non prevedono la presenza di un valore di soglia, ma crescono indefinitamente e vengono utilizzati per FA non stazionarie.

$$\gamma(h) = ch^\beta \quad (3.23)$$

dove $c > 0$ e $\beta \in (0; 2)$ Con $\beta = 1$ si ottiene un modello lineare, spesso utilizzato nella pratica per FA intrinseche di ordine 0 (v. Castiglioni 2009).

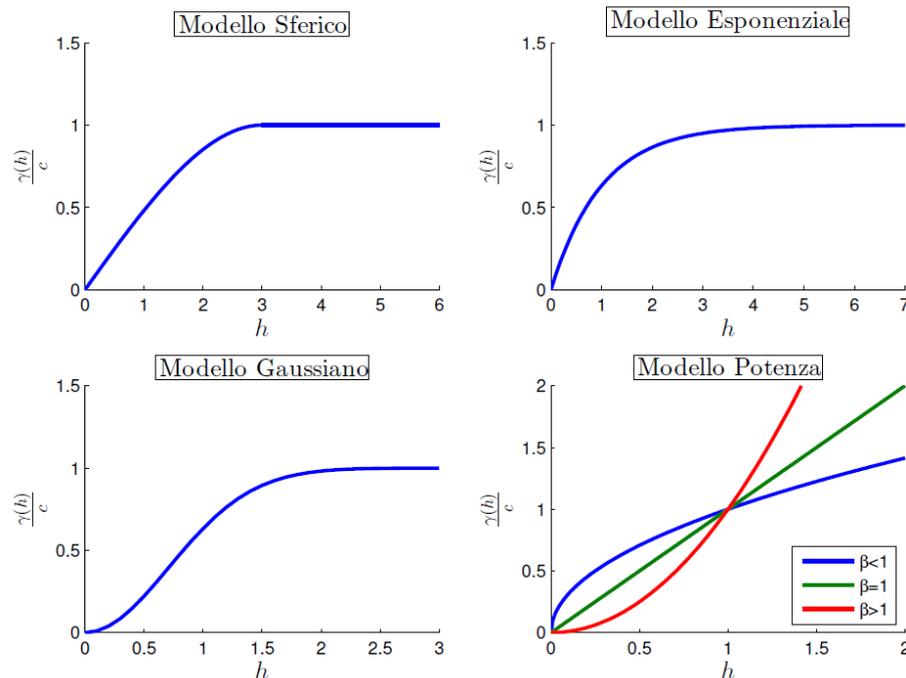


Figura 24 - Grafici qualitativi dei variogrammi teorici elementari più utilizzati in geostatistica

Le funzioni appena citate fanno riferimento ad un comportamento ideale nell'origine del variogramma sperimentale; se, al contrario, questo dovesse presentare un effetto pepitico o

nugget (discontinuità nell'origine) è essenziale fittare un modello con un parametro aggiuntivo che esprime lo *shift* verso l'alto del variogramma nell'origine:

$$g(h) = nug + \gamma(h) \quad (3.24)$$

dove per *nug* si intende una costante positiva e uno dei modelli sopra proposti.

Ci si può trovare nella condizione in cui nessuno dei precedenti modelli interpreti al meglio il sperimentale, pur tuttavia si può riconoscere nel suo andamento una serie di strutture note, dette anche a strutture annidate riconducibili a variogrammi teorici elementari. Sfruttando il principio della sovrapposizione degli effetti si può dimostrare che, se $Z(x)$ è composta dalla somma di m variabili indipendenti e stazionarie $Z_i(x)$ con $i = 1; \dots; m$ aventi ciascuno variogramma $\gamma_i(h)$, anche il suo variogramma $\gamma(h)$ può essere espresso come:

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^m \gamma_i(h) \quad (3.25)$$

3.3-TECNICHE DI STIMA

Nei problemi geostatistici è di fondamentale importanza riuscire a prevedere il comportamento della variabile regionalizzata in punti dello spazio in cui non è nota. Tale procedura viene detta *stima* e viene normalmente utilizzata per la produzione di carte tematiche.

L'operazione di stima ha carattere locale, in quanto solitamente non riguarda le caratteristiche generali (o globali), ma studia la variabilità alla piccola scala, in un dominio ristretto detto *vicinaggio di stima*. Gli stimatori più adatti e più usati per questo tipo di operazione sono quelli *lineari*, cioè sono combinazioni lineari della variabile nei punti noti del campo situati nelle vicinanze del punto da stimare.

Consideriamo n punti del campo x_i con $i = 1, \dots, n$, disposti casualmente, nei quali risulta nota la variabile regionalizzata $z(x_i)$; sia $Z(x)$ la FA stazionaria assunta per descrivere in senso probabilistico il fenomeno di studio e siano $C(h)$ e $\gamma(h)$ rispettivamente le funzioni covarianza e variogramma. È possibile esprimere la stima della in un punto qualsiasi x_0 del campione come:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.26)$$

dove i λ_i sono costanti incognite chiamate ponderatori.

Alla stima (3.26) è associato l'errore di stima $\varepsilon(x_0)$, risultante dalla differenza tra la variabile *stimata* e quella *esatta*:

$$\varepsilon(x_0) = Z(x_0) - Z^*(x_0) = Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.27)$$

Si dice che lo stimatore è *corretto* se risulta:

$$E[\varepsilon(x_0)] = E\left[Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right] = 0 \quad (3.28)$$

ovvero:

$$E[Z(x_0)] - \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(x_i)] = 0 \quad (3.29)$$

per l'ipotesi fatta di stazionarietà $E[Z(x)] = m = \text{cost} \quad \forall x \in S$ la (3.29) si riduce a:

$$m \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right] = 0$$

ottenendo infine l'importante condizione sui ponderatori:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3.30)$$

Non avendo a disposizione la funzione di densità per la VA, non la si può avere nemmeno per l'errore di stima. L'accuratezza della stima nel punto x_0 può, però, essere valutata a partire dalla *varianza di stima* $\sigma_s^2(x_0)$ intimamente legata alla covarianza e alla funzione variogramma della VA.

Riprendendo la definizione di varianza data dalla (3.5) si ha per la varianza di stima:

$$\text{Var}_s(x_0) = \sigma_s^2(x_0) = E\left[\left(Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right)^2\right] \quad (3.31)$$

sviluppando il quadrato del binomio a secondo membro si ottiene:

$$\sigma_s^2(x_0) = E\left[Z^2(x_0) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j Z(x_i) Z(x_j) - 2 \sum_i \lambda_i Z(x_i) Z(x_0)\right]$$

tenendo conto delle (3.4), (3.9) e delle proprietà di linearità dell'operatore *valore atteso* si ha:

$$\begin{aligned} \sigma_s^2(x_0) &= C(0) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_0) \\ &= C(0) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j (C(0) - \gamma(h_{i,j})) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i (C(0) - \gamma(h_{i,0})) \end{aligned}$$

tenendo in considerazione la (3.30) si ottiene infine:

$$\sigma_s^2(x_0) = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i,0} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma_{i,j} \quad (3.32)$$

La (3.32) mette in evidenza che la varianza di stima σ_s^2 non dipende dalla covarianza ma solo dal variogramma, quindi può essere rimossa l'ipotesi di stazionarietà globale introdotta in precedenza.

I ponderatori λ_i , che consentono di effettuare la stima della variabile regionalizzata in punti non noti, sono parametri del modello di stima e possono essere individuati con diverse tecniche che fanno riferimento a due approcci principali:

1. *tecniche deterministiche*: non tengono in considerazione le caratteristiche dell'approccio probabilistico e si basano su impostazioni prettamente geometriche;
2. *tecniche geostatistiche*: meglio conosciute come Kriging sono tecniche di regressione che permettono di individuare i ponderatori minimizzando la varianza di stima.

3.3.1-Tecniche deterministiche

Le principali tecniche deterministiche, come già accennato, sono quelle che prescindono dal contesto aleatorio e calcolano i ponderatori in funzione della distribuzione esclusivamente geometrica dei punti noti nel vicinaggio di stima. Una prima tecnica, storicamente utilizzata soprattutto in ambito idrologico, è la poligonazione di Thiessen (o tassellazione di Dirichlet-Voronoi), che prevede la costruzione di tasselli aventi come vertici gli ortocentri dei triangoli formati congiungendo i punti noti. All'interno di ogni tassello o poligono ricadrà una sola misura della variabile regionalizzata e si assume che tale valore sia costante sull'intero dominio V_i individuato dal poligono i -esimo. I ponderatori quindi banalmente discriminano tra l'appartenenza all'uno o all'altro tassello, ciò può essere espresso come:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & \text{se } x_0 \in V_i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.33)$$

I limiti evidenti di questa tecnica risiedono in primo luogo nell'assumere costante il valore della variabile all'interno di un' area più o meno estesa (ipotesi piuttosto stringente) e nella discontinuità della stima: l'andamento a gradini fa sì che tra i punti di confine, ai margini dei tasselli, si può passare da un valore all'altro della variabile in infinitesimi di distanza.

La seconda tecnica che più realisticamente può interpretare il comportamento della variabile regionalizzata, superando le incongruenze della poligonazione di Thiessen, è quella della *distanza inversa*. I ponderatori da attribuire ai campioni compresi entro il vicinaggio di stima hanno un

peso proporzionale all'inverso della distanza euclidea di fra il punto noto x_i e il punto da stimare x_0 , elevata ad un esponente di ordine $p \in R^+$ ovvero:

$$\lambda_i = \frac{k}{d_i^p} \quad \text{con} \quad k = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^p}} \quad e \quad i, j = 1, \dots, n \quad (3.34)$$

dove la potenza p , detta ordine della distanza può variare a seconda della variabile regionalizzata da interpolare: scelte diverse della potenza p implicano stime diverse. Bisogna considerare, però, che per $p \rightarrow 0$ i pesi tendono ad assumere valori simili anche per distanze elevate fino al limite in cui la stima si riduce ad una media aritmetica (tutti i ponderatori sono uguali), al contrario se $p \rightarrow 1$ si ottiene il caso limite in cui la stima si riduce ad una poligonazione.

3.3.2-Tecniche geostatistiche (o Kriging)

Le tecniche geostatistiche di stima prevedono la formulazione della FA in un processo aleatorio associato alla variabile regionalizzata attraverso lo studio degli indici statistici come, per esempio, il variogramma. Tra le tecniche di stima principali spiccano quelle del Kriging, le quali in letteratura anglosassone vengono definite B.L.U.E. (Best Linear Unbiased Estimator) che sta ad indicare come il Kriging sia in grado di fornire stime non deviate ed esatte.

Le tecniche di "krigaggio" sono diverse a seconda della condizioni in cui opera la FA (se stazionarie o non stazionarie), ma discendono tutte da un logica matematica comune. Come si è visto, la varianza di stima σ_s^2 , ricavata nell'equazione (3.32), esprime la qualità e la correttezza della stima, per cui è immediato porsi come obiettivo la ricerca di quei ponderatori che la rendano minima, nel senso di una maggiore precisione. Il problema appena esposto può essere risolto utilizzando il metodo di ottimizzazione dei moltiplicatori di Lagrange sotto opportune condizioni di vincolo¹.

3.4.2.1-Kriging Ordinario

Si tratta di applicare il metodo dei moltiplicatori di Lagrange all'equazione (3.32) sotto il vincolo di stima corretta (o non deviata) data dalla (3.30). Sia $\mu \in R$ il parametro lagrangiano incognito, la funzione lagrangiana è data da:

$$\mathcal{L}(\vec{\lambda}, \mu) = \underbrace{2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i,0} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma_{i,j}}_{\sigma_s^2} + \underbrace{2\mu \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right)}_{\text{vincolo}} \quad (3.35)$$

si tratta, quindi, di risolvere il sistema di minimo vincolato dato da:

¹ le le tecniche geostatistiche di stima introdotte in questo capitolo sono quelle che serviranno nelle applicazioni. Si ricorda che esiste anche il "Kriging semplice", che prescinde dall'ottimizzazione con i moltiplicatori di Lagrange.

$$\nabla \mathcal{L}(\vec{\lambda}, \mu) = 0 \quad (3.36)$$

ovvero:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} = 2\gamma_{i,0} - 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{i,j} - 2\mu = 0 & \text{per } i = 1, \dots, n \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu} = 2(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) = 0 \end{cases}$$

si ottiene quindi il sistema lineare di $n + 1$ equazioni in $n + 1$ incognite:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{i,j} + \mu = \gamma_{i,0} & \text{per } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3.37)$$

che scritto in forma esplicita:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \gamma_{1,1} + \lambda_2 \gamma_{1,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{1,n} + \mu &= \gamma_{1,0} \\ \lambda_1 \gamma_{2,1} + \lambda_2 \gamma_{2,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{2,n} + \mu &= \gamma_{2,0} \\ &\vdots \\ \lambda_1 \gamma_{n,1} + \lambda_2 \gamma_{n,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{n,n} + \mu &= \gamma_{n,0} \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n &= 1 \end{aligned} \quad (3.38)$$

il sistema precedente scritto in termini matriciali diventa:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \dots & \gamma_{1,n} & 1 \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \dots & \gamma_{2,n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n,1} & \gamma_{n,2} & \dots & \gamma_{n,n} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,0} \\ \gamma_{2,0} \\ \vdots \\ \gamma_{n,0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

La (3.39) mostra che la matrice dei coefficienti Γ e il termine noto \mathbf{g}_0 dipendono unicamente dalla funzione variogramma, che, come si è visto, è possibile calcolare (teoricamente¹) in tutti i punti

¹ S'intende che si ha già a disposizione un variogramma teorico.

del campo; per cui, se le posizioni i-esime dei punti sono distinte, il sistema ammette sempre un'unica soluzione. Concludendo è possibile calcolare per ogni punto x_0 una n-pla $\vec{\lambda}$ di ponderatori λ_i risolvendo il sistema lineare (3.39):

$$\lambda = \Gamma^{-1} g_0$$

3.4-STUDIO GEOPETROLOGICO DELLE ROCCE PLUTONICHE DI SQUILLACE-PETRIZZI¹

Le rocce plutoniche affioranti nell'area pilota costituiscono un corpo intruso nel basamento metamorfico di grado medio-alto, quest'ultimo rappresentato principalmente da paragneiss a biotite, sillimanite e granato. La loro composizione varia da tonaliti biotitico-anfiboliche (diffuse su un'area di circa 11 Km²) a tonaliti biotitiche (che ricoprono un'area di circa 14 Km²). Nell'area si riscontrano, inoltre, masse basiche e corpi granitoidi minori (intrusioni in tonaliti in prossimità della località Petrizzi). In particolare, le masse basiche sono rappresentate da gabbri anfibolico-biotitici non foliati con grana molto variabile (da fine a media) generalmente inferiore rispetto a quella della matrice inglobante con spessori anche superiori ai 5 m ed estensione di circa 20-30 m.; mentre, i corpi granitoidi minori che ricoprono un'area complessiva di 0,03 Km² in prossimità di Petrizzi, sono rappresentati da graniti a due miche e sillimanite complessivamente a grana fine localmente eterogenea a causa della presenza di cristalli di K-feldspato (dimensioni max 2 cm).

Le tonaliti di Squillace-Petrizzi presentano una struttura olocristallina granulare. Sono costituite da plagioclasio idiomorfo (40-55% modale; dimensione media 3 mm, generalmente geminato albite/albite-Karlsbad), biotite (11-30% modale; subidiomorfa a pacchetti di circa 2 mm) e anfibolo (del tipo orneblenda <5% modale, da subidiomorfa a idiomorfa, cristalli prismatici che raggiungono 1 cm; rara cummingtonite a geminazione polisintetica) e quarzo interstiziale (14-34% modale), con K-feldspato, muscovite (solo nei termini più leucocratici e in quantità modeste <2%), epidoto, apatite, ilmenite e granato come minerali accessori. Tra i minerali accessori

¹ L'inquadramento geopetrologico di quest'area è stato redatto sulla base degli studi di Caggianelli, 1988

particolarmente diffuso l'epidoto (lunghezza max 4 mm), zonato con allanite al nucleo e clinozoisite o epidoto s.s. al bordo; il granato, invece, si ritrova esclusivamente nelle parte periferiche del plutone, nelle vicinanze del basamento; la sua distribuzione e le sue dimensioni risultano del tutto irregolari.

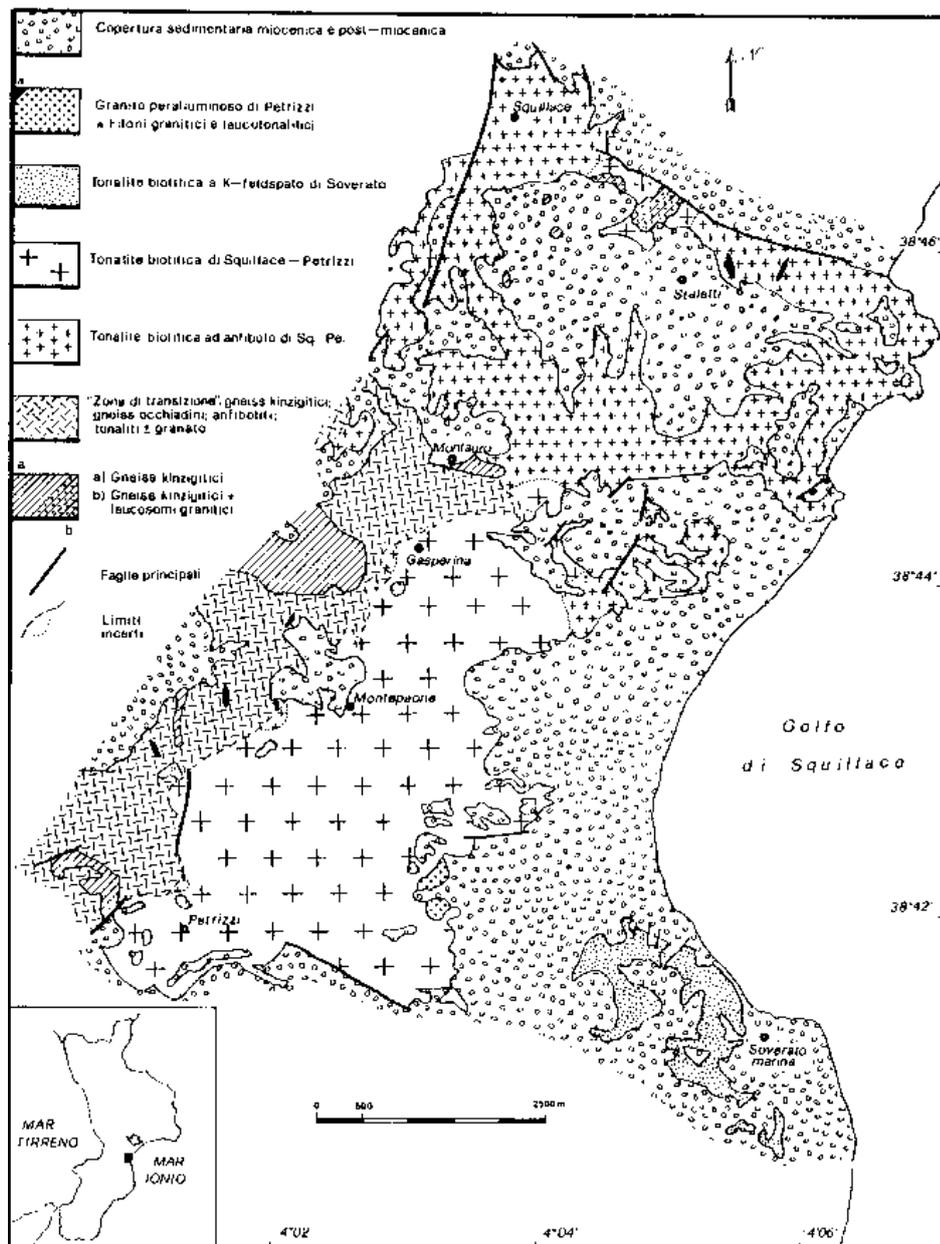


Figura 25 - Schizzo geologico della zona di Squillace-Petrizzi (Caggianelli, 1988)

In riferimento alle masse basiche, i gabbri anfibolico-biotitici questi presentano una struttura fortemente condizionata dalla presenza di numerosi cristalli idiomorfi di plagioclasio; tutti gli altri

minerali costituiscono una matrice a grana più fine mostrando un abito un abito cristallino da subdiomorfo ad allotriomorfo. La paragenesi è assimilabile a quella delle tonaliti inglobanti; la loro composizione va nel complesso da gabbri a quarzogabbri. In dettaglio, il quarzo è presente in quantità variabili (max 8% modale) e distribuito in plaghe policristalline. Il plagioclasio (42 - 56% modale) prevalentemente calcico ($65\% < An < 75\%$) è presente in cristalli idiomorfi ben geminati (dimensioni max 3-4 mm); nei cristalli è spesso riconoscibile una fascia sericitizzata che separa la parte periferica dal nucleo, indicando una crescita avvenuta in due fasi distinte. Inoltre, la biotite (>5% modale) si presenta in cristalli di dimensioni più ridotte del litotipo precedente, mentre l'orneblenda (>35% modale; composizione prevalente: Mg-orneblenda; cummingtonitemax 6%) si presenta in cristalli ad abito prismatico e presentano frequentemente delle inclusioni di biotite. Infine, tra i minerali accessori, si riscontrano apatite e ilmenite. Per quanto riguarda, infine, i corpi intrusivi minori, questi sono caratterizzati da una grande varietà strutturale e composizionale; classicamente, vengono suddivisi in: i) filoni leucotonalitici; ii) graniti di Petrizzi; iii) corpi filoniani. In dettaglio, i filoni leucotonalitici presentano grana media o fine e caratteri strutturali simili a quelli delle tonaliti di Squillace-Petrizzi. Presentano biotite bruna, rara muscovite e, in alcuni casi, allanite. Il plagioclasio ha composizione andesina; i graniti di Petrizzi presentano grana fine e localmente eterogenea per la presenza di megacristalli di K-feldspato. Presentano generalmente struttura allotriomorfa e sono caratterizzati dalla presenza di biotite rossiccia e di muscovite. Il plagioclasio ha composizione oligoclasica; i corpi filoniani presentano caratteri intermedi tra i due gruppi precedenti e risultano fortemente diversificati. Hanno grana fine, struttura autoallotriomorfa e presentano sia biotite bruna che rossiccia con contenuto in muscovite variabile dal 4 al 16%.

Passando al dato geochimico, nelle tonaliti di Squillace-Petrizzi tutti gli elementi dosati (fatta eccezione per il Na) sono correlati negativamente in maniera più o meno significativa con la silice. Ne consegue che elementi come il K, Rb e Zr hanno tenori più bassi nei termini più evoluti: questo

andamento e comune nelle rocce della serie trondhjemitica. Il loro indice alcalicalcico (Peacock, 1931) risulta molto alto. Il diagramma $\text{FeO}t/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ evidenzia l'appartenenza di tutti i campioni all'interno del campo della serie calcicalcina. Nel diagramma Ba-Rb-Sr (ElBouseily&ElSokkary, 1975) si evidenzia un arricchimento progressivo in Sr all'aumentare del grado di evoluzione delle rocce. Le tonaliti sono caratterizzate da un moderato carattere peralluminoso che tende ad intensificarsi all'aumentare del grado di evoluzione. All'aumentare invece del D.I. (Differentiation Index; Thornton & Tuttle, 1960) si verifica una transizione dai termini a diopside normativo a quelli a corindone normativo. Nel diagramma K/Rb-D.I. il rapporto tra K e Rb risulta pressochè costante all'aumentare del grado di evoluzione, con valori che si assestano attorno a 250; la distribuzione di K e Rb è controllata in gran parte dalla biotite. Nella maggior parte dei diagrammi di variazione binaria il coefficiente di correlazione mostra alti valori, risultando invece non significativo per Sr, Zr e Nb. Nei diagrammi relativi a Na_2O , K_2O , Rb e Nb i punti risultano distribuiti secondo un trend non lineare mentre in quelli relativi a MnO, Sr, Y, Zr alcuni punti si discostano nettamente dagli altri; infine, alcuni elementi come Sr, Zr, Nb e Ni mostrano una debole variazione all'aumentare del grado di differenziazione. I filoni leucotonalitici e le tonaliti biotitiche si discostano in maniera significativa dal trend principale: ciò è imputabile principalmente a processi di contaminazione. Nei diagrammi di variazione binaria, la diminuzione di K_2O , Al_2O_3 e Na_2O hanno suggerito il frazionamento di biotite, plagioclasio e orneblenda. La cristallizzazione di anfibolo risulta fondamentale nel passaggio da composizioni mesoalluminose a peralluminose; quella di biotite per una differenziazione verso i termini leucotonalitici. I diagrammi a scale logaritmiche Ba-V, Rb-V e Sr-V evidenziano una netta dispersione dei punti secondo un trend non lineare. I pattern relativi alle terre rare mostrano un profilo concavo in corrispondenza degli elementi medio-pesanti ed evidenziano un'anomalia positiva in Eu solo nei litotipi privi di anfibolo; quest'ultimi si caratterizzano anche per un forte impoverimento delle terre rare pesanti. Nel complesso, le variazioni di composizione chimica e mineralogica da quarzodioriti, tonaliti a leucotonaliti sono

imputabili ad un processo di cristallizzazione frazionata che ha portato al frazionamento di biotite, plagioclasio e orneblenda da un magma probabilmente già ricco di cristalli. Le foliazioni tipiche delle tonaliti, inoltre, possono essere spiegate col fatto che il frazionamento è avvenuto in un contesto fortemente dinamico. Il magma tonalitico iniziale (caratterizzato da bassi tenori in Ni, bassi rapporti $Mg/Mg+Fe^{++}$, rapporto isotopico iniziale $[^{87}Sr/^{86}Sr]_{290}$ pari a 0,710) difficilmente può essersi formato per fusione parziale del mantello: è molto più probabile invece che la roccia sorgente sia rappresentata da una roccia ignea basica (già presente in crosta) caratterizzata da un forte contenuto in alcali.

Relativamente al chimismo dei gabbri, questi presentano generalmente caratteri chimici molto simili a quelli delle tonaliti inglobanti. Nel diagramma AFM essi si distribuiscono lungo il prolungamento del trend definito dalle tonaliti verso il lato FeO-MgO. Rispetto alle tonaliti, nel diagramma Ba-Rb-Sr risultano più spostati verso il vertice occupato dallo Sr. Solo nei diagrammi di variazione binaria relativi a FeO, MgO, CaO, Na₂O e V, i gabbri si dispongono lungo il prolungamento del trend delle tonaliti, andando a costituire un polo basico. I gabbri, inoltre, mostrano un rapporto K/Ba pressochè costante: tale rapporto è, molto probabilmente, controllato dalla biotite. Nel diagramma K-Ba mostrano una maggiore dispersione dovuta al fatto che il Ba entra in quantità non trascurabili anche all'interno di plagioclasio e di anfiboli. La loro genesi potrebbe essere collegata a delle porzioni di un liquido o di una roccia basica che sono stati presi in carico da un magma acido e viscoso e portati nei livelli più superficiali.

Infine, le analisi chimiche dei filoni e delle masse granitiche associate alle tonaliti di Squillace-Petrizzi hanno evidenziato una notevole varietà compositiva con un generalizzato chimismo peralluminoso. La composizione del plagioclasio (più calcico) e le proporzioni relative di quarzo, plagioclasio e K-feldspato (uguali nei graniti di Petrizzi, K-feldspato minimo nelle lecotonaliti, variabilità nei corpi filoniani) consentono di discriminare i filoni leucotonalitici dagli altri litotipi. Inoltre, mentre i filoni leucotonalitici presentano bassi contenuti in K₂O, P₂O₅, Ba e Rb, i graniti di

Petrizzi ne risultano arricchiti. I filoni occupano un'area di dispersione intermedia e si sono formati probabilmente per via della differenziazione tardiva del magma tonalitico, mentre i graniti per la cristallizzazione di un magma originato dalla fusione parziale delle rocce che costituiscono il basamento. Gli altri filoni, caratterizzati da una forte eterogeneità compositiva, potrebbero derivare da un processo di anatessi crostale che abbia coinvolto porzioni del basamento con un grado di fusione variabile, oppure dal mescolamento tra un magma tonalitico differenziato e un magma granitico anatettico.

3.4.1-Metodologia di studio applicata all'area pilota

La scelta dell'area pilota si deve principalmente all'abbondanza dei dati raccolti da studi precedenti Caggianelli (1988) e Caggianelli e Di Florio (1989) che, integrati con altri dati ottenuti campionamenti recenti svolti dal Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali dell'Università di Catania, costituiscono un cospicuo numero di elementi. Pur avendo una distribuzione spaziale abbastanza irregolare per ragioni di scarsa accessibilità dell'area, i campioni rispettano un addensamento sufficiente per rendere coerente l'applicazione del metodo geostatistico. Essi sono stati geolocalizzati ed inseriti in un geodatabase, meglio descritto nel capitolo dedicato alla realizzazione dell'infrastruttura dei dati geochimici, insieme ai metadati ed ai dati ricavati dalle analisi chimiche. Contando sull'esatta localizzazione dei campioni, per la gran parte dei quali è noto il riferimento in GPS, si è costruito un sistema informativo geografico dei dati geochimici e petrografici, successivamente utilizzato come base per lo studio geostatistico. È stato, altresì, integrato con uno studio petrologico mediante l'elaborazione dei diagrammi di variazione degli elementi chimici rispetto alla silice e quelli dei più noti indici di uso comune nello stesso ambito disciplinare.

In seguito sono state realizzate le mappe geochimiche con l'ausilio dell'interpolazione di alcuni elementi chimici maggiori, alcuni minori e taluni indici(ASI, DI, MI, etc).

Il metodo di interpolazione adottato prende il nome di Kriging (vedi capitolo sulla Geostatistica) e deve il suo nome a Danie Krige, ingegnere minerario sudafricano che sviluppò negli anni '50 alcuni metodi empirici per la previsione della distribuzione di minerali nel sottosuolo a partire da campionamenti del terreno. A differenza di altri metodi di interpolazione noti dalla letteratura, quale IDW (Inverse Distance Weighting) il Kriging è un algoritmo non deterministico e si fonda sui processi di calcolo di probabilità tenendo conto dell'autocorrelazione della grandezza, supponendo che la grandezza in oggetto, nel caso in specie la quantità di ogni elemento chimico,

vari con continuità nello spazio, in accordo con la cosiddetta Legge di Tobler, testualmente espressa: "Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things" (Tobler, 1970).

Come vedremo in seguito, le mappe di concentrazione degli elementi chimici all'interno dell'area pilota, hanno fornito utili indicazioni di carattere geopetrologico atte ad ampliare il patrimonio geologico informativo dell'intera area di interesse, ma per di più hanno suscitato un'idea ancor più innovativa che ha ricondotto alla creazione ed all'implementazione di una procedura informatica su base GIS capace di ricostruire una mappa litologica dettagliata applicabile su qualunque area in cui affiorano rocce magmatiche, utilizzando i dati puntualmente interpolati ed il riferimento classificativo su base geochemica denominato TAS (Total Alkali Silica), proposto da Middlemost (1985). I limiti litologici, dunque, sono stati ricostruiti tramite l'elaborazione delle mappe geochemiche interpolate, ottenendo una mappatura del substrato sulle aree plutoniche ricoperte dal sedimentario ed un'ipotesi statisticamente più attendibile per quelle obliterate da una fitta copertura antropica o boschiva.

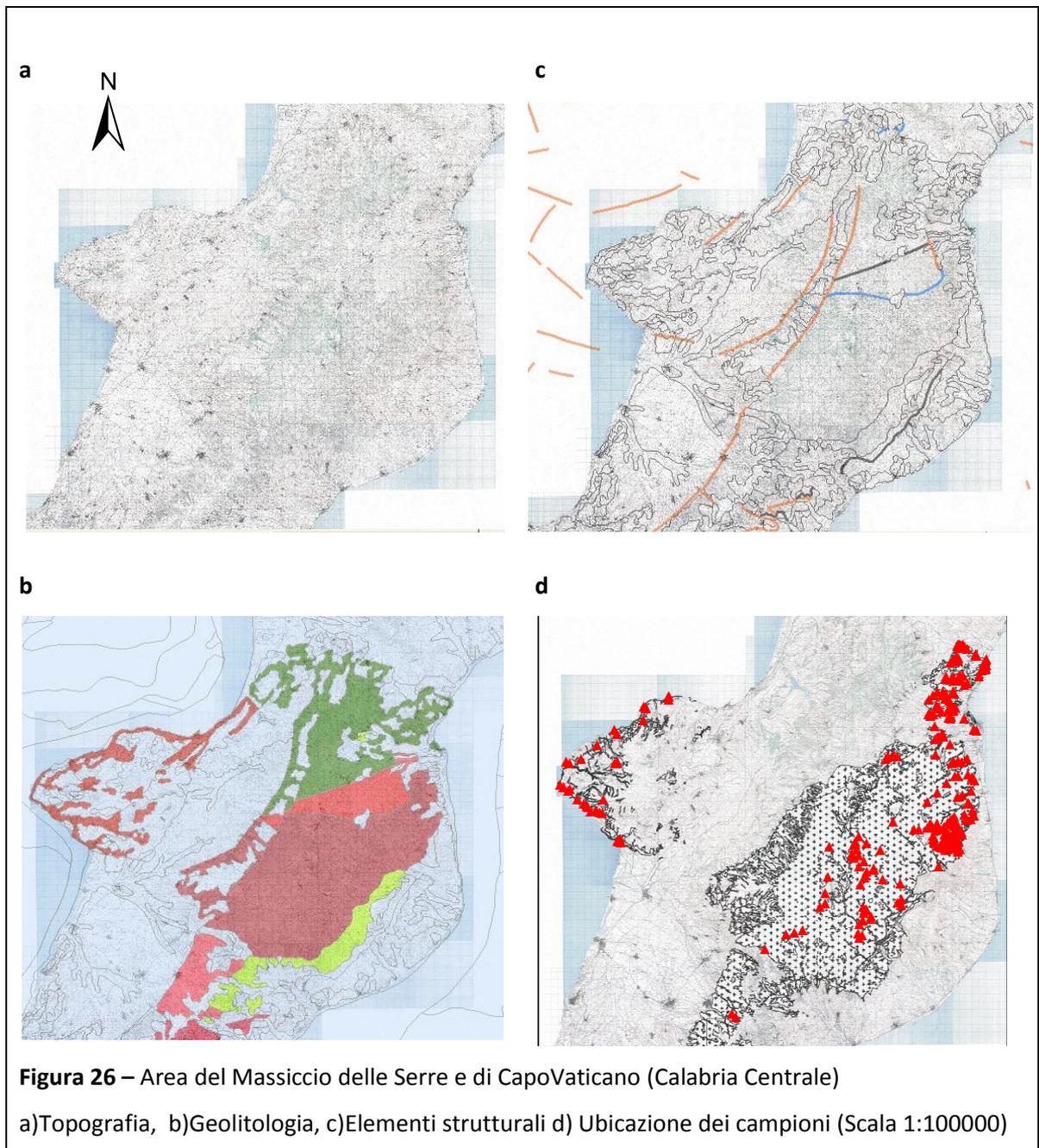
Per chi volesse acquisire o approfondire nel dettaglio la logica su cui è fondata la geostatistica e le tecniche di interpolazione quale il Kriging, è stata proposta una sintesi esplicativa sull'argomento, con particolare riferimento all'*analisi variografica* nelle sue molteplici variabilità. Trattandosi di applicare diverse funzioni parametriche, è evidente come necessaria sia la cognizione della fenomenologia da analizzare, laddove ciascuna configurazione variografica influenza sensibilmente il risultato finale dell'interpolazione.

3.4.2-APPLICAZIONI GEOCHIMICHE E GESOSTATISTICHE NELL'AREA PILOTA

Questa fase ha avuto inizio con la georeferenziazione delle basi topografiche acquisite dalle tavole IGM 1:25000 della Calabria Centrale, quindi delle mappe litologiche del rilevamento regionale della Calabria scala 1:50000

È stata successivamente eseguita una vettorializzazione dei corpi plutonici, del basamento cristallino, della copertura sedimentaria e dei principali elementi strutturali. Sono stati, altresì, ubicati e georiferiti i campioni acquisiti durante le recenti escursioni e tutti quelli descritti nella letteratura precedente.

In realtà, da studi pregressi in tutta l'area in cui affiora il Massiccio delle Serre fino a Capo Vaticano, sono state censite oltre 600 analisi chimiche XRF o ICPMS, ma solo 200 (Fig. 26d) hanno riferimenti topografici dettagliati, tali da consentire la loro ubicazione in modo pressoché attendibile.



Di seguito è stata svolta un'analisi topologica preliminare al fine di ottimizzare la scelta dell'area sulla quale eseguire la procedura di interpolazione geostatistica, il cui esito, si ricorda, è tanto più attendibile quanto maggiore è la densità di campioni per unità di superficie. Al di là dei metodi interpolativi da invocare (Splines, IDW, Kriging, etc..) non esiste alcun modo di produrre una mappa di qualità elaborando punti misurati di bassa qualità. Di fatto, uno degli scopi post-

applicazione è quello di valutare quale sia la migliore disposizione per una eventuale integrazione o nuova esecuzione di punti di campionamento, in ragione che la disposizione dei punti di campionamento petrografico molto raramente può essere regolare in tutta l'area. Nel caso in studio il campionamento appare talvolta clusterizzato in sottodomini per ovvie ragioni legate alla praticabilità del sito ed all'affioramento di litotipi di rocce plutoniche.

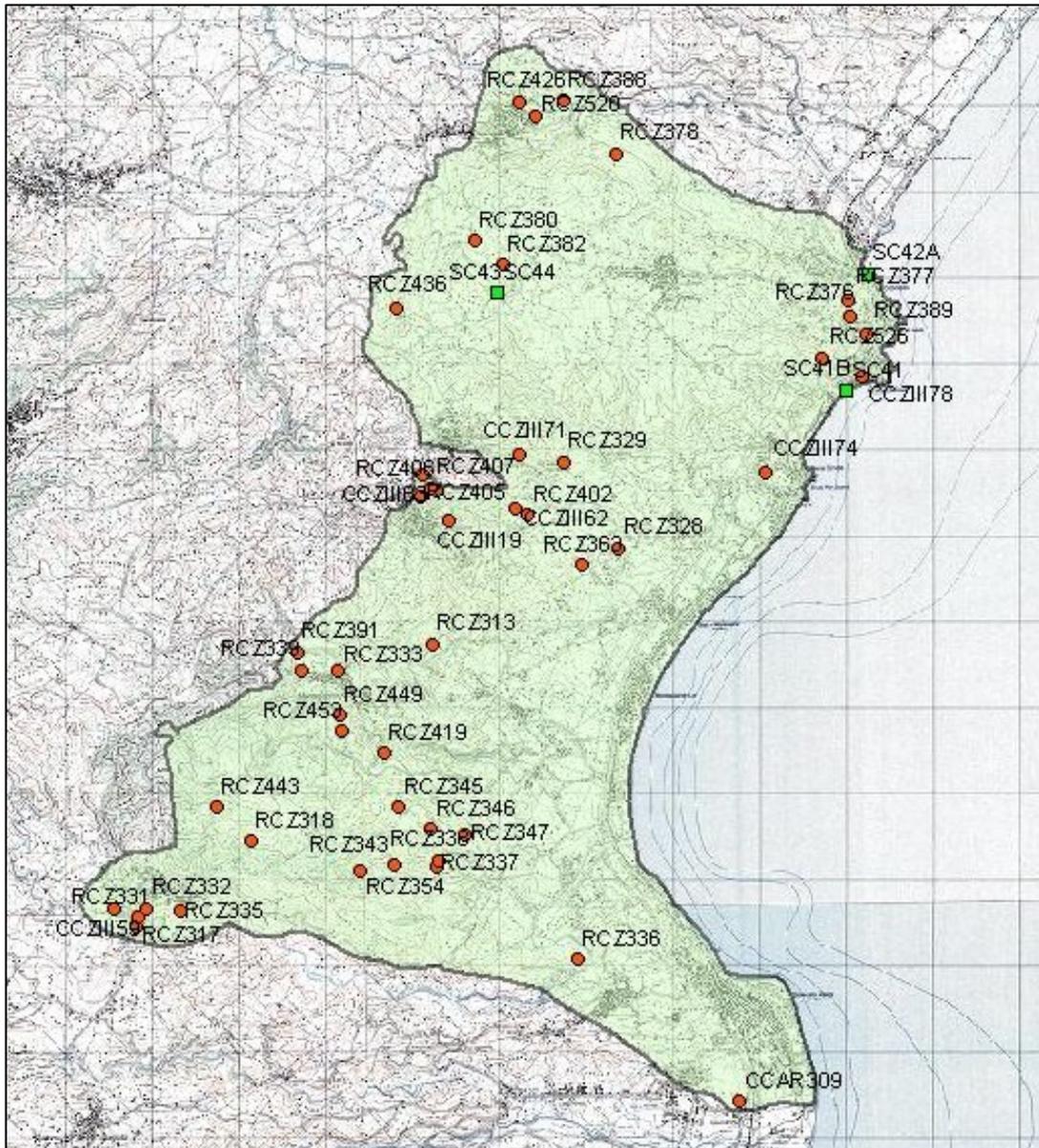


Figura 27 - Area di Petrizzi - Squillace - Distribuzione dei campioni di rocce plutoniche

La scelta è, dunque, ricaduta sull'area di Petrizzi-Squillace, estesa per circa 53 km², ove la distribuzione dei 52 campioni georeferenziati, per quanto randomica e numericamente limitata, sembra essere idonea raggiungere gli obiettivi proposti. Mediante la costruzione di un grafo orientato si è valutata la massima distanza tra campioni adiacenti la quale non supera i 2,5 km.

Gli elementi oggetto dell'interpolazione sono stati rispettivamente:

- i contenuti in elementi maggiori (espressi in percentuali in peso, ricalcolate su base anidra)
- i contenuti in selezionati elementi in traccia (espressi in ppm);
- alcuni indici geochimici opportunamente calcolati, quali:
 - ASI (*Aluminium Saturation Index*);
 - SI (*Saturation Index*);
 - Larsen (Larsen Index);
 - DI (*Differentiation Index*);
 - MALI (*Modified Alkali-Lime Index*);
 - MI (*Maficity Index*);
 - CIA (*Chemical Index of Alteration*).

Prima di procedere con l'analisi dei semivariogrammi, si è ritenuto opportuno svolgere una fase propedeutica di studio dei diagrammi di variazione e valutare le diverse classificazioni geochimiche proposte in letteratura.

Sono stati presi in considerazione tre differenti diagrammi classificativi:

1. TAS;
2. Diagramma R1-R2;
3. Diagramma Ab-An-Or.

Il TAS è uno dei diagrammi più utilizzati per la classificazione chimica delle rocce vulcaniche (Cox et al., 1979; Le Bas, 1986; Le Maitre et al., 1986); esistono però anche delle versioni realizzate appositamente per le rocce plutoniche (Cox et al., 1979; Wilson, 1989; Middlemost 1985).

Il diagramma riporta sulle ascisse le percentuali in peso di silice (SiO_2) e sulle ordinate la somma degli alcali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), sempre in percentuale in peso; i valori vengono plottati dopo aver ricalcolato a 100 su base anidra i dati chimici ottenuti dalle analisi di laboratorio. La versione del TAS utilizzata per la classificazione delle rocce plutoniche dell'area di Squillace-Petrizzi è quella proposta da *Middlemost* nel 1985 (Figura 28).

Il TAS ha evidenziato l'appartenenza di un gran numero di campioni ai campi delle tonaliti e delle granodioriti, e di un numero più limitato ai campi di graniti, quarzomonzodioriti, quarzodioriti e gabbri/dioriti. I graniti, in particolare, sembrano formare una popolazione distinta.

Il diagramma R1-R2, elaborato da *De la Roche et al.* nel 1980 (Figura 29), permette di classificare le plutoniti sulla base delle loro proporzioni cationiche, espresse sotto forma di millicationi.

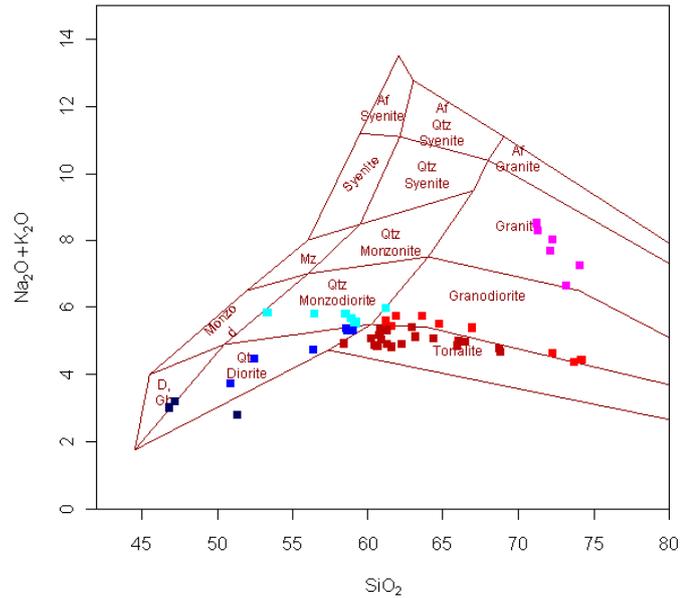


Figura 28 - TAS (Middlemost, 1994)

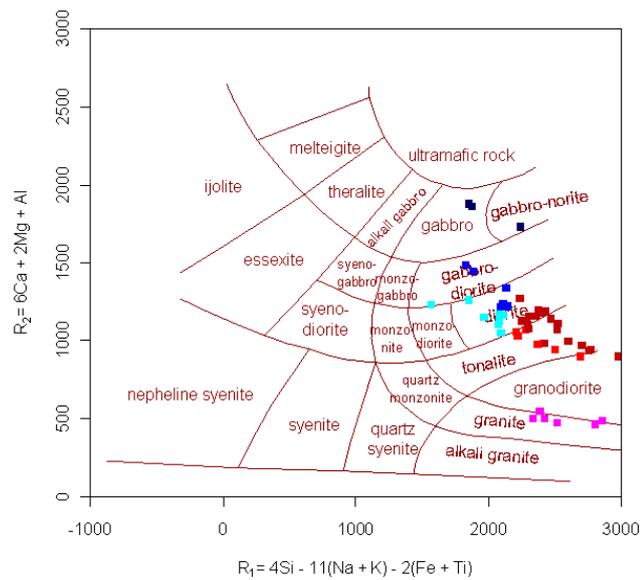


Figura 29 - Diagramma R1-R2 (De la Roche et al., 1980)

Questo diagramma ha evidenziato l'appartenenza di un numero cospicuo di campioni al campo delle dioriti e delle tonaliti, e di un numero più ridotto ai campi di graniti, gabbrodioriti, gabbri, gabbronoriti e granodioriti; in questo caso risulta più evidente la presenza di trend continuo che va dalle gabbrodioriti fino alle granodioriti, e di gruppi isolati costituiti da gabbri-gabbronoriti e da graniti.

Il diagramma classificativo Ab-An-Or di *O' Connor* (1965), diversamente dai precedenti, è impostato su base normativa.

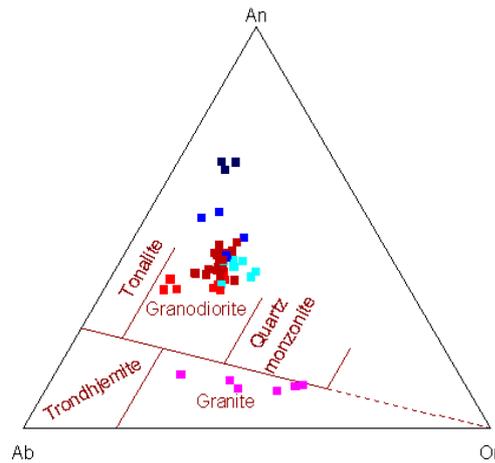


Figura 30 - Diagramma Ab-Or-An (O'Connor 1965)

Questo diagramma evidenzia come la maggioranza dei campioni ricada nel campo delle granodioriti, la restante parte invece in quello dei graniti. Ciò è imputabile al fatto che la norma, non considerando i minerali idrati come la biotite, compensa la mancanza di questa fase normativa con un aumento della percentuale di feldspato potassico: i campioni risultano quindi “traslati” in blocco verso destra. Anche in questo diagramma è evidente la presenza di tre popolazioni differenti, rappresentate da granodioriti, graniti e da tutti quei campioni che, presentando meno del 10% normativo di quarzo, non ricadono all’interno di nessun campo.

Anche se molto diversi tra di loro, questi diagrammi hanno evidenziato come spesso non si riscontri una corrispondenza tra classificazione su base chimica e quella su base modale (impostata sulla percentuale in volume dei minerali presenti).

Il TAS di Middlemost (1985) è stato poi scelto per lo sviluppo del software Gis Based per mezzo del quale è possibile ottenere una restituzione della mappatura litologica a partire dal geodatabase geochimico; con tale sistema si è ottenuta una mappa meglio confrontabile con le presistenti mappe geolitologiche redatte nell’area in esame, quale la carta di Caggianelli (1988), sebbene le tonaliti ad anfibolo siano state classificate come tonaliti, e le tonaliti biotitiche e le leucotonaliti come granodioriti.

Per completare la caratterizzazione di base dei campioni in esame, tutti a carattere subalcalino, sono stati realizzati i diagrammi AFM, K_2O vs SiO_2 e ASI vs SiO_2 .

Il diagramma AFM (Irvine e Baragar, 1971; Figura 31) mostra l’affinità calcalcalina dei campioni.

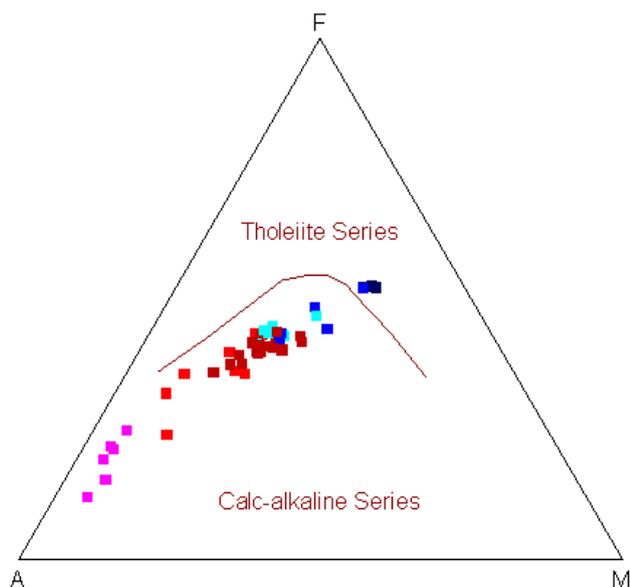


Figura 31 - Diagramma AFM (Irvine e Baragar, 1971). Quadrati blu scuro = gabbri, quadrati blu = quartzodioriti, quadrati azzurri = quartzomonzodioriti, quadrati rosso scuro = tonaliti, quadrati rossi = granodiorite, quadrati fucsia = graniti.

Nel diagramma K_2O vs. SiO_2 (Peccerillo e Taylor, 1976; Figura 32) si osserva come nel campo della serie tholeiitica rientrano alcune granodioriti (tra cui le leucotonaliti RCZ 346 e RCZ 347 di Caggianelli, 1988) e in quello della serie calcalkalina la quasi totalità delle tonaliti e alcuni gabbri; nella serie calcalkalina alta in K ricadono altre tonaliti, parte delle granodioriti ma anche delle quartzodioriti e la quasi totalità delle quartzomonzodioriti. Infine, c'è da porre l'attenzione sui graniti: il loro contenuto in K_2O è così variabile da farli passare dalla serie calcalkalina a quella

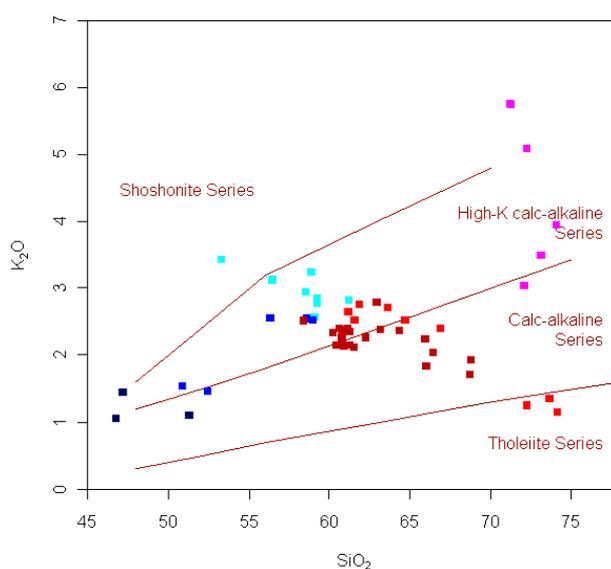


Figura 32 - Diagramma K_2O vs SiO_2 (Peccerillo e Taylor, 1976)

shoshonitica.

Il diagramma ASI vs. SiO_2 (Figura 33) permette di osservare un generale aumento dell'indice di peralluminosità all'aumentare del contenuto in SiO_2 .

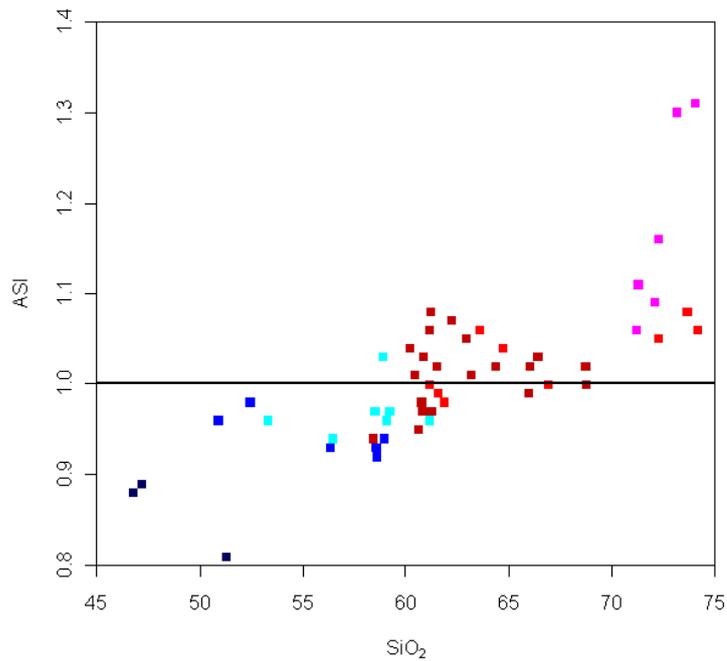


Figura 33 - Diagramma SiO_2 vs. ASI

Dall'osservazione di questo diagramma si evince che gabbri, quarzodioriti, quarzomonzodioriti e parte delle tonaliti e granodioriti, risultano metalluminosi; molte tonaliti e granodioriti presentano invece un ASI compreso tra 1,0 e 1,1, risultando debolmente peralluminose. Infine i graniti presentano dei valori di ASI generalmente maggiori di 1,1, motivo per il quale essi possono definirsi fortemente peralluminosi.

Sono stati realizzati anche dei diagrammi di Harker allo scopo di evidenziare la presenza o assenza di legami genetico-evolutivi delle rocce in esame attraverso processi quali la cristallizzazione frazionata, il mixing e il "restite unmixing". I diagrammi di Harker realizzati (

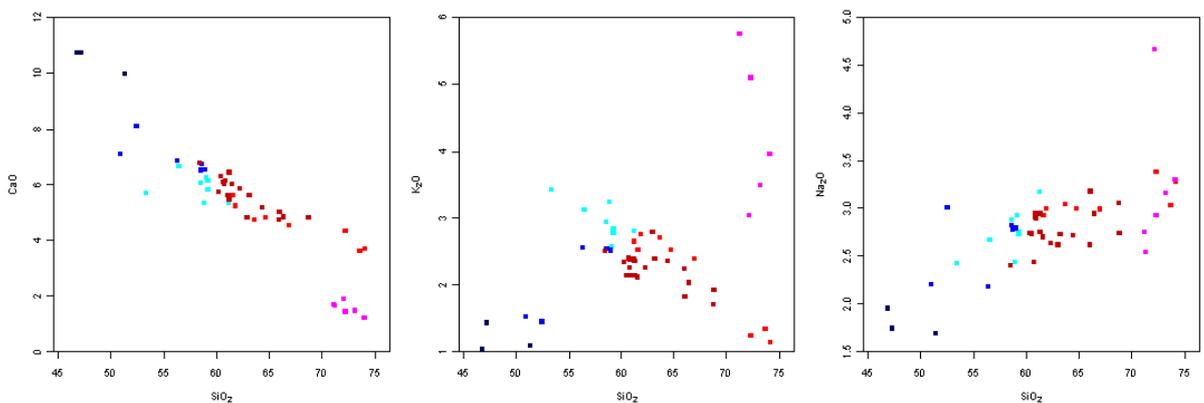
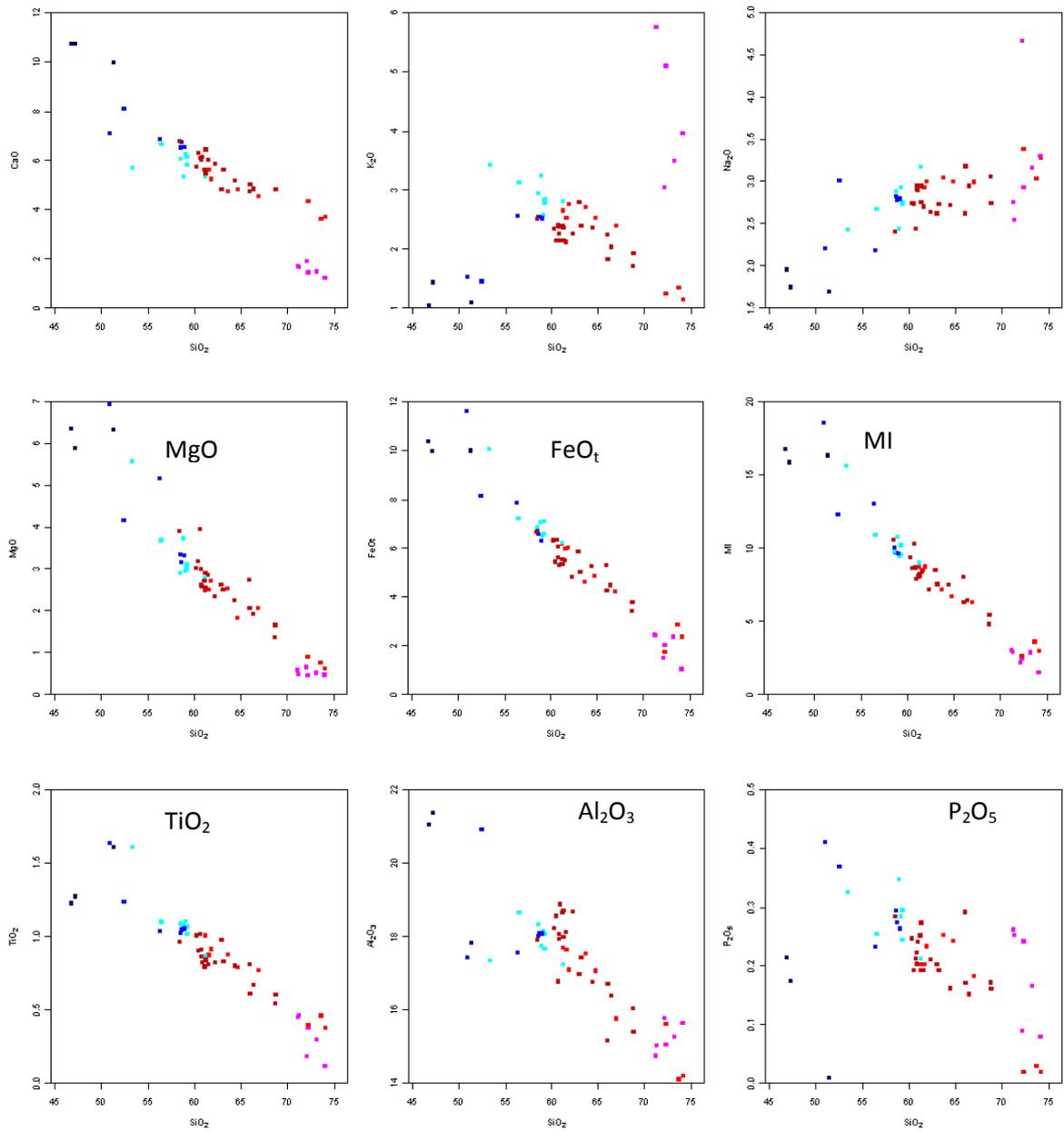


Figura 34), evidenziano una correlazione negativa per TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , P_2O_5 e FeO_t ; si ha invece una correlazione positiva per Na_2O .



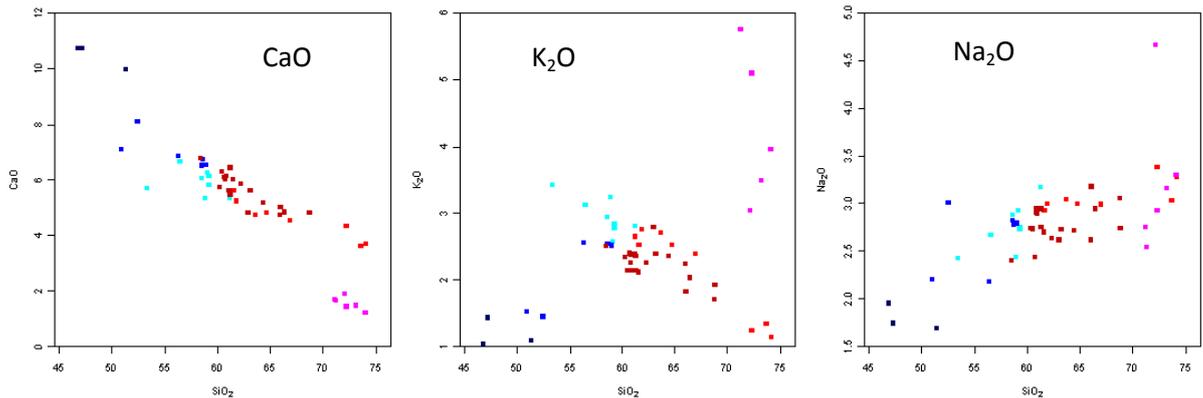


Figura 34 - Diagramma di Harker

Dall'analisi di questi diagrammi si può dedurre che:

- Il decremento di MgO, FeO_t e TiO₂, se interpretato in termini di cristallizzazione frazionata, è attribuibile frazionamento di fasi mafiche quali orneblenda, biotite e ilmenite;
- Il decremento di Al₂O₃ e CaO è principalmente imputabile alla cristallizzazione dei plagioclasti;
- P₂O₅ presenta una forte dispersione e tende a diminuire per via della cristallizzazione di apatite;
- L'andamento di K₂O è da attribuire alla cristallizzazione di biotite.

In particolare:

- I diagrammi relativi ad Al₂O₃, TiO₂, MgO, FeO_t e in parte P₂O₅, evidenziano un possibile legame genetico tra quarzodioriti, quarzomonzodioriti, tonaliti e granodioriti. Graniti e gabbri sembrano costituire invece due gruppi genetici a parte;
- Nel diagramma K₂O vs. SiO₂ si evidenzia l'evoluzione trondhjemitica dei termini da quarzodioritici a granodioritici (leucotonalitici), dovuta alla cristallizzazione di biotite. L'arricchimento in K₂O da parte dei corpi granitici riflette soprattutto la natura della roccia sorgente (probabilmente metasedimentaria) e solo in parte gli effetti attribuibili a processi di alterazione.

Vengono di seguito riportati altri diagrammi di variazione binaria che mostrano l'andamento di selezionati elementi in traccia (Figura 35 e ss.).

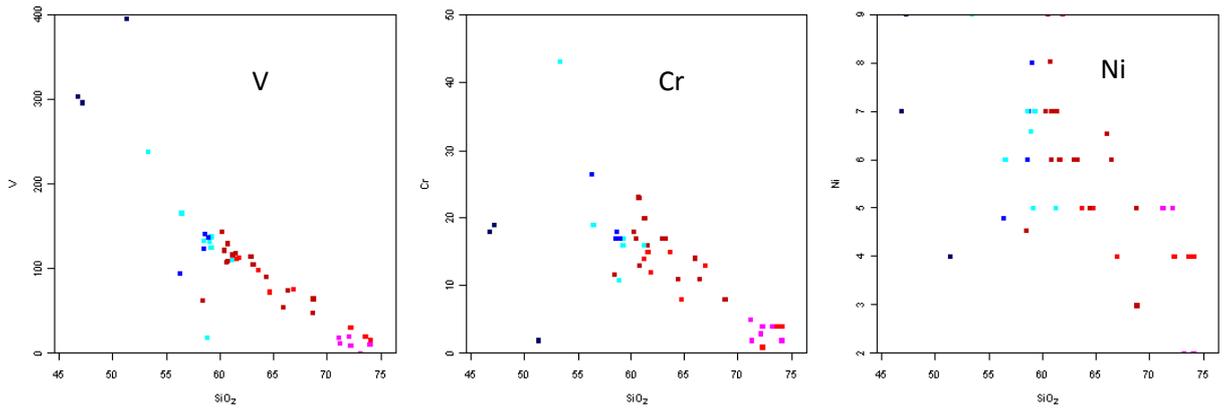


Figura 35 - Diagrammi di variazione binaria relativi a V, Cr e Ni

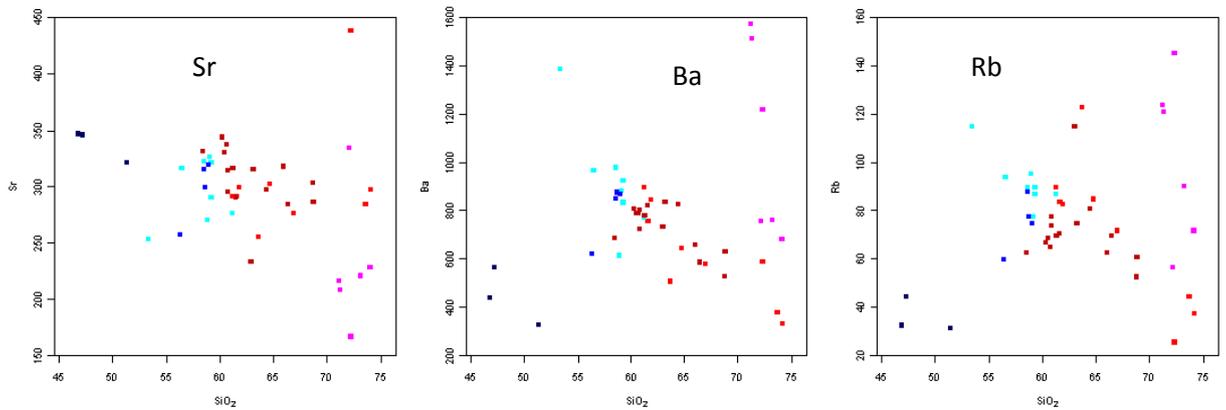


Figura 36 - Diagrammi di variazione binaria relativi a Sr, Ba e Rb.

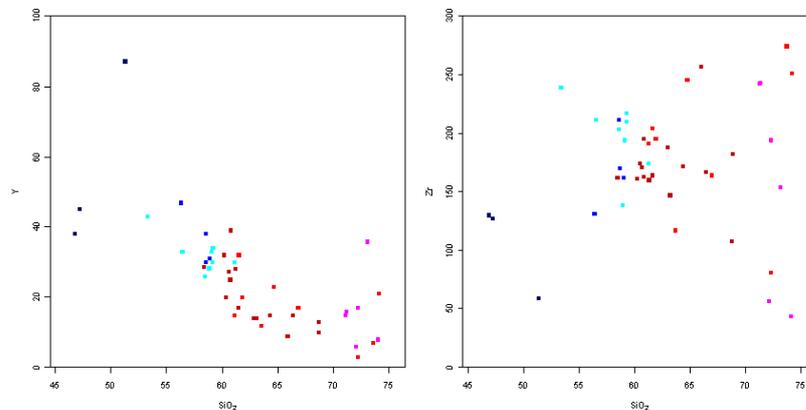


Figura 37 - Diagrammi di variazione binaria relativi a Y e Zr

Dall'analisi di questi diagrammi si può dedurre che:

- Il V mostra una correlazione negativa dovuta soprattutto al frazionamento di orneblenda;
- Il Cr, più disperso rispetto al V, decresce per via del frazionamento di biotite e ilmenite;
- Il Ni risulta fortemente disperso. E' appena visibile una correlazione negativa dovuta probabilmente al frazionamento di orneblenda;

- Lo Sr presenta elevata dispersione e una debole correlazione negativa imputabile al frazionamento dei plagioclasti;
- Il diagramma relativo al Ba risulta molto simile a quello del potassio: l'andamento della parte centrale, in particolare, è attribuibile al frazionamento di biotite;
- Il Rb si caratterizza per un maggiore grado di dispersione rispetto al Ba. Con l'aumentare del grado di evoluzione dai termini quarzodioritici, il suo contenuto aumenta per via del frazionamento di biotite;
- l'Y mostra una correlazione negativa imputabile al frazionamento di orneblenda e di apatite;
- Lo Zr risulta fortemente disperso.

Elementi quali Pb, La e Th non sono stati considerati in quanto le informazioni relative ai loro contenuti erano disponibili solo per un numero esiguo di campioni.

Nel complesso, anche gli elementi in tracce confermano un possibile legame genetico tra quarzodioriti, quarzomonzodioriti, tonaliti e granodioriti.

Ai diagrammi relativi ai caratteri primari delle rocce magmatiche si è affiancato il diagramma CIA vs. SiO₂ (Figura 38). Il CIA (Nesbitt & Young, 1982) è un indice chimico di alterazione che prende in considerazione solo alcuni elementi maggiori quali Al₂O₃, Na₂O, K₂O e CaO*: quest'ultimo rappresenta il contenuto di CaO nei soli minerali silicatici.

Il diagramma mostra valori nella norma per tutti i litotipi fatta eccezione per alcuni campioni di rocce granitiche, caratterizzati da un forte grado di alterazione (CIA > 55).

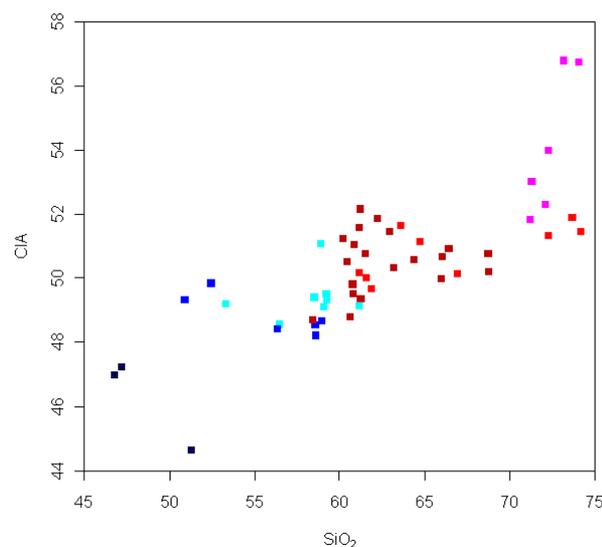


Figura 38 - Diagramma di variazione binaria relativo al CIA.

3.5-ANALISI GEOSTATISTICA – SEMIVARIOGRAMMI, TREND E KRIGING

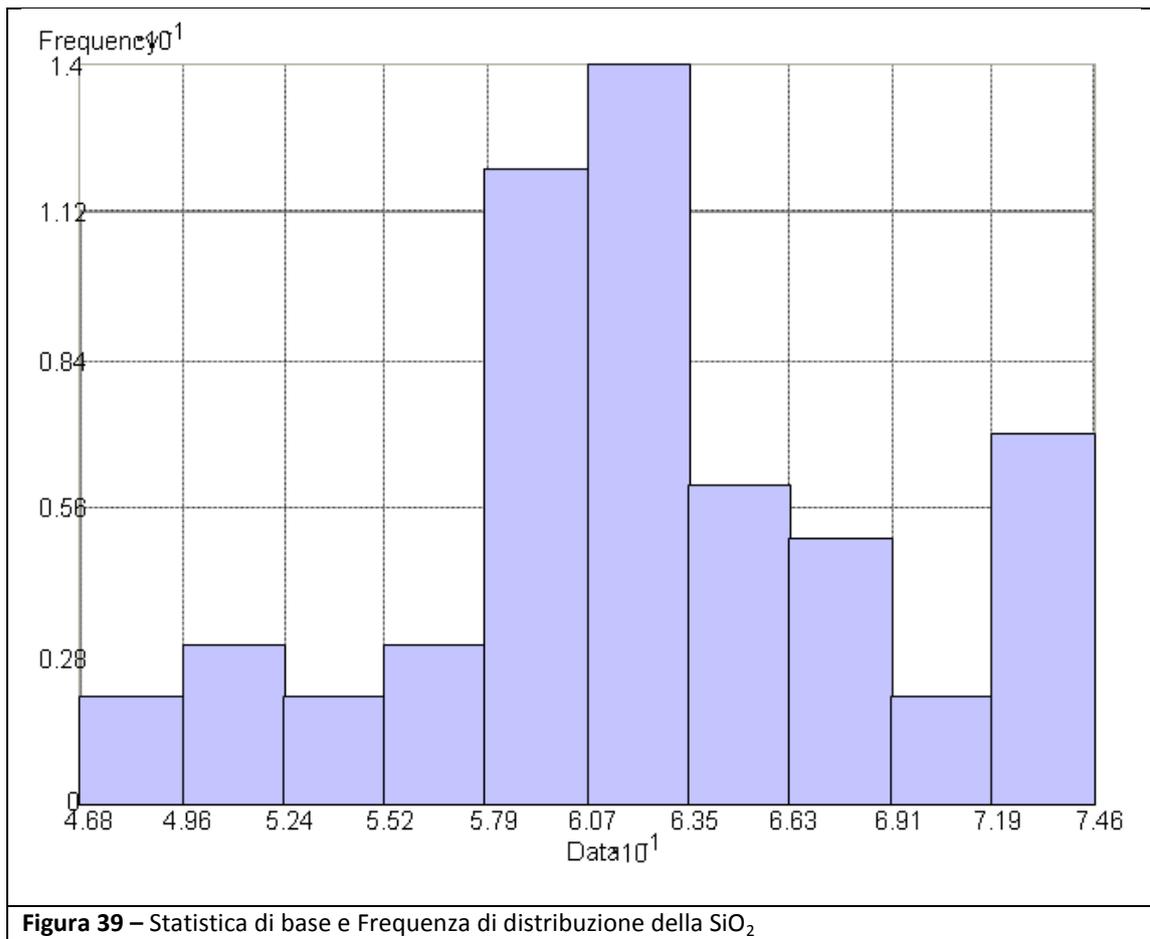
Come introdotto nel precedente paragrafo dedicato alla Gostatistica, il passo propedeutico all'applicazione delle tecniche di "krigaggio" è l'acquisizione della conoscenza dei dati attraverso gli studi geochimici appena illustrati e l'ausilio di elaborazioni statistiche basilari. Quindi si passa all'analisi "variografica" per valutare eventuali correlazioni spaziali tra i dati i dati geochimici, ossia la costruzione di "semivariogrammi" e la loro analisi strutturale (Journel e Huijbregts, 1979). I semivariogrammi forniscono una nuova prospettiva su molte caratteristiche geologiche e geochimiche dell'area esplorata. Nel nostro caso studio sono stati calcolati, costruiti ed analizzati svariati semivariogrammi, sfruttando le concentrazioni anidre dei principali elementi chimici presenti, su alcuni elementi in traccia e taluni indici. Qui di seguito presentiamo una descrizione di alcuni semivariogrammi più indicativi, utili alla ricerca di un modello teorico per descrivere le correlazioni spaziali e per la generazione della mappa litologica su base TAS-Middlemost 1985 per le rocce plutoniche.

Presentiamo, in prima istanza, lo studio della SiO_2 , del K_2O , del Na_2O e del MI (Maficity Index) rinviando agli allegati la restante parte delle mappature degli elementi.

3.5.1-Studio della SiO_2

L'istogramma seguente mostra la frequenza di distribuzione della SiO_2 , ove si evidenzia una curtosi pari a 2,8 ed una mediana di 61,19, indicando la prevalenza di rocce mediamente sature con un contenuto variabile dal 58% a 62%.

| | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Count | : 56 | Skewness | : -0.039332 |
| Min | : 46.8 | Kurtos | : 2.8003 |
| Max | : 74.64 | 1st Quartile | : 58.74 |
| Mean | : 62.073 | Median | : 61.195 |
| Std. Dev. | : 6.685 | 3-rd Quartile | : 66.19 |



La 3D Trend Analysis illustra invece la distribuzione e l'eventuale presenza di lungo direzioni geografiche ben definite. Nel grafico (Figura 40) l'asse delle "x" indica la direzione e verso Ovest-Est mentre l'asse "Y" quello Sud-Nord, in "Z", asse delle magnitudo, sono riportate le percentuali di SiO₂. La curva in blu indica un trend decrescente verso Nord mentre la verde segnala una lieve decremento verso Est.

SEMIVARIOGRAMMA SiO_2

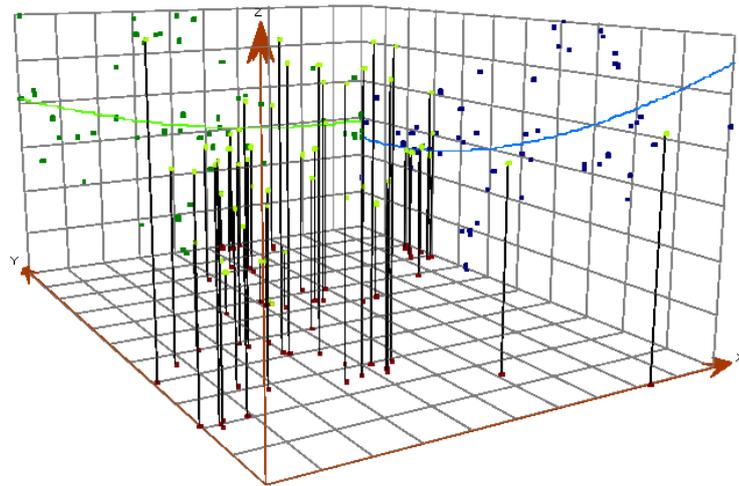


Figura 40 - 3D Trend Analysis

Lo strumento software ESRI ArcGis 9.3® offre vari modelli di semivariogrammi, ciascuno dei quali trova migliore applicazione in base alla variabilità dei fenomeni su cui indagare. Nel caso particolare, dopo svariati test di elaborazione sulla base dati, si è adottato un modello di tipo sferico avendo quasi sempre la presenza di un debole nugget ed è sempre possibile ammettere un "sill".

Nel caso della SiO_2 , si è proceduto con un calcolo parametrico che considerasse la presenza di un'evidente anisotropia, visibile in fase di elaborazione, avente un angolo di circa 120 gradi Nord. Nel semivariogramma così ricavato otteniamo valori di "Sill" prossimi a $0,50 \times 10^{-2}$, un "Range" di circa $3,45 \times 10^{-3}$ ed un Nugget di circa $0,20 \times 10^{-2}$ come si evidenzia nel semivariogramma in Figura 41.

Dal coefficiente angolare della curva di fitting, si evince una discreta autocorrelazione tra campioni aventi interdistanza inferiore ai 3.4 km, oltre la quale sembrerebbe non esserci più alcuna influenza tra la variabile "h" e la variazione dell'elemento.

$\gamma \times 10^{-2}$

SEMIVARIOGRAMMA SiO_2

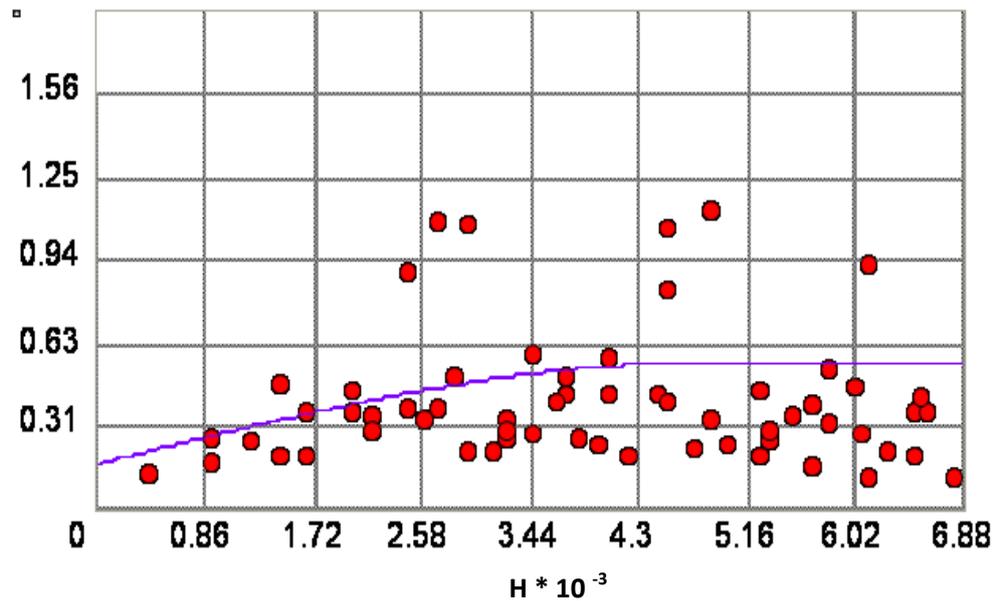


Figura 41 - Semivariogramma relativo alla SiO_2

Applicando i parametri del modello semivariografico alle funzioni geostatistiche di Kriging Ordinario si è ottenuta la mappa che interpola il valore probabile di concentrazione di SiO_2 sull'intera area, ipotizzando l'assenza della litologia sedimentaria che ricopre in larga parte le plutoniti (Figura 42).

Dalla distribuzione di un parametro come la SiO_2 emergono informazioni fondamentali per lo studio petrografico dell'area, la scelta più logica, tuttavia, è quella di discutere coerentemente i risultati complessivi del processo di mappatura.

Vediamo quindi il comportamento degli altri elementi

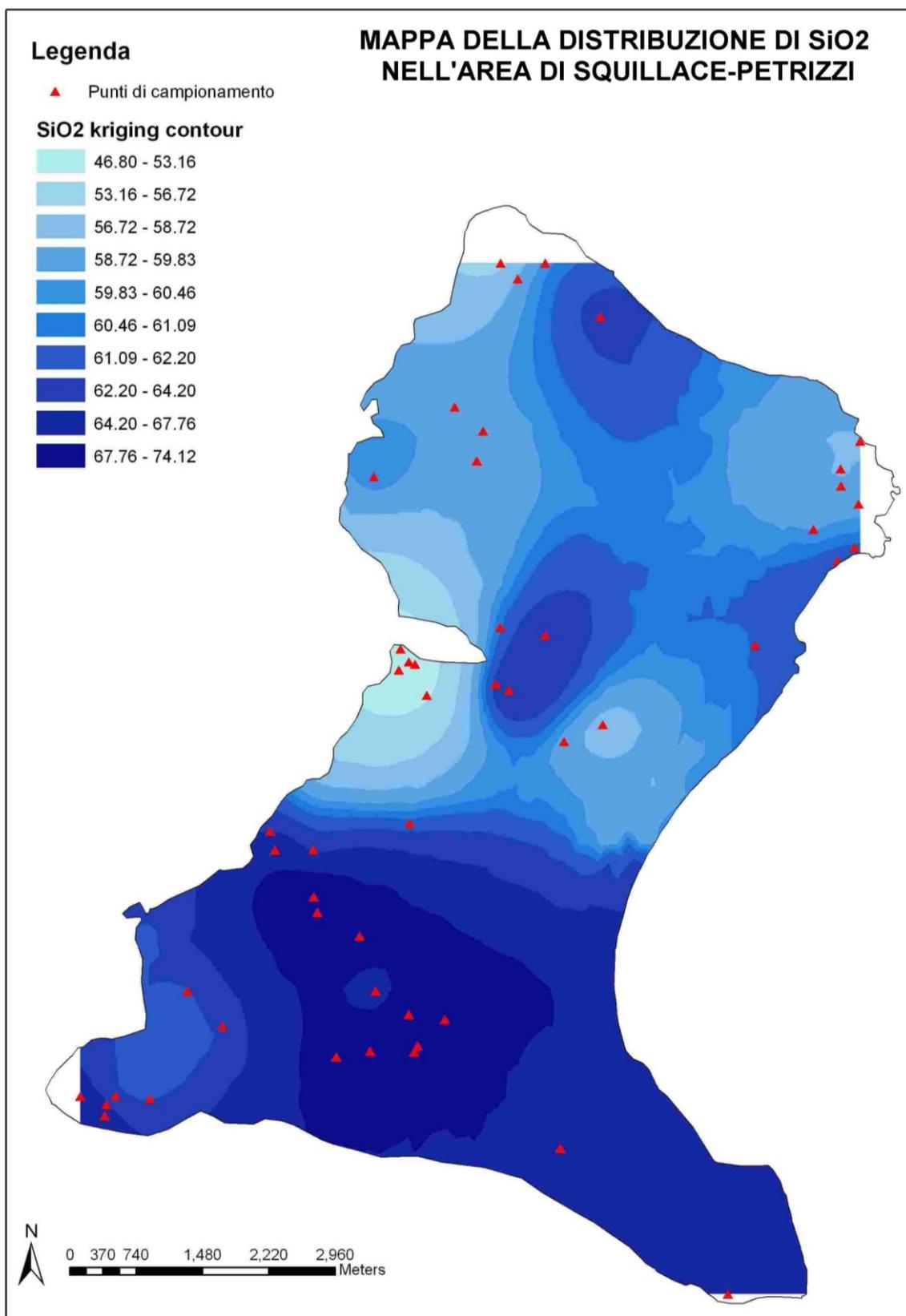


Figura 42 – Interpolazione relativa ai valori di SiO₂ (scala 1:55.000)

3.5.2-L'analisi del K₂O

Nettamente differente è il comportamento del K₂O, presentando una distribuzione di frequenza come in Figura 43.

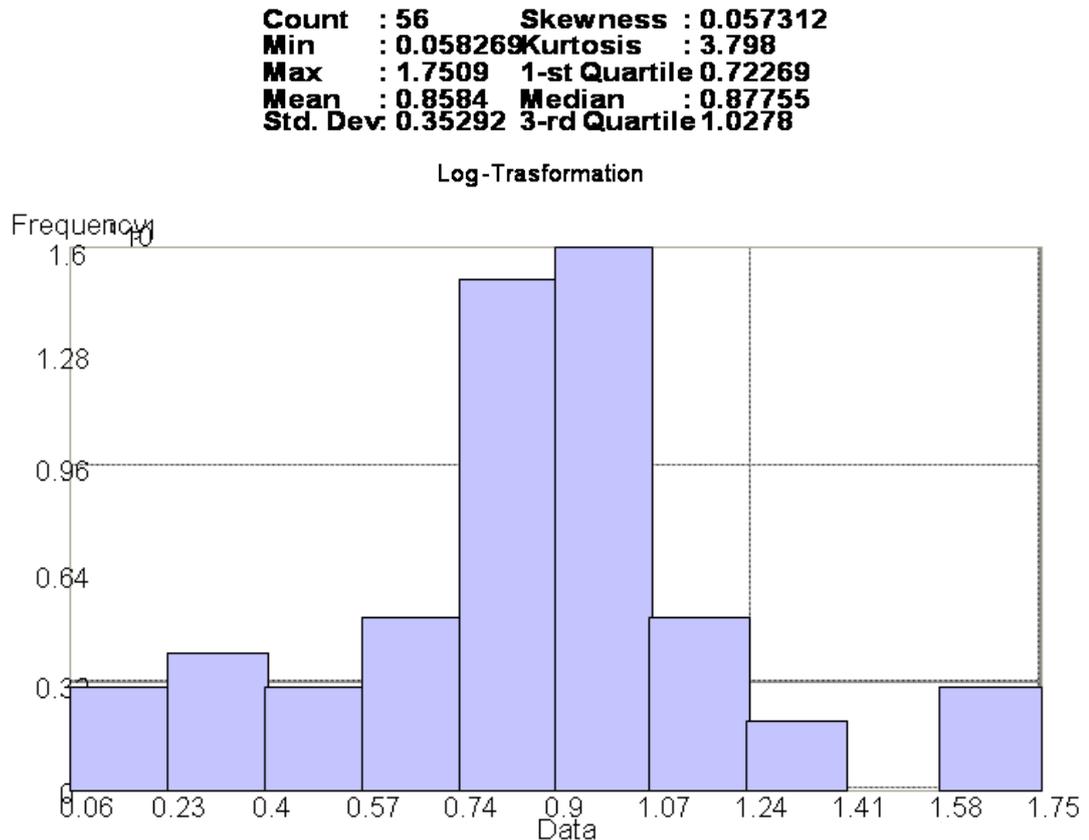


Figura 43 - Frequenza di distribuzione del K₂O

L'analisi dei trend (Figura 44) evidenzia una concavità verso l'alto in direzione nord-sud mentre rimane quasi costante in direzione Est-Ovest. Il semivariogramma (Figura 45) è particolarmente significativo poiché evidenzia una scarsa o nulla correlazione dell'elemento al variare della distanza areale. Il modello rappresenta la migliore curva di fitting che si è potuta ottenere a seguito di svariati tentativi di ottimizzazione parametrica. La mappa di predizione calcolata dal kriging è mostrata in Figura 46.

Il tenore in K₂O ha una variabilità areale molto discontinua e non mostra alcuna autocorrelazione tra i campioni in base alla distanza. Vedremo, invece, come rappresenti un elemento caratterizzante per la distinzione dei litotipi all'interno dei corpi plutonici.

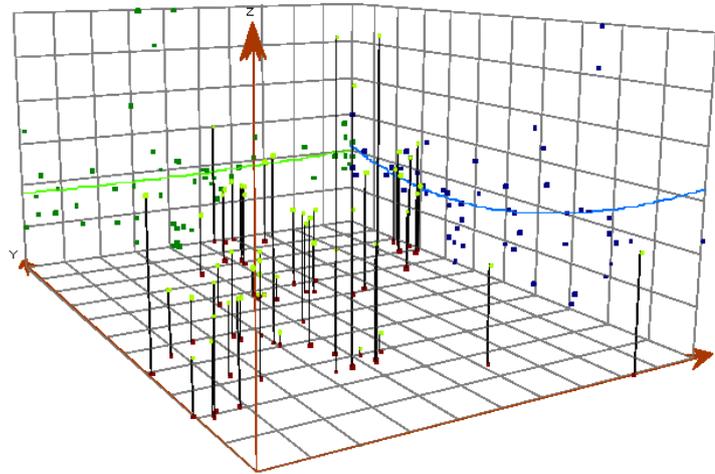


Figura 44 - 3D Trend Analysis del K₂O

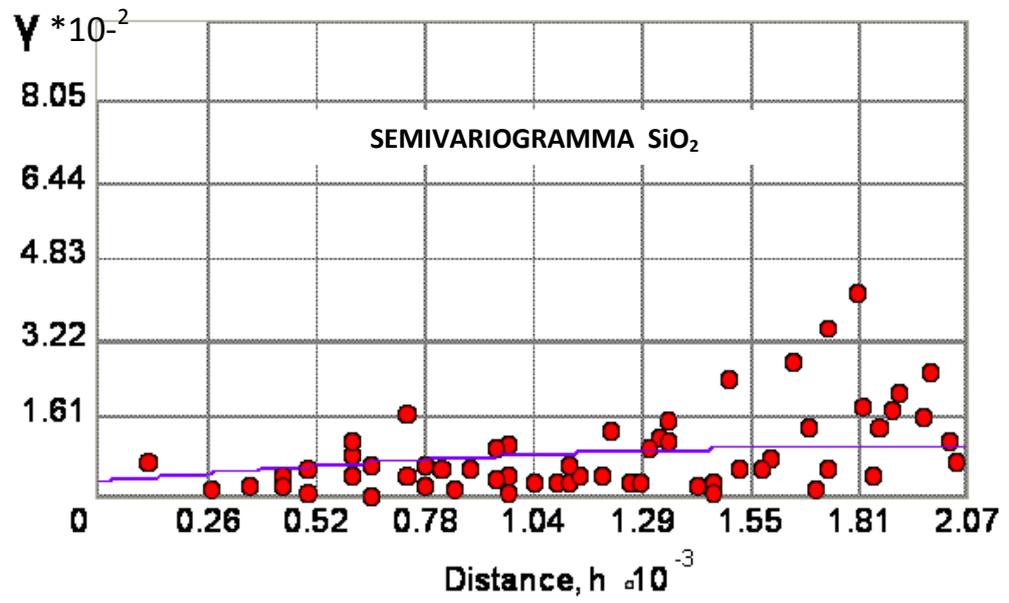


Figura 45 - Semivariogramma del K₂O

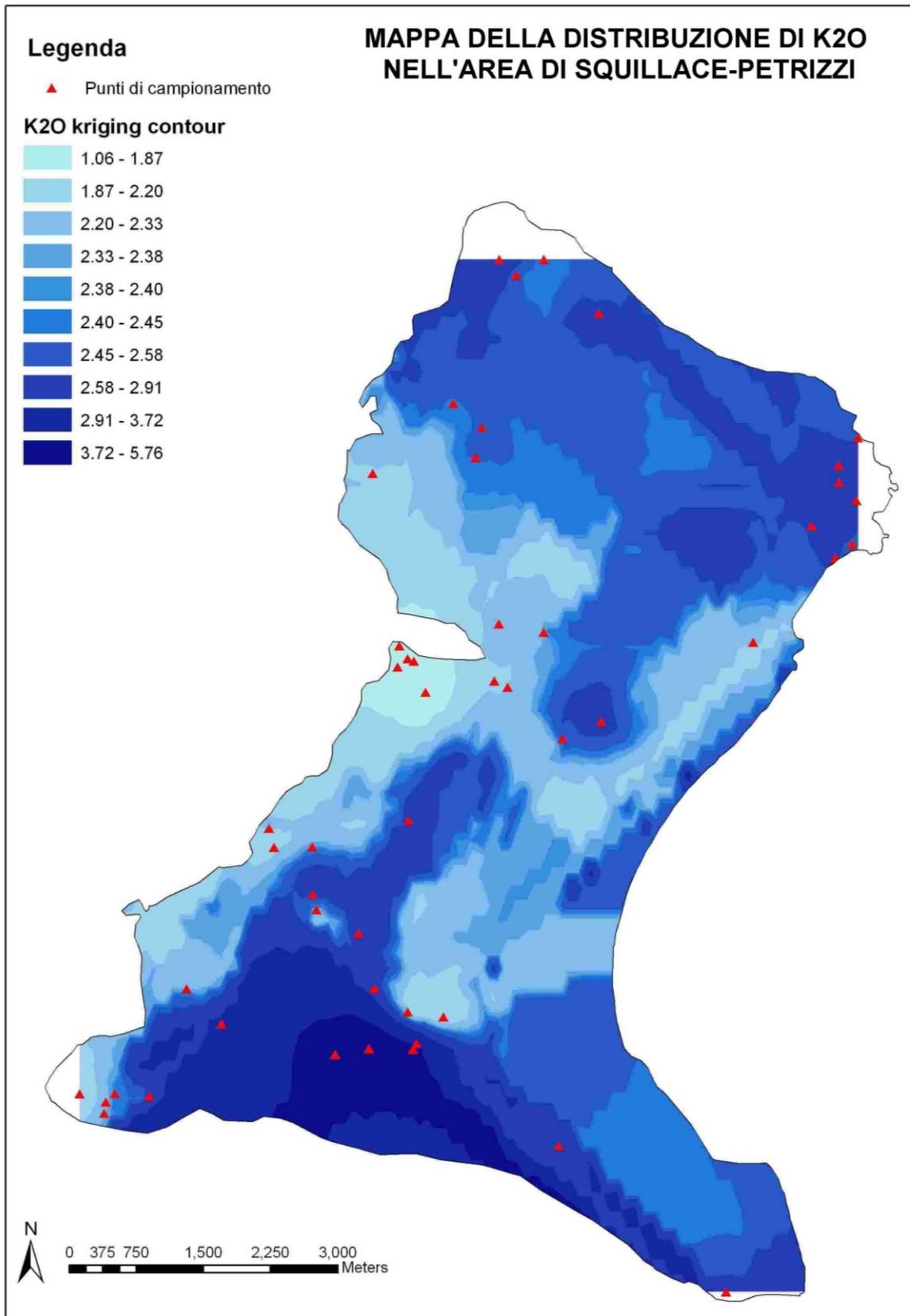


Figura 46 - Kriging Ordinario del K2O

3.5.3-L'analisi del Na₂O

Il grafico della frequenza di distribuzione in Figura 47 mostra una marcata simmetria indicativa di una prevalenza di rocce il cui contenuto in Na₂O è compreso tra 0,93% e 1,14%.

| | | | |
|------------------|------------------|----------------------|-------------------|
| Count | : 56 | Skewness | : -0.61072 |
| Min | : 0.53063 | Kurtosis | : 6.2803 |
| Max | : 1.5412 | 1-st Quartile | : 0.98582 |
| Mean | : 1.03 | Median | : 1.0508 |
| Std. Dev. | : 0.15758 | 3-rd Quartile | : 1.1003 |

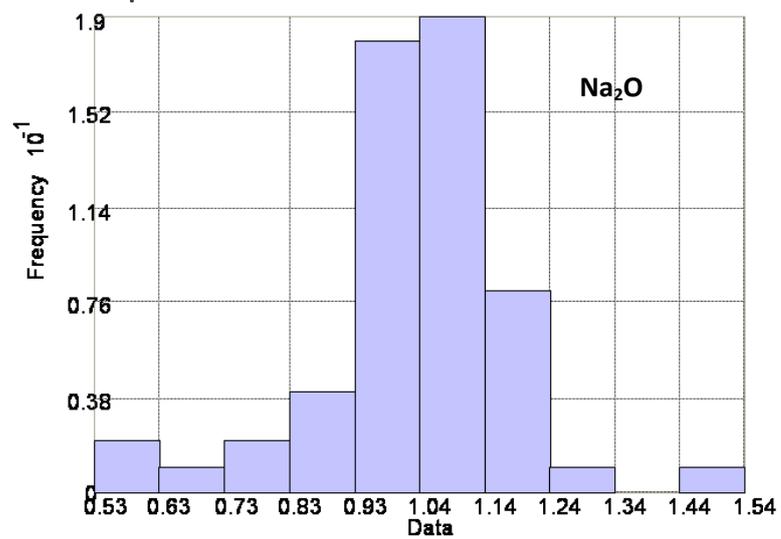


Figura 47 - Frequenza di distribuzione del Na₂O

L'analisi spaziale dei trend evidenzia un decremento dei valori sia in direzione Ovest-Est che Sud-Nord, come si rappresentato in Figura 48

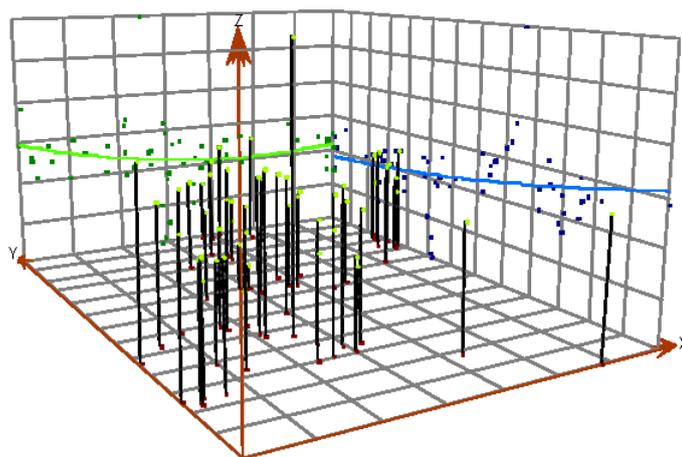


Figura 48 - 3D Trend Analysis del Na₂O

Il semivariogramma in Figura 49 illustra una debole autocorrelazione per una interdistanza dei campioni al di sotto dei 400 metri, come si evince dal valore del “sill” e del “range”; a differenza dagli elementi precedenti è la totale assenza di nugget.

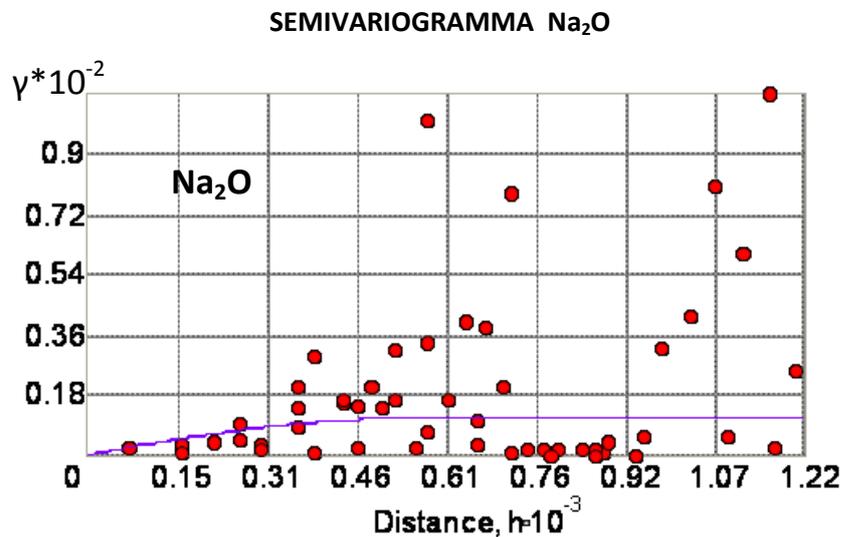


Figura 49 - Semivariogramma del Na₂O

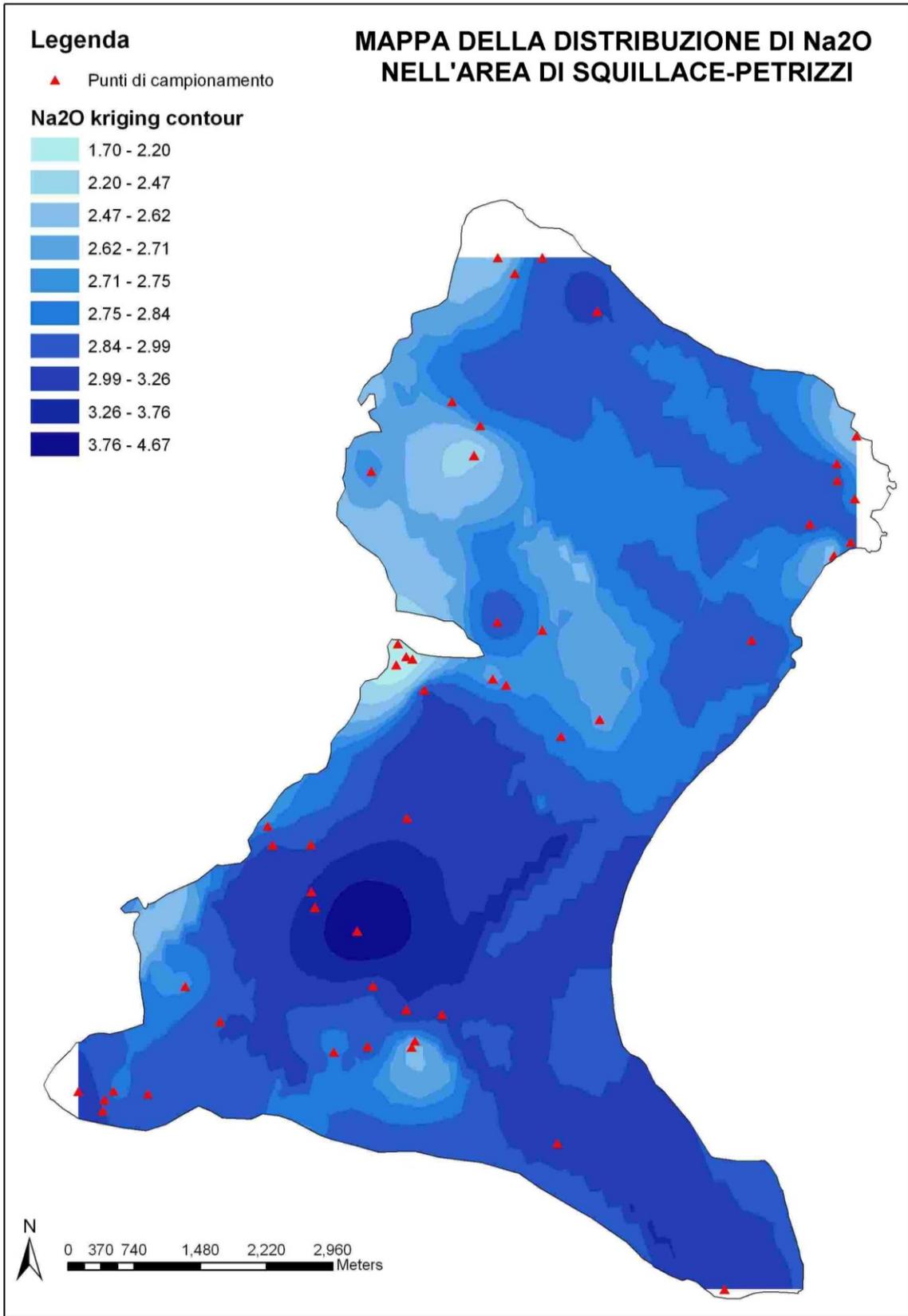
3.5.4-Analisi della MI (Maficity Index)

Tra tutti gli indici analizzati quello della maficità sembra essere quello spazialmente più correlato, offrendo elementi di maggiore significato per l’interpretazione dei caratteri geochimici dell’area.

Il valore di questo indice ha una variabilità apprezzabile tra 0,96 e 18,52 ed una asimmetria evidente.

Il diagramma della trend analysis mostra un evidente crescita dei valori di maficità in direzione Sud-Nord ed Ovest-Est mentre il semivariogramma, sul quale sono state calcolate un fascio di curve per il best-fitting dei valori di autocorrelazione, mostra una evidente correlazione spaziale dei campioni a distanze inferiori ai 3 km, ove si attestano i valori di “range” e di “sill”.

Con lo stesso metodo sono state prodotte le mappe per tutti gli elementi maggiori e gli elementi in tracce, generando le rispettive mappe di concentrazione all’interno dell’area in studio come si mostra nelle tavole allegate.



| | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Count | : 56 | Skewness | : 0.38967 |
| Min | : 0.96 | Kurtosis | : 3.2401 |
| Max | : 18.52 | 1-st Quartile | : 6.405 |
| Mean | : 8.4616 | Median | : 8.51 |
| Std. Dev. | : 3.8925 | 3-rd Quartile | : 10.145 |

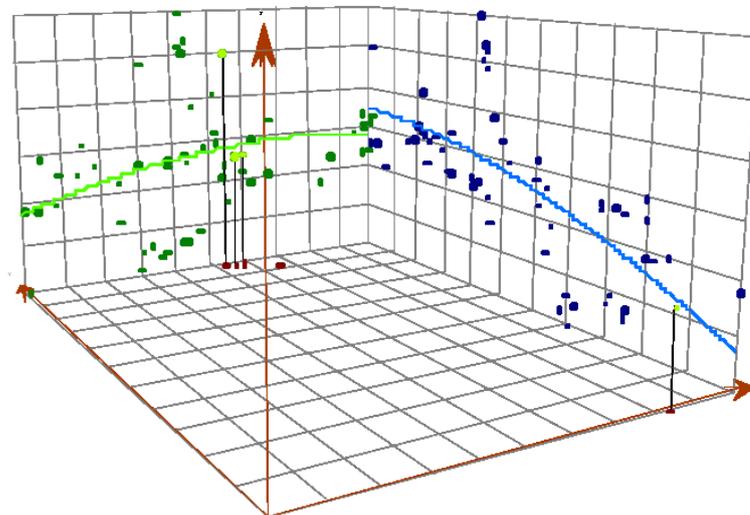
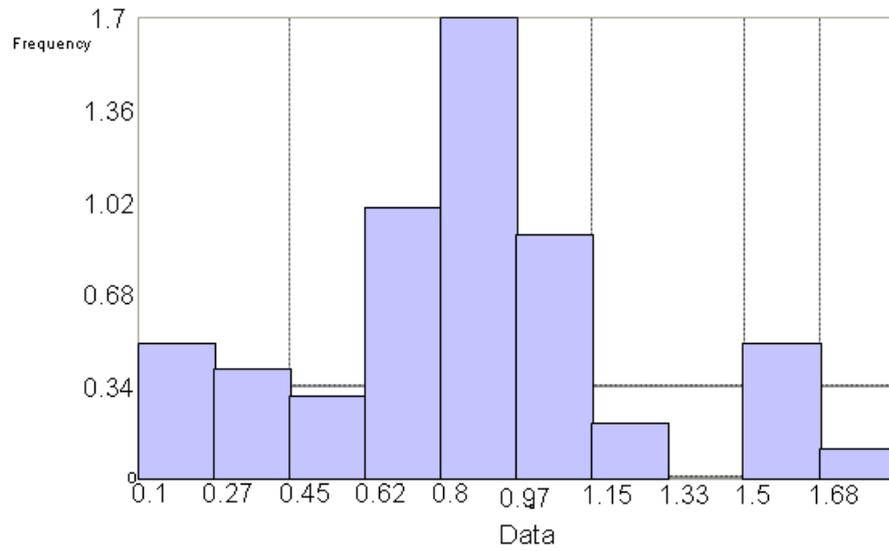


Figura 50 - 3D Trend Analysis dell'Indice di Maficità

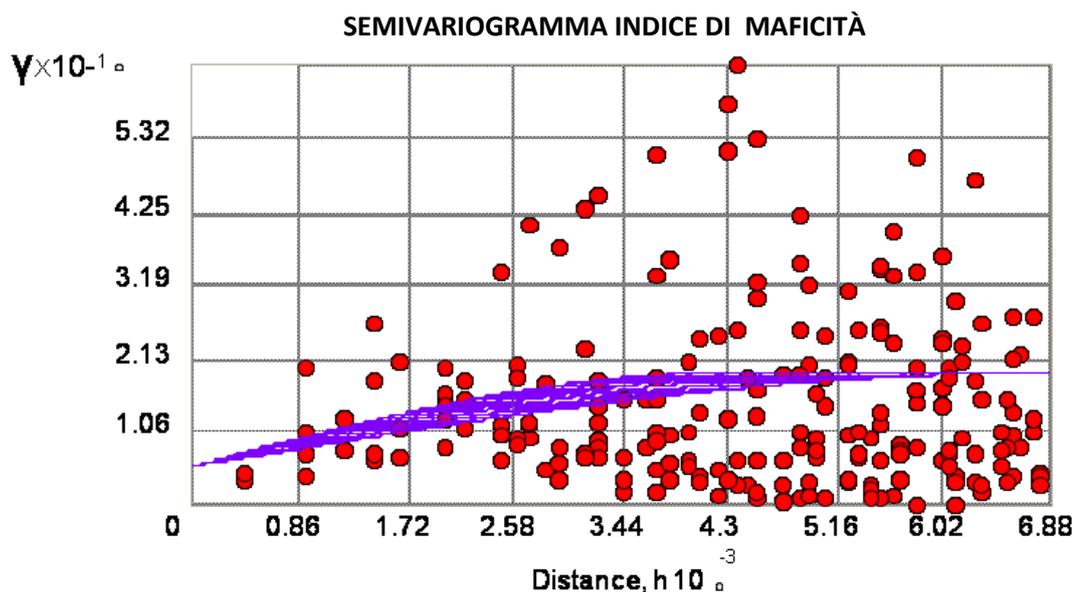


Figura 51 - Semivariogramma dell'Indice di Maficità

3.6-GENERAZIONE DELLA MAPPA LITOLOGICA

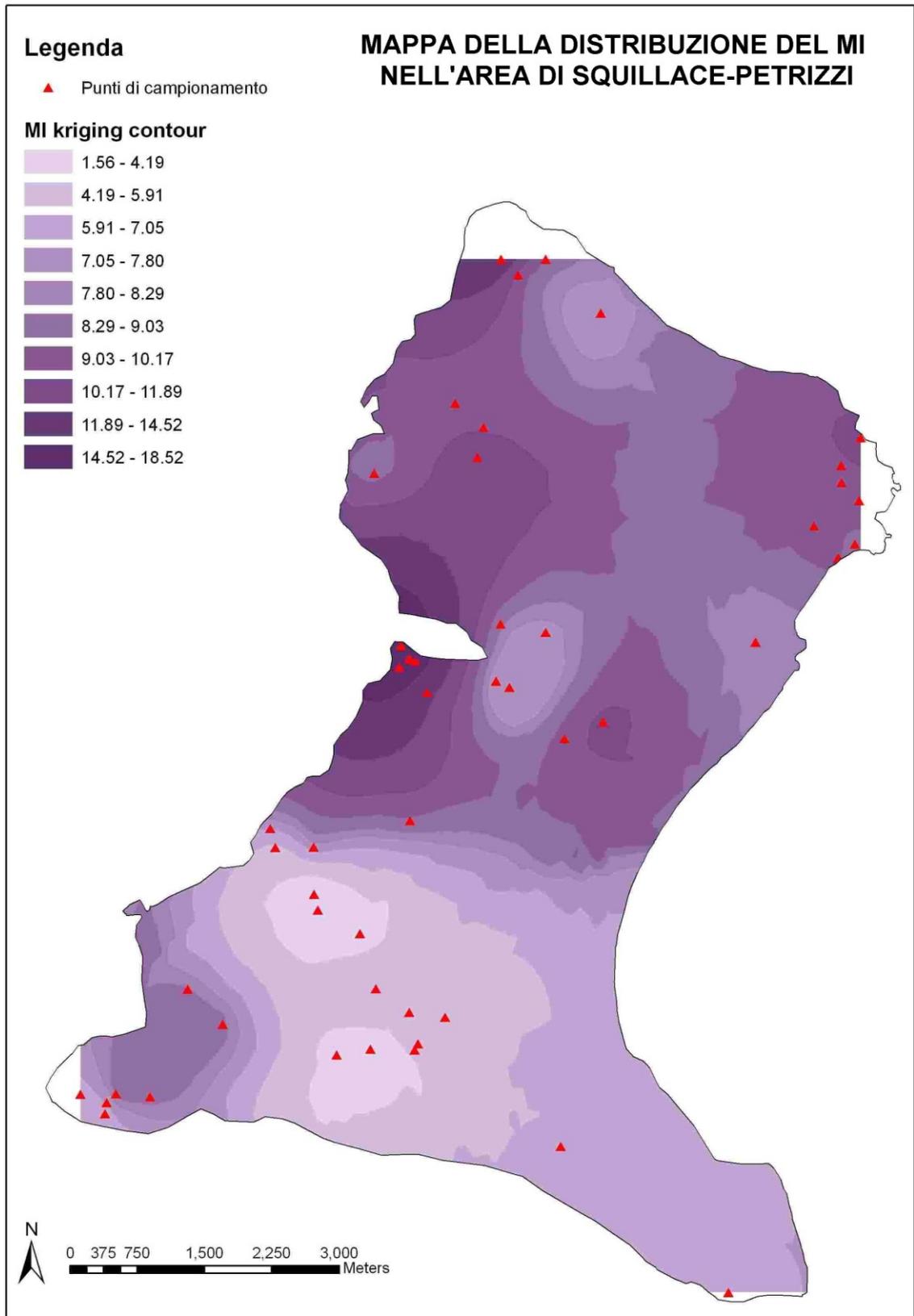
Uno scopo centrale di questo lavoro è quello di produrre varie mappature geochimiche degli elementi tali da costituire una base informativa puntuale che, opportunamente elaborata, consenta di estrapolare una mappa derivata di tipo litologico. Non sono stati riscontrati precedenti lavori scientifici in cui si fa riferimento a certa tipologia di mappatura, tale che questo caso costituisce un primo stadio verso una nuova tecnica cartografica in ambito petrologico.

L'interpolazione areale degli elementi chimici, infatti, fornisce un valore percentuale di ciascun elemento su ogni punto della mappa, ricavato con il metodo probabilistico proprio del Kriging. Dunque, se ad un punto di coordinate x,y sulla mappa corrisponde ed è nota la percentuale A, B, C rispettivamente di SiO_2 , di K_2O e di Na_2O , secondo il diagramma TAS (Middlemost, 1985) visto in precedenza, è possibile estrapolarne la litologia grazie ad una funzione opportunamente programmata per ESRI ArcGIS 9.3® e successive versioni, la quale prende in ingresso i parametri A, B, e C e restituisce il litotipo corrispondente.

E' stato dunque necessario pensare ed implementare un algoritmo in grado di compiere questo processo in modo ciclico per tutti i punti costituenti la mappatura, previo un processo di vettorializzazione puntuale dei raster, tale da ottenere un informazione georeferenziata puntuale dei contenuti in SiO_2 ed alcali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$).

L'algoritmo in Figura 52 consta nella ricostruzione algebrica dei poligoni comprensivi di ciascun litotipo secondo i contenuti in silice (asse X) ed alcali(asse Y); successivamente la costruzione di una funzione parametrica che restituisce l'etichetta del litotipo in base ai parametri percentuali degli stessi elementi. L'output finale sarà una mappa formata da tutti i punti cromaticamente

omogenei per ciascun litotipo, ovvero una mappa litologica costruita a partire dal dato geochimico interpolato (Figura 53)



```

def PointClassif(x,y,rock):

    n = len(rock)
    inside = False

    p1x,p1y = rock[0]
    for i in range(n+1):
        p2x,p2y = rock[i % n]
        if y > min(p1y,p2y):
            if y <= max(p1y,p2y):
                if x <= max(p1x,p2x):
                    if p1y != p2y:
                        xints = (y-p1y)*(p2x-p1x)/(p2y-p1y)+p1x
                    if p1x == p2x or x <= xints:
                        inside = not inside
        p1x,p1y = p2x,p2y

    return inside

#TAS85
x = input("Please, enter SiO2 value: ")
print ("you entered " + str(x))
x=float(x)

y = input("Please, enter K2O + Na2O value: ")
print ("you entered " + str(y))
y=float(y)

D_gb          =[(44.5,1.75),(50.5,4.9),(45.5,4),(44.5,1.75)]
monzodiorite  =[(45.5,4),(50.5,4.9),(56,7),(52,6.5),(45.5,4)]
monzonite     =[(52,6.5),(56,7),(59.5,8.5),(56,8),(52,6.5)]
syenite       =[(56,8),(59.5,8.5),(62.1,11.1),(59.5,11.2),(56,8)]
af_syenite    =[(59.5,11.2),(62.1,11.1),(63,12.75),(62,13.5),(59.5,11.2)]
diorite       =[(44.5,1.75),(57.4,4.75),(60.25,5.5),(50.5,4.9),(44.5,1.75)]
qtz_monzodiorite =[(50.5,4.9),(60.25,5.5),(64,7.5),(56,7),(50.5,4.9)]
qtz_monzonite =[(56,7),(64,7.5),(67,9.5),(59.5,8.5),(56,7)]
qtz_syenite   =[(59.5,8.5),(67,9.5),(68,10.4),(62.1,11.1),(59.5,8.5)]
af_qtz_syenite =[(68,10.4),(69,11.1),(63,12.75),(62.1,11.1),(68,10.4)]
tonalite      =[(80,2.67),(80,3.7),(64,5.4),(60.25,5.5),(57.4,4.75),(80,2.67)]
granodirite   =[(80,3.7),(80,5.1),(74,6.5),(64,7.5),(60.25,5.5),(64,5.4),(80,3.7)]
granite       =[(80,5.1),(80,7.3),(68,10.4),(67,9.5),(64,7.5),(74,6.5),(80,5.1)]
af_granite    =[(80,7.3),(80,7.9),(69,11.1),(68,10.4),(80,7.3)]

i=-1
rock=[D_gb, monzodiorite, monzonite, syenite, af_syenite, diorite, qtz_monzodiorite, qtz_monzonite, qtz_syenite,
af_qtz_syenite, tonalite, granodirite, granite, af_granite]
classif_name=["D,Gb", "monzodiorite", "monzonite", "syenite", "af syenite", "diorite", "qtz monzodiorite", "qtz monzonite", "qtz
syenite", "af qtz syenite", "tonalite", "granodirite", "granite", "af granite"]

for rock in rock:
    i=i+1
    if PointClassif(x,y,rock):
        print "Your rock is a " + str(classif_name[i].upper())

```

Figura 52 – Parte dell’algoritmo per classificazione delle rocce plutoniche basato sul diagramma TAS (Middlemost, 1985). Autore: Luigi Zappala’ – PHD Thesis 2013

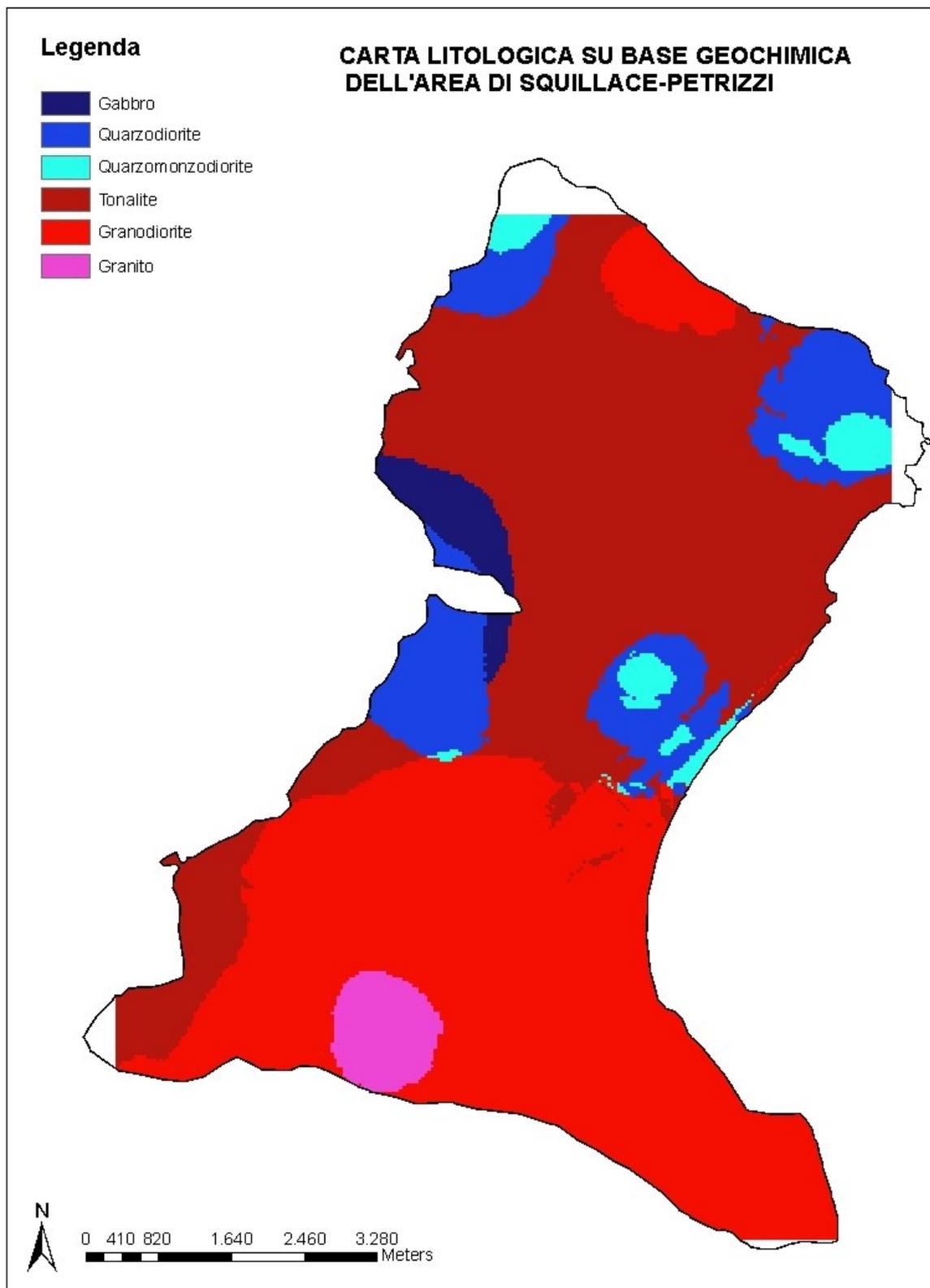


Figura 53 - Mappa litologica ricostruita mediante l'algoritmo di classificazione basato su TAS Middlemost 1985

3.7-RISULTATI

La mappa geolitologica interpolata dai parametri geochimici si evidenzia la presenza di prevalenti tonaliti nella parte settentrionale dell'area di studio, e di prevalenti granodioriti in quella meridionale. In tre aree specifiche, ubicate nei settori nord-occidentale, nord-orientale e centro-orientale si riscontra la presenza di quarzodioriti e di quarzomonzodioriti; il settore centro-occidentale si caratterizza anche per la presenza di gabbri, associati ad un ulteriore corpo quarzodioritico. I graniti risultano confinati su un'area ristretta del settore meridionale; si segnala anche la presenza di limitati corpi granodioritici nel settore settentrionale.

Dal confronto con i dati precedenti si può valutare nello specifico che:

- Le tonaliti biotitiche ad anfibolo di Caggianelli (1988) e le tonaliti della carta litologica ricoprono aree pressoché uguali;
- Le tonaliti biotitiche di Caggianelli (1988) e le granodioriti della mappa litologica occupano, anche in questo caso, aree molto simili;
- I corpi granitici sembrano traslati verso SW rispetto ai graniti peralluminosi e ai filoni granitici e leucotonalitici di Caggianelli (1988);
- I gabbri, le quarzodioriti e le quarzomonzodioriti sono mappati come tonaliti biotitiche ad anfibolo da Caggianelli (1988); non è emersa, infine, la presenza delle tonaliti biotitiche a K-feldspato nell'area nei pressi di Soverato, presumibilmente per una minore densità di dati analitici confluenti nel processo di interpolazione.

Dall'osservazione critica delle mappature geochimiche, per lo più riportate in appendice, si può evincere che:

- La SiO_2 è più ricca nelle granodioriti e nei graniti del settore meridionale, nelle granodioriti del settore settentrionale ed anche nelle tonaliti affioranti nel settore centrale e centro-orientale, indicando la presenza di rocce tonalitiche più evolute.
- Il contenuto in Al_2O_3 è maggiore in corrispondenza delle quarzodioriti e dei gabbri affioranti nel settore centro-occidentale. Le granodioriti del settore settentrionale risultano decisamente più arricchite rispetto a quelle meridionali;
- MgO , FeO_t (e MI), MnO , CaO , TiO_2 mostrano alti valori in corrispondenza dei gabbri e delle quarzodioriti del settore centro-occidentale e delle quarzodioriti e quarzomonzodioriti del settore nord-orientale, nord-occidentale e centro orientale. Le granodioriti del settore settentrionale presentano dei contenuti di poco maggiori rispetto a quelle del settore meridionale;

- Il K_2O ha tenori più bassi nel settore centro-occidentale ove affiorano gabbri e quarzodioriti. Valori più alti si registrano nelle granodioriti e nelle tonaliti affioranti in parte del settore meridionale e settentrionale, e nelle quarzodioriti e quarzomonzodioriti dei settori nord-orientale e nord-occidentale. Più alta è la presenza nelle granodioriti del settore settentrionale rispetto a quelle del settore meridionale;
- Il Na_2O è più abbonante nella zona Nord e Sud dell'area, ove affiorano maggiori granodioriti, scarsamente diffuso invece è nelle aree tonalitiche. Le quarzodioriti e i gabbri del settore centro-occidentale ne risultano impoveriti;
- P_2O_5 risulta distribuito maggiormente nel settore settentrionale dell'area in esame: ne risultano più arricchiti le quarzodioriti e le quarzomonzodioriti del settore nord-orientale e nord-occidentale. Le granodioriti e i graniti della del settore meridionale ne risultano fortemente impoveriti;
- Ba e Rb mostrano andamenti molto simili: evidenziano l'abbondanza di K-feldspato e biotite nel settore meridionale, nord-occidentale e nord-orientale;
- Cr e Ni risultano particolarmente abbondanti nel settore nord-occidentale. Si riscontrano inoltre concentrazioni ridotte nei graniti e nelle granodioriti dell'area meridionale;
- Lo Sr presenta alta concentrazione nel settore centro-occidentale, nord-occidentale e nord-orientale;
- V e Y risultano abbondanti nei settori centro-occidentale, centro-orientale, nord-occidentale e nord-orientale;
- Lo Zr è più abbondante nel settore meridionale, centro-orientale, nord-orientale e nord-occidentale;
- L'ASI presenta un andamento molto simile a quello di SiO_2 : i valori più bassi si hanno nei settori dove affiorano i gabbri, le quarzodioriti e le quarzomonzodioriti, fatta eccezione per quelle del settore nord-occidentale;
- Il CIA risulta elevato nei corpi granitici e granodioritici del settore meridionale; valori più bassi si hanno per le tonaliti. Gabbri, quarzodioriti e quarzomonzodioriti, fatta eccezione per quelle del settore nord-occidentale, presentano valori ancora più ridotti.

Le mappe di distribuzione degli elementi evidenziano l'andamento spaziale dei trend geochemici dei diagrammi di variazione visti precedentemente.

Inoltre hanno suggerito taluni spunti utili alle seguenti considerazioni:

- Le quarzodioriti e le quarzomonzodioriti appaiono costituire, all'interno dell'area occupata dalle tonaliti, dei piccoli corpi indipendenti di cui le quarzomonzodioriti occupano le porzioni centrali;
- Alcune mappe evidenziano delle variazioni composizionali all'interno di unità litologiche omogenee: in particolare la mappa relativa a SiO₂ mostra dei valori massimi all'interno del campo delle tonaliti; quelle relative a MgO, FeOt, MnO, CaO, TiO₂, V, Y, MI e ASI evidenziano, invece, la presenza di valori minimi localizzati all'interno dello stesso campo. La distribuzione spaziale dei massimi e dei minimi mostra, inoltre, un allineamento dei termini più evoluti della parte centrale dell'area secondo una direttrice NE-SW che potrebbe suggerire l'esistenza di un fattore di controllo tettonico;
- Le granodioriti del settore settentrionale evidenziano dei valori di Al₂O₃, MgO, FeOt, MI, CaO, TiO₂, P₂O₅, Ba, Rb, Cr, Ni, V e Y maggiori rispetto a quelli del settore meridionale; si registrano dei valori più bassi esclusivamente per il Ba;
- I gabbri non risultano rilevati dalle mappe di distribuzione;
- Le quarzomonzodioriti presenti al "nucleo" delle quarzodioriti presentano, un forte arricchimento in FeOt e K₂O (quest'ultimo legato al contenuto in biotite, non in K-feldspato) e uno meno evidente in MgO e TiO₂: ciò è interpretato in termini di un minore grado di evoluzione rispetto alle quarzodioriti, contrariamente a quanto derivabile da una semplice lettura dei diagrammi di classificazione.

L'area pilota è stata opportunamente prescelta a motivo di una discreta omogeneità dei litotipi affioranti e di scarse o nulle evidenze geostrutturali che avrebbero intralciato la regolarità d'esecuzione del krigaggio. Di fatto, a differenza di altri metodi come lo *Spline with Barriers* implementato in Esri ArcGis®, un metodo deterministico di certo meno adatto a trattare il fenomeno di imprevedibilità tipico dei dati geologico ambientali, l'implementazione software del Kriging non prevede l'uso di barriere atte a delimitare le superfici di interpolazione.

L'analisi dei semivariogrammi ha rivelato la presenza di un'evidente anisotropia orientata a circa 30 gradi nord. Ciò indica l'esistenza di una variabilità spaziale strutturata espressa in talune mappe come la maficità o la SiO₂ ove si osserva un direzione preferenziale di allineamento dei massimi.

La ricostruzione software della mappatura litologica generata per interpolazione dei parametri geochimici ha evidenziato la presenza di prevalenti tonaliti nella parte settentrionale dell'area di studio e di prevalenti granodioriti in quella meridionale. In tre aree specifiche, ubicate nei settori nord-occidentale, nord-orientale e centro-orientale si riscontra la presenza di quarzodioriti e di quarzomonzodioriti; il settore centro-occidentale si caratterizza anche per la presenza di gabbri,

associati ad un ulteriore corpo quarzodioritico. I graniti risultano confinati su un'area ristretta del settore meridionale; si segnala anche la presenza di limitati corpi granodioritici nel settore settentrionale.

Dal confronto con la letteratura precedente, ovvero alla mappatura riportata da Caggianelli (1988), la distribuzione dei vari litotipi risulta pressochè concordante.

Le mappe di distribuzione degli elementi ottenute con il metodo geostatistico evidenziano l'andamento spaziale dei trend geochimici dei diagrammi di variazione visti nel paragrafo precedente. Inoltre hanno suggerito taluni spunti utili alle seguenti considerazioni:

- Le quarzodioriti e le quarzomonzodioriti appaiono costituire, all'interno dell'area occupata dalle tonaliti, dei piccoli corpi indipendenti di cui le quarzomonzodioriti occupano le porzioni centrali;
- Alcune mappe evidenziano delle variazioni composizionali all'interno di unità litologiche omogenee: in particolare la mappa relativa a SiO_2 mostra dei valori massimi all'interno del campo delle tonaliti; quelle relative a MgO , FeOt , MnO , CaO , TiO_2 , V , Y , MI e ASI evidenziano, invece, la presenza di valori minimi localizzati all'interno dello stesso campo. La distribuzione spaziale dei massimi e dei minimi mostra, inoltre, un allineamento dei termini più evoluti della parte centrale dell'area secondo una direttrice NE-SW che potrebbe suggerire l'esistenza di un fattore di controllo tettonico durante la messa in posto delle masse plutoniche;
- Le granodioriti del settore settentrionale evidenziano dei valori di Al_2O_3 , MgO , FeOt , MI , CaO , TiO_2 , P_2O_5 , Ba , Rb , Cr , Ni , V e Y maggiori rispetto a quelli del settore meridionale; si registrano dei valori più bassi esclusivamente per il Ba ;
- I gabbri non risultano rilevati dalle mappe di distribuzione;
- Le quarzomonzodioriti presenti al "nucleo" delle quarzodioriti presentano, un forte arricchimento in FeOt e K_2O (quest'ultimo legato al contenuto in biotite, non in K-feldspato) e uno meno evidente in MgO e TiO_2 : ciò è interpretato in termini di un minore grado di evoluzione rispetto alle quarzodioriti, contrariamente a quanto derivabile da una semplice lettura dei diagrammi di classificazione.

Riguardo il prodotto software pensato e sviluppato per la ricostruzione software delle mappe geolitologiche, si evidenzia l'originalità dell'applicazione, non avendo finora riscontrato altre precedenti implementazioni; di per sé ha fornito risultati di notevole interesse, malgrado le condizioni al contorno non siano favorevoli, come la densità blanda de campionamento. Come proposito per un approfondimento del sistema è sorta l'idea di integrare l'algoritmo con altre tipologie di classificazione, oltre che su base geochimica, anche su base modale

(QAPF), comunemente utilizzata per la classificazione delle rocce plutoniche, ma anch'essa con i propri limiti non tenendo conto della variabilità delle miscele isomorfe nelle fase di cristallizzazione di un fuso magmatico.

Il sistema inoltre apporta un alto contributo nella programmazione di campagne di campionamento laddove, grazie all'elaborazione dei dati preesistenti e di letteratura, è possibile ottenere mappature indicative dell'intensità e la frequenza dei fenomeni variazionali sul terreno, utili per l'ottimizzazione e l'eventuale infittimento delle nuove maglie di campionatura. Si segnala, infine, come nella mappatura generata dal software si sono riscontrate concordanze apprezzabili laddove i limiti delle mappatura precedente (Caggianelli, 1988) sono delineati in base ad un accurato rilevamento geolitologico di campagna. Ove, invece, il bedrock è obliterato da coperture di ogni specie, sia esse naturali o antropiche, impedendo l'accesso diretto al rilievo petrologico, l'interpolazione con algoritmi probabilistici rimane un metodo maggiormente affidabile e trasparente rispetto ad altri, spesso dettati da logiche del tutto soggettive o talvolta inesprese.

4 - PROGETTAZIONE ED IMPLEMENTAZIONE SU PIATTAFORMA “GIS” DI UN METODO DI “IMAGE PROCESSING” PER L’AUTOMAZIONE DELL’ANALISI MODALE E MICROSTRUTTURALE: LO STUDIO DEI GRANATI ZONATI DI MAMMOLA PER LA RIDEFINIZIONE DEI VINCOLI PER LA COSTRUZIONE DEI “P-T PATH”

4.1-FINALITA’ PROGETTUALI

Lo studio della distribuzione quantitativa degli elementi chimici nei materiali rocciosi è utile per la definizione delle variabilità composizionali nelle soluzioni solide dei minerali, come pure nei composti criptocristallini (ad es. la pasta di fondo nelle ceramiche) o amorfi, e costituisce l’oggetto dello studio della minerochimica in seno alla petrografia ed alla petrologia.

Tra le molteplici tecniche investigative sui minerali, l’analisi microscopica eseguita al SEM-EDS o EPMA-WDS consente di apprezzare talune peculiarità spesso poco o per nulla visibili per mezzo di altre tecniche investigative. Per tali ragioni, tali analisi si sono affermate negli ultimi anni quali tecniche ormai quasi routinarie per lo studio quantitativo delle variabilità composizionali in seno alle fasi cristalline e non.

Come in parte già accennato in premessa, l’analisi statistica multivariata, applicata alle immagini multispettrali come le immagini a raggi X, consente di ottenere una valutazione quantitativa delle caratteristiche delle singole entità reali di cui le immagini stesse sono costituite, fornendo talvolta un riscontro di maggiore attendibilità sulla correttezza della classificazione o sui reali rapporti microstrutturali, quali quelli collegati alla definizione delle paragenesi di equilibrio nelle rocce metamorfiche.

In tale contesto si inserisce la terza parte dell’attività di ricerca svolta durante il triennio, che ha avuto come scopo principale quello di ideare ed implementare un metodo analitico semi-automatizzato in forma di algoritmo scritto in Python, in grado di integrarsi con la suite software ESRI ArcGis® 9.3 e successive. Il metodo sviluppato consente uno studio peculiare delle fasi mineraliche all’interno di una sezione sottile, esaltandone le differenze minerochimiche e microstrutturali, specie quando ci si concentra sull’analisi di una singola fase. In tale circostanza infatti la metodologia consente di ottenere una mappa classificata con colori arbitrari in grado di definire rapidamente eventuali distribuzioni composizionali utili ad enfatizzare alcune caratteristiche essenziali nella modalità di accrescimento del minerale medesimo. Tale peculiarità

è tanto più importante quando, ad esempio, risulta connessa, come nel caso della petrogenesi delle rocce metamorfiche, alle variazioni di pressione e temperatura che avvengono normalmente durante l'evoluzione tettono-metamorfica di un basamento cristallino. Tale metodo è inoltre di grande ausilio per la quantificazione di fasi metastabili, quali i prodotti di reazioni chimiche inter o intrafase, dovuti perlopiù ai processi di reazione tra due minerali a contatto in condizioni di subsolidus. Come vedremo in seguito, i risultati derivanti da tale tecnica sono estremamente utili per la rielaborazione degli equilibri termodinamici in termini di variazioni pressione-temperatura (P-T) di una roccia metamorfica, definiti per mezzo di altri software ormai di largo uso in campo petrologico (es. Perplex – Connolly, 1990; Connolly e Petri, 2003). In tale contesto si inserisce l'esempio utilizzato per testare le potenzialità della tecnica investigativa implementata, che ha avuto lo scopo di ri-determinare alcuni vincoli mineralochimici utili alla costruzione dei P-T path (Figura 54) dei micascisti granatiferi del Complesso di Mammola (vedi Angi et al., 2010), quali parametri ambientali in grado di tracciare la storia metamorfica delle rocce appartenenti alla crosta superiore del Massiccio delle Serre.

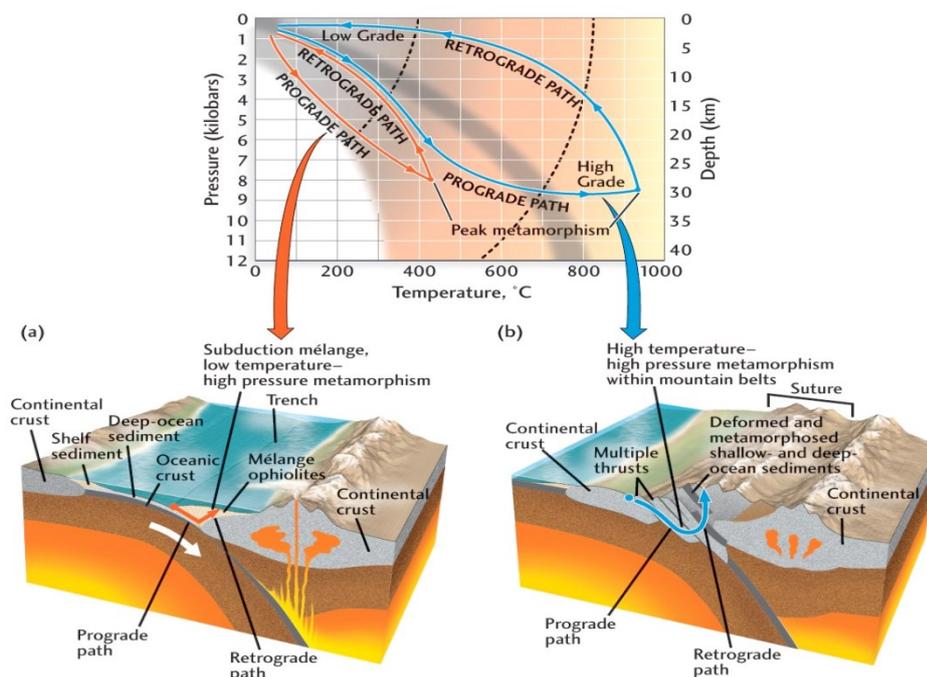


Figura 54 – Esempio schematico del concetto di PT path a) Schema di metamorfismo di alta pressione-bassa temperatura; b) diagramma cartesiano P-T e percorsi progrado e retrogrado c) Schema di metamorfismo di bassa pressione - alta temperatura

A tal fine, dopo un breve excursus sui fondamenti teorici sulle tecniche di analisi di immagine, verrà di seguito descritto il metodo implementato per l'analisi delle X-Ray Map selezionate, spiegandone la logica e la sua articolazione. Successivamente la metodologia verrà dunque

applicata al caso studio per il quale sono state prescelte ed elaborate due immagini di granato ricavate al SEM EDS provenienti da due micascisti granatiferi (Figura 56), attraverso cui è stato possibile, rideterminare alcuni vincoli termo-barici, definiti su alcune pseudosezioni P-T precedentemente calcolate (vedi Angi et al., 2010). I risultati ottenuti hanno quindi consentito di determinare in maniera più attendibile ed oggettiva i vincoli mineralochimici e tessiturali utili a definire le paragenesi di equilibrio stabilizzate alle differenti condizioni P-T, estrapolando in maniera più consapevole anche le correlazioni con l'evoluzione blasto-deformazionale con relative ricadute sulla ricostruzione delle fasi deformazionali anche a scala regionale.

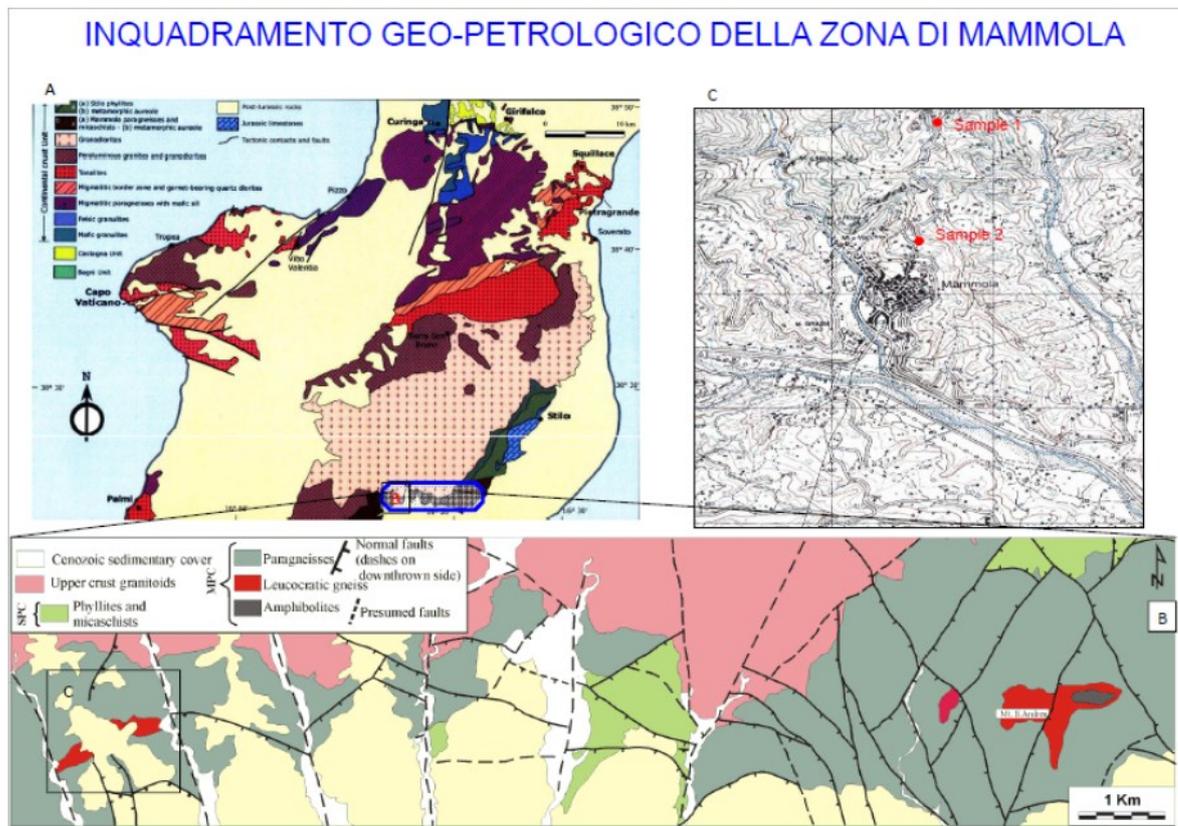
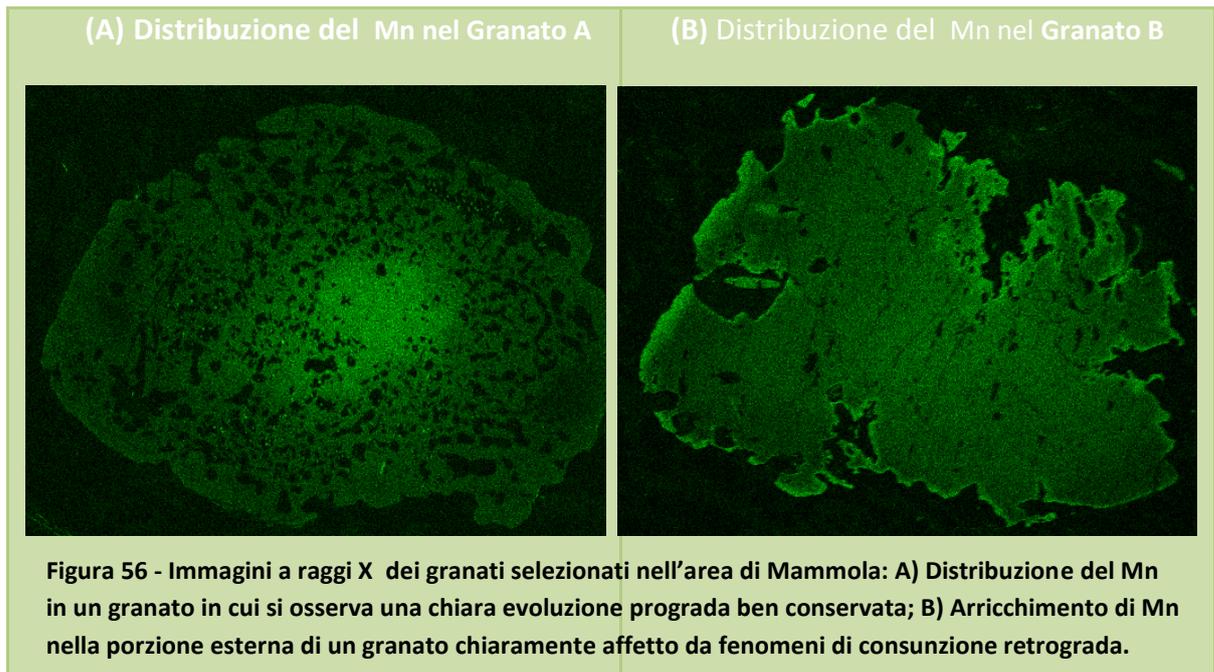


Figura 55- Inquadramento geo-petrologico dell'area studio: A) Carta geologica schematica del Massiccio delle Serre (Caggianelli et al., 2013); B) Carta Geologica schematica della zona di Mammola (Angi et al., 2010); C) Localizzazione dei punti di campionamento dei micascisti granatiferi analizzati

In accordo con Spear, 1995 e Evans, 2004, l'utilizzo dello studio della distribuzione mineralochimica nei granati rappresenta un importante indicatore delle variazioni P-T in seno alle rocce metamorfiche. Tale peculiarità ha consentito di tracciare l'evoluzione metamorfica dell'area di Mammola, collegando altresì i vincoli P-T agli eventi tettono-deformativi delineati attraverso l'analisi strutturale.

In particolare, la fase prograd del metamorfismo regionale che ha interessato l'area, è testimoniata dalla presenza di relitti mineralogici all'interno di granati zonati, caratterizzati da nuclei particolarmente ricchi in manganese (Fig.51A), mentre la fase retrograda è documentata da fenomeni di consunzione dei granati pre-esistenti, formanti bordi particolarmente arricchiti in Mn (Fig.51B), testimonianti a loro volta una chiara evoluzione retrograda (Spear, 1995). Quest'ultima seguita da un'ulteriore evoluzione retrograda tardiva collegata alla formazione di shear zone milonitiche evolventi in greenschist facies (Angi et al., 2010).



In accordo con Angi et al., (2010), l'analisi petrografico micro-strutturale integrata con alcuni dati minerochimici puntuali ha consentito di definire come durante la prima fase deformativa riconoscibile (early -D1), vi sia stato lo sviluppo di una pervasiva foliazione di piano assiale di pieghe isoclinali cui si associa un evento metamorfico (early M1) testimoniato dalla presenza di inclusioni di zoisite all'interno di granati relativamente ricchi in componente spessartinica ($Alm_{48-58}Sps_{12-22}Grs_{24-30}Prp_{1-3}$) in paragenesi con plagioclasio, (An_{30-50}), biotite ($Ann_{35-45}Phl_{25-35}East_{10-15}Sdph_{15-20}$) e quarzo (Fig. 52a).

La seconda fase di questo primo evento metamorfico (late M1), legato alla tarda fase deformativa D1, è rappresentata da granati con zoisite assente ($Alm_{62-70}Sps_{7-10}Grs_{16-26}Prp_{6-10}$), caratterizzati da una diminuzione dei tenori di grossularia e spessartina, in paragenesi con mica bianca e biotite ($Ann_{32-40}Phl_{18-25}East_{12-18}Sdph_{25-30}$). Tale evoluzione suggerisce una crescita del granato a spese di

clorite, mica bianca, quarzo e zoisite, in accordo con il seguente modello di reazione (Menard e Spear, 1993):



L'analisi dei pattern di zonazione dei granati suggerisce la presenza di una seconda fase di crescita degli stessi ($\text{Alm}_{75-78}\text{Sps}_{1-4}\text{Grs}_{4-14}\text{Prp}_{12-18}$) in paragensi con un plagioclasio scarsamente anortitico (An_{37-3}), probabilmente legato alle condizioni di picco metamorfico.

La seconda fase metamorfica (M2), connessa alla seconda fase deformativa (D2), è responsabile di un clivaggio di crenulazione accompagnata da locale blastesi solo in parte formante una vera e propria scistosità con crescita sincinemica di $\text{Qtz+Pl+Wmca}\pm\text{Bt}$ (Fig. 52b).

L'inizio della fase di metamorfismo regionale retrogrado (early D3), è documentato da fenomeni di consunzione dei granati (early M3) (Fig. 52c). In alcuni campioni, gli effetti della consunzione sono chiaramente indicati da relitti di granato presenti tra mica bianca, (Phg_{3-10}), plagioclasio (An_{30-35}), biotite ($\text{Ann}_{36-44}\text{Phl}_{34-38}\text{East}_{7-12}\text{Sdph}_{9-13}$) e clorite in paragenesi con granato arricchito nel termine spessartinitico ($\text{Alm}_{52-55}\text{Sps}_{20-29}\text{Grs}_{10-19}\text{Prp}_{6-8}$). Ciò appare indicativo di reazioni di breakdown durante la fase retrograda, chiaramente mostrati dalle variazioni nei profili di zonazione del Mn (Spear, 1995).

La tarda fase deformativa (late D3) conclude il ciclo orogenetico con la definizione di piani di foliazione milonitici pervasivi, con la conseguente definizione di strutture S/C, shear bands, foliazione oblique rispetto al piano di foliazione principale, boudinage, porfiroclasti di granato di tipo σ e δ e porfiroclasti di feldspato. Durante questa fase si sviluppa inoltre una CPO (*Cristallographic Preferred Orientation*) del quarzo, dovuta agli effetti dei processi di *sub-grain rotation* e *grain boundary migration recrystallisation* (Passchier e Trouw, 1996) (Fig. 52d,e).

L'overprint metamorfico statico (M4), determinante fenomeni di riassetto mineralogico e tessiturale delle rocce, si manifesta localmente attraverso la parziale oblitterazione del fabric pre-esistente, legato alle fasi deformative precedenti. In particolare, si assiste alla formazione di domini di quarzo, originariamente nastriforme, quasi complementemente ricristallizzato in maniera poligonale, porfiroblasti privi di orientazione preferenziale e rim di granati da subeudrali a eudrali privi di inclusioni (Figura 57e,f). In particolare, le rocce in contatto con i corpi plutonici tardo varisici del batolite delle Serre, mostrano un aumento graduale del grado metamorfico al progredire dell'evento termico; ciò è evidenziato dal passaggio da paragenesi di basso grado

(Wmca+Bt+Crd+Pl+Qtz±Chl) a paragenesi di picco del metamorfismo termico (Bt+And+Pl+Qtz+Crd±St±Wmca±Sil±Hc), dove l'andalusite è comunemente associata nello spazio con profiroblasti di cordierite, biotite e fasi opache. La staurolite appare comunemente come fase relitta, sostituita dall'andalusite e/o da mica bianca e cordierite.

Il breakdown della staurolite può essere descritto attraverso la reazione di Pattison et al. (1999):



Infine, i micascisti a granato sviluppano una paragenesi rappresentata da porfiroclasti prismatici di biotite, (Ann₂₉Phl₁₆East₂₀Sdph₃₅) in equilibrio con granati relativamente ricchi in componente almandinica e privi di inclusioni (Alm₈₁₋₈₂Sps₃₋₄Grs₃₋₄Prp₁₁₋₁₂). Il picco del metamorfismo termico è documentato dai fenomeni di reazione che coinvolgono andalusite e cordierite.

Relazioni blasto-deformazionali al microscopio ottico

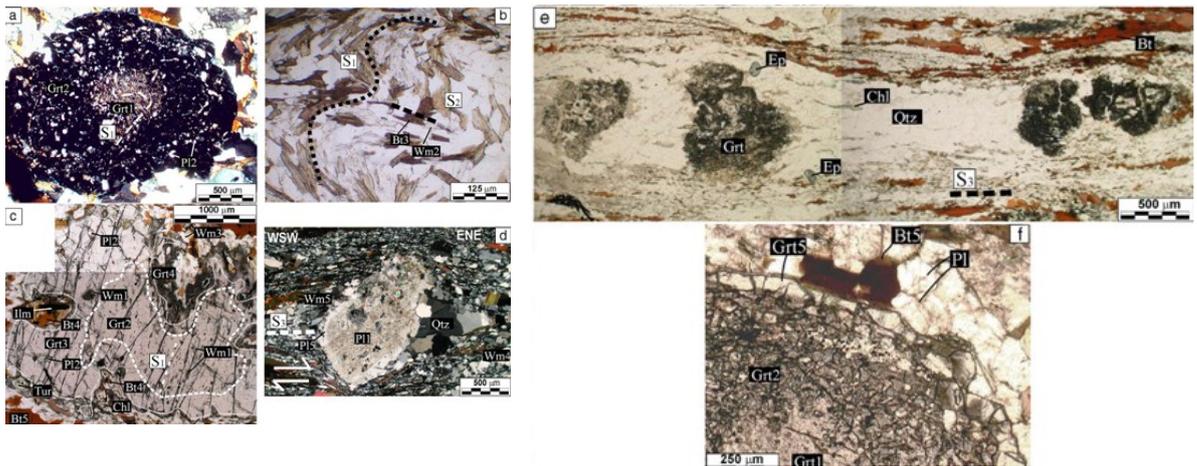


Figura 57 - Sezioni sottili rappresentative delle fasi blasto-deformative che hanno interessato le rocce afferenti al Complesso di Mammola. (Da Angi et al, 2010 - Modificato): a) esempio di granato caratterizzati da una zonatura prograda con nuclei ricchi in inclusioni zoisiti che; b) sviluppo di una superficie S2 in seguito alla microcrenulazione della S1; c) esempio di granato caratterizzato da ampie zone di consumo macate da profonde anse ricche in biotite e clorite; d) porfiroclasto precinematico di plagioclasio con chiari fenomeni di recovery tardotettonico testimoniati dalla ricristallizzazione diffusa di quarzo nelle ombre di pressione asimmetriche; e) esempio di fenomeni di shearing duttile di tipo estensionale; f) bordo limpido di ricristallizzazione post-tettonica in equilibrio con plagioclasio e biotite.

In Tabella 1 è mostrato un quadro schematico delle relazioni blasto-deformazionali che hanno interessato le rocce del Complesso di Mammola durante gli eventi metamorfici ascrivibili sia al ciclo orogenico che susseguentemente a quello termico (modificata da Angi et al., 2010).

| Tabella 1 | | | | | | | |
|---------------------------|--|---|---|--|--|---|-----------------------------|
| METAMORFISMO OROGENETICO | | | | | | | METAMORFI SMO TERMICO |
| EVOLUZIONE METAMORFICA | FASE PROGRADA | | | FASE RETROGRADA | | EVENTO STATICO | |
| Fasi deformative | Early D1 | Late D1 | D2 | Early D3 | Late D3 | D4 | Late D4 |
| Evidenze strutturali | | Foliazione pervasiva di piano assiale di pieghe isoclinaliche con relitti di Qz ai nuclei | Micropiegamento da blandamente ondulato a molto fitto delle preesistente foliazione, che porta alla formazione di un clivaggio di crenulazione irregolare | Foliazione milonitica e stretching lineation | | Assenza di orientazione preferenziale | |
| Fasi metamorfiche | Early M1 | Late M1 | M2 | Early M3 | Late M3 | M4 | Late M4 |
| Evidenze petrografiche | Inclusioni di zoisite all'interno di granati | Granati con zoisite assente in paragenesi con mica bianca e biotite | Crenulazione accompagnata da blastesi | Fenomeni di consunzione dei granati | S/C texture, shear bands, Microstrutture di foliazione oblique rispetto al piano di volizione principale, boudinaged texture, granati di tipo σ e δ e porfiroclasti di feldspati | Riassetto mineralogico e tessiturale delle rocce, con parziale obliterazione delle fabric legate alle fasi deformative precedenti | |

4.2-LE IMMAGINI MULTISPETTRALI E L'IMAGE PROCESSING DELLE MAPPE A RAGGI X A FINI PETROLOGICI

In scienza delle immagini, chiamasi elaborazione di un immagine qualsiasi forma di elaborazione del segnale ove l'ingresso è un'immagine, sia essa un singolo frame o una sequenza video, mentre l'output di elaborazione può essere sia un'immagine o un insieme di caratteristiche o parametri relativi all'immagine. La maggior parte delle tecniche di elaborazione dell'immagine trattano l'immagine come un segnale bidimensionale ed applicano ad esso le tecniche standard di elaborazione dei segnali.

Quando si parla di elaborazione delle immagini di solito ci si riferisce alla elaborazione digitale delle immagini, ma in campo geologico talvolta si ha a che fare anche con immagini ottiche ed analogiche a volte anche di tipo stereoscopico. In geologia ci si riferisce, spesso, al trattamento di immagini 2D acquisite mediante tecniche anche molto diverse tra loro, dall'immagine multispettrale satellitare o aerea all'immagine acquisita al microscopio ottico oppure alla mappa a raggi X acquisita per mezzo di rivelatori EDS o WDS (Figura 58 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

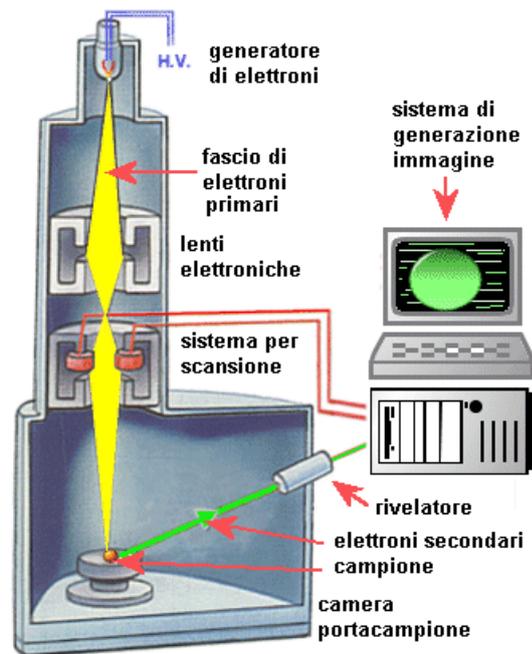


Figura 58 - Schema semplificato di un microscopio elettronico a scansione con rivelatore EDS

Ognuna di esse offre la possibilità di investigare differenti aspetti della realtà geologica, perchè a diversa scala di osservazione o perchè acquisita con sensori che rilevano radiazioni diverse da quelle del visibile, tali da rivelare o esaltare alcuni caratteri altrimenti non percepibili.

La moderna tecnologia digitale ha permesso di manipolare i segnali multi-dimensionali con sistemi che vanno da semplici circuiti digitali a computer paralleli avanzati. L'obiettivo di questa manipolazione può essere suddiviso in tre categorie:

- Image Processing (Processamento di immagini): trasforma un'immagine in un'altra immagine mediante l'applicazione di uno o più metodi di elaborazione (immagine in -> immagine out)
- Image Analysis (Analisi di Immagini): consiste nell'applicazione di metodi e algoritmi che identificano ed elaborano i segnali ai fini di misurare o quantificare elementi appartenenti all'immagine (immagine in -> measure out)

- Image Compression (Comprensione delle immagini): si basa sul processo interpretativo post analisi ed elaborazione, dal quale si estrapolano informazioni significative sul contesto rappresentato dall'immagine (immagine in -> descrizione di alto livello out)

Talvolta un'immagine può essere composta da sotto-immagini talvolta indicate come regioni d'interesse, ROI, o semplicemente regioni. Questo concetto riflette il fatto che le immagini spesso contengono insiemi di oggetti ognuno dei quali può essere la base per una regione. In un sofisticato sistema di elaborazione di immagini dovrebbe prevedere la possibilità di applicare operazioni di elaborazione all'interno di specifiche regioni selezionate.

Più generalmente, i sistemi di elaborazione di immagini richiedono che le immagini siano disponibili in forma digitalizzata, cioè costituite da array di lunghezza finita di sequenze binarie. Per la digitalizzazione, l'immagine data è campionata su una griglia discreta e ogni campione o pixel viene quantizzato utilizzando un numero finito di bit. L'immagine digitalizzata può essere successivamente elaborata o analizzata con o senza trattamenti di filtraggio preliminare.

Il filtraggio costituisce una sorta di miglioramento delle immagini: esso consente di accentuare o affinare alcune caratteristiche dell'immagine quali ad esempio i bordi, manipolare il contrasto per ottenere un display grafico più utile alla visualizzazione ed all'analisi. Questo processo non aumenta il contenuto informativo dei dati, piuttosto è coadiuvante alla riduzione del rumore di fondo, all'esaltazione dei contorni ed all'eliminazione dei pixel isolati (pixel singoli o piccoli cluster, radicalmente differenti nella risposta spettrale a tutti gli altri pixel adiacenti).

Le applicazioni dell'analisi di immagine hanno trovato riscontro negli ambiti scientifici più svariati, ad iniziare dalla medicina ove la diagnostica per immagini è all'avanguardia divenendo essa stessa una scienza a se.

Nelle discipline applicate allo studio del territorio si è iniziato a studiare le foto aeree scattate da fotocamere analogiche, successivamente si è passati allo studio delle prime immagini satellitari che, negli anni 80 avevano ancora una risoluzione geometrica e spettrale molto limitata, sino ad arrivare alle più attuali immagini iperspettrali acquisite da satelliti o sensori montati su aerei di nuova generazione, i quali forniscono molteplici immagini scattate da sensori opportunamente tarati per acquisire lunghezze d'onda differenti, appartenenti alle frequenze comprendenti le lunghezze d'onda del visibile, ma che comprendono anche l'ultravioletto e diverse bande del vicino e lontano infrarosso.

La multispettralità dell'immagine implica, dunque, la presenza di segnali energetici che non vanno analizzati solo singolarmente ma contestualizzati agli altri canali i quali forniscono diversi tipi di informazioni sulla scena. La matematica discreta con la statistica multivariata consente di affrontare uno studio di oggetti "n" dimensionali, come sono le immagini multispettrali ovvero

matrici bidimensionali che tutte insieme costituiscono un campo K^n , ovvero uno spazio vettoriale di ordine "n", con "n" pari al numero dei canali costituenti l'immagine.

4.2.1-Statistica multiariata applicata alle immagini SEM-EDS

Le funzioni di analisi statistica multivariata che più vengono utilizzate allo scopo sono:

1. L'Analisi delle Componenti Principali (PCA)
2. L'Analisi delle Componenti Canoniche (CCA)

Entrambe vengono implementate nei software più sofisticati per Image Analysis ed operano alternativamente l'una per la riduzione delle ridondanze, l'altra per ottenere una massima separabilità degli elementi discreti contenuti nell'immagine.

La funzione applicata invocata nella procedura qui presentata è la PCA, di cui si fornisce di seguito qualche dettaglio illustrativo onde evitare rimandi alla complessa letteratura specialistica di settore.

[L'Analisi delle componenti principali, d'ora in poi PCA, appartiene all'analisi fattoriale, e fu proposta nel 1901 da Karl Pearson e poi sviluppata da Harold Hotelling nel 1933. È nota anche come trasformata di Karhunen-Loève (KLT), trasformata di Hotelling o decomposizione ortogonale propria (POD, dall'inglese proper orthogonal decomposition). Lo scopo primario di questa tecnica è la riduzione di un numero più o meno elevato di variabili (rappresentanti altrettante caratteristiche del fenomeno analizzato) in alcune variabili latenti (feature reduction).

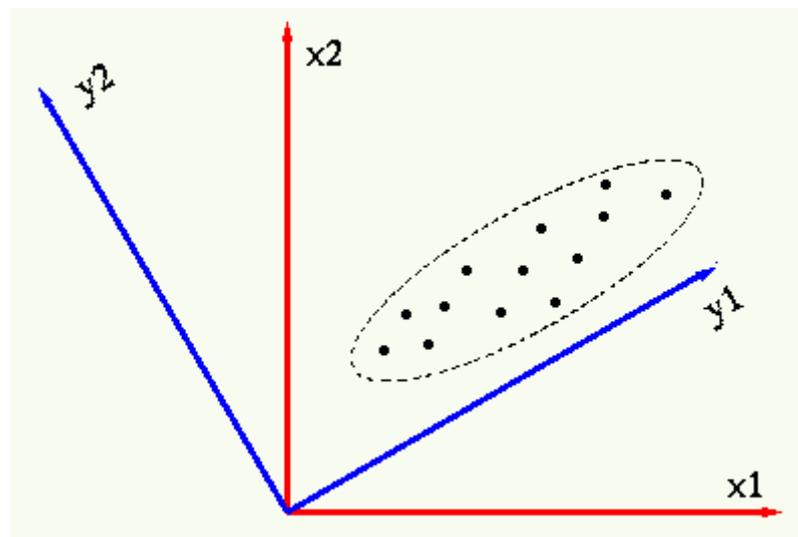


Figura 59 – Principal Component Analysis – Vettori di trasformazione

Ciò avviene tramite una trasformazione lineare delle variabili che proietta quelle originarie in un nuovo sistema cartesiano nel quale la nuova variabile con la maggiore varianza viene proiettata sul primo asse, la variabile nuova, seconda per dimensione della varianza, sul secondo asse e così via.

La riduzione della complessità avviene limitandosi ad analizzare le principali (per varianza) tra le nuove variabili.

Diversamente da altre trasformazioni (lineari) di variabili praticate nell'ambito della statistica, in questa tecnica sono gli stessi dati che determinano i vettori di trasformazione.

Assumendo che a ciascuna delle variabili originarie venga sottratta la loro media e pertanto la nuova variabile (X_i) ha media nulla,

$$\mathbf{w}_1 = \arg \max_{\|\mathbf{w}\|=1} E \left\{ (\mathbf{w}^T \mathbf{x})^2 \right\}$$

dove "arg max" indica l'insieme degli argomenti \mathbf{w} in cui è raggiunto il massimo. Con i primi (k-1) componenti, il k-esimo componente può essere trovato sottraendo i primi (k-1) componenti principali a X

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \mathbf{x} - \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}$$

e sostituendo questo

$$\mathbf{w}_k = \arg \max_{\|\mathbf{w}\|=1} E \left\{ (\mathbf{w}^T \hat{\mathbf{x}}_{k-1})^2 \right\}$$

Un metodo più semplice per calcolare la componente w_i utilizza la matrice delle covarianze di "x" ed è quello su cui si basano gli algoritmi implementati sui software più diffusi, quali ArcGis, Grass, etc. La stessa operazione può essere eseguita partendo dalla matrice dei coefficienti di correlazione anziché dalla matrice di varianza-covarianza delle variabili "x".

Innanzitutto si devono trovare gli autovalori della matrice di covarianza (o della matrice dei coefficienti di correlazione). Si ottengono tanti autovalori quante sono le variabili "x". L'autovalore

con il maggiore valore corrisponde alla dimensione "w" che ha la maggiore varianza: esso sarà dunque la varianza della componente principale 1. In ordine decrescente, il secondo autovalore sarà la varianza della componente principale 2, e così via per gli "n" autovalori. Per ciascun autovalore viene calcolato il corrispondente autovettore, ossia la matrice (riga vettore) dei coefficienti che moltiplicano le vecchie variabili "x" nella combinazione lineare per l'ottenimento delle nuove variabili "w". Questi coefficienti sono anche definiti "loadings". La matrice degli autovettori, ossia la matrice che ha per riga ciascun autovettore prima calcolato, è la cosiddetta "matrice di rotazione V". Eseguendo l'operazione matriciale $W= V.X$ (dove W= vettore colonna avente come elementi le nuove variabili w_1, w_2, \dots, w_n e X= vettore colonna avente come elementi le "vecchie variabili" x_1, x_2, \dots, x_n .) si possono trovare le coordinate di ciascun punto nel nuovo spazio vettoriale. Basterà infine prendere le coordinate per ciascun punto relative alle componenti principali per ottenere il grafico denominato "score plot". Se le componenti principali sono 3 si avrà un grafico tridimensionale, se sono 2 sarà bidimensionale, se invece si è scelta una sola componente principale lo "score plot" sarà allora monodimensionale. Mediante lo "score plot" è possibile verificare quali dati sono simili tra di loro (e quindi si può ad esempio dedurre quali campioni presentano la medesima composizione].

Così la presenza di correlazioni tra le bande di un'immagine multispettrale implica che vi è ridondanza nei dati, dunque la PCA mira ad eliminare proprio tale ridondanza, lasciando esclusivamente vedere gli elementi essenziali utili alla netta distinzione dei contorni e delle sfumature di un'immagine.

Le componenti principali scaturite dall'immagine processing sul set di immagini possono essere allungate e trasformate in colori RGB. Questo processo è noto come "decorrelation stretching" (decorrelazione in allungamento).

Se i dati delle immagini sono trasformati in spazi delle componenti principali e sono allungati in questo spazio, allora le tre bande che compongono le immagini composite in colori RGB vengono sottoposte ad allungate formando tra di loro un angolo retto. Nello spazio RGB le tre componenti di colore sono suscettibili ad essere correlate, così gli effetti di allungamento non sono indipendenti per ogni colore. Il risultato di decorrelazione tratto è generalmente un miglioramento nella gamma di intensità e saturazioni per ogni colore restando invariate le tonalità. Ovviamente, il valore risultante dello stretch di decorrelazione è anche una funzione della natura delle immagini a cui è applicato].

4.2.2-La firma spettrale: l'algoritmo introduttivo alla classificazione

Come si è detto l'analisi statistica è di grande ausilio per l'elaborazione delle immagini multispettrali, poiché consente di sintetizzare tutte le informazioni contenute separatamente all'interno di ciascuna di esse riducendone la ridondanza. L'output prodotto consiste in una collezione di immagini di sintesi che riflettono in modo statisticamente più aderente la totalità delle informazioni contenute nelle immagini originali.

Ma se la finalità è quella di classificare le immagini per mezzo di algoritmi probabilistici, è obbligatorio eseguire un passaggio propedeutico alla classificazione "strictu sensu" che meglio viene definito Clusterizzazione o Procedura di Firma Spettrale. Nel caso in specie, si è invocata la funzione IsoCluster del software ArcGis®, più spesso utilizzata come preparazione per la classificazione non supervisionata, ovvero ove non sia invocata l'assistenza preventiva dell'operatore.

Iso Cluster" utilizza una procedura iterativa di clustering di ottimizzazione, conosciuta anche come tecnica del "migrating means". L'algoritmo separa tutte le celle nel numero di gruppi unimodali distinti nello spazio multidimensionale di un raster multi banda come specificato dall'utente. Questo tipo di raggruppamento utilizza un processo in cui, nel corso di ogni iterazione, tutti i valori dei pixel sono assegnati al centro dei cluster esistenti e le medie vengono poi ricalcolate per ogni classe. Di solito il numero ottimale è sconosciuto a priori.

Il processo inizia con una media arbitraria assegnata dal software, una per ogni cluster. Ogni cella è assegnata alla più vicina di queste medie (tutto nello spazio multidimensionale). Poi vengono ricalcolate nuove medie per ogni cluster in base alle distanze degli attributi delle celle che appartengono al cluster dopo la prima iterazione. Il processo viene ripetuto: ogni cella è assegnata alla media vicina nello spazio multidimensionale e per ogni cluster vengono calcolate nuove medie basate sulla adesione di celle a seguito dell'iterazione. È possibile specificare il numero di iterazioni del processo il quale deve essere sufficientemente grande da garantire che, dopo aver eseguito il numero specificato di iterazioni, la migrazione delle celle da un cluster a un altro è minima, pertanto, tutti i cluster diventano stabili. Quando si aumenta il numero di cluster, il "number_ iterations" dovrebbe aumentare di conseguenza.

Il "number_classes" specificato è il numero massimo di cluster che può risultare dal processo di clustering. Tuttavia, il numero di cluster nel file di firma in uscita può non essere uguale al numero specificato dall'utente per "number_classes". Questa situazione si verifica nei seguenti casi:

- Quando i valori dei dati e delle medie di cluster iniziali non sono equamente distribuiti;
- Quando in alcune gamme di valori di cella, la frequenza di occorrenze di questi cluster può essere minima o addirittura nulla.

In quest'ultimo caso, alcuni valori medi di cluster originariamente predefiniti non hanno la possibilità di assorbire celle a sufficienza. Da ciò può derivare che cluster costituiti da un numero di celle inferiore a quello minimo specificato dall'utente saranno eliminati al termine delle iterazioni.

Diversamente quando alcuni cluster si fondono con i cluster vicini questo è dovuto al fatto che i valori statistici sono talmente simili e quindi così vicini l'uno all'altro tanto che, tenerli separati sarebbe un inutile separazione di dati.

4.2.3-Metodi e tecniche per la classificazione delle immagini multispettrali

Sulla classificazione di immagini multispettrali esiste una letteratura sconfinata, particolarmente aumentata negli ultimi 30 anni, da quando la tecnologia software ha facilitato la diffusione di potentissimi strumenti di image processing. Per meglio comprendere la scelta operativa e la tipologia del lavoro sviluppato in questa dissertazione si è voluto fornire una breve sintesi sulle metodologie e le tecniche più diffuse al giorno d'oggi

[Nell'analisi delle immagini digitali il procedimento di classificazione riveste un'importanza fondamentale per l'estrazione di informazioni utili dai dati grezzi delle immagini. I vari metodi che vengono utilizzati possono essere divisi in due categorie: metodi puntuali e metodi contestuali. In letteratura vengono chiamati anche con altri nomi, ad esempio rispettivamente pixel-based ed object-based. Il primo tipo utilizza solo le informazioni di riflettanza, contenute nell'immagine sotto forma di valori di grigio del pixel classificato, il secondo tipo utilizza anche un altro genere di informazioni (relazioni geospaziali, tessitura, contesto, rapporti dimensionali etc...). Questo ultimo genere di classificazione è meno utilizzata per diversi motivi: richiede tempi di preparazione e di elaborazione più lunghi, e ha maggior rischio di errore ed infine richiede una preparazione, da parte dell'operatore, più specifica. Ultimamente lo sviluppo di processori a velocità più elevata ha permesso l'implementazione di questo genere di algoritmi in diversi pacchetti commerciali di elaborazione delle immagini digitali a partire da quelle telerilevate o emesse da apparecchiature di analisi spettrale.

Per metodi di classificazione convenzionali si intendono algoritmi che utilizzano unicamente l'informazione spettrale dell'immagine. Il problema con questo genere di classificazione è che

vengono trascurate molte informazioni di tipo spaziale e spettrale nell'intorno del pixel classificato. Ad esempio, non vengono considerati i rapporti geospaziali all'interno dell'immagine, e neanche il valore spettrale dei pixel intorno a quello considerato. L'interpretazione visiva fatta dall'uomo utilizza molto questo secondo genere di informazioni, ed è per questo che è più efficace rispetto all'interpretazione fatta con calcolatori elettronici che utilizzano solo le informazioni spettrali puntuali. Gli algoritmi tuttora a disposizione per la classificazione di immagini digitali sono per la maggior parte di tipo convenzionale (Cluster Analysis, Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper etc...); gli altri tipi di algoritmi benchè conosciuti sono ancora relativamente poco implementati nei software di più largo uso.

Il metodo più utilizzato per la classificazione di immagini di cui non si conoscono a priori molti elementi informativi è la Maximum Likelihood Classification (MLC). In seguito verrà illustrato il principio statistico che governa tale metodo di classificazione e l'articolazione nelle sue parti.

I classificatori che utilizzano altre informazioni oltre quelle spettrali puntuali possono essere divisi in due classi: contestuali (contextual classifiers) e basati sulle caratteristiche dell'oggetto (object-based classifiers) in contrapposizione con i classificatori convenzionali anche chiamati a pixel (pixel-based). Questi classificatori utilizzano algoritmi che richiedono un tempo di processore (processor-time, ossia tempo di elaborazione a parità di velocità) decisamente maggiore di quelli convenzionali, in quanto non solo usano la distribuzione dei valori spettrali ma anche le diverse altre informazioni aumentando quindi esponenzialmente la quantità di dati da elaborare. Lo sviluppo della velocità dei processori (e anche l'avvento dei processori a 64 bit) e quindi delle velocità di calcolo ha permesso a questi metodi di classificazione, che prima richiedevano tempi di calcolo spesso proibitivi, di essere implementabili. I classificatori puramente object-based aggiungono ai metodi classici (region growing, clustering ...) ulteriori criteri di assegnazione alle classi, mediante elaborazioni successive. Prima dividono l'immagine in classi solitamente utilizzando il metodo Maximum Likelihood, successivamente le regioni classificate vengono elaborate ulteriormente utilizzando diverse caratteristiche come ad esempio la scala media degli oggetti da estrarre, il grado di prossimità tra classi, la probabilità di vicinanza e gli indicatori di forma e di texture.

I classificatori puramente contestuali invece considerano le caratteristiche spettrali non solo del pixel da classificare, ma anche dei pixel vicini. Per semplicità computazionale vengono utilizzate finestre quadrate con lati di dimensione n pixels dove n è un numero dispari. La caratteristica del segnale creato dai valori di grigio all'interno di questa finestra viene rappresentata con diversi

indicatori che variano da semplici trasformazioni statistiche fino a valori indicanti un aspetto tessiturale (co-occurrence matrix) che diversificano le classi in modo da renderle distinguibili dal procedimento di assegnazione.

Questi ultimi criteri, sebbene maggiormente attendibili, implicano un utilizzo di risorse in termini di time-consuming degli operatori notevolmente più elevato dei metodi tradizionali, per cui in questo progetto si è voluto prediligere l'aspetto economico a discapito di un precisionismo talora pleonastico, assicurando oltremodo una qualità di elaborazione di livello più che soddisfacente.]¹

4.1.1.1 MAXIMUM LIKELIHOOD CLASSIFICATION

La Maximum Likelihood Classification (Classificazione per Massima Verosimiglianza) è un classificatore guidato che utilizza la distribuzione statistica dei valori di grigio delle aree designate per ogni classe per assegnare un grado di probabilità di appartenenza per ogni pixel dell'immagine. La classe cui il pixel avrà una probabilità maggiore di appartenenza verrà assegnata a quel pixel. I risultati di questo metodo appaiono quanto più soddisfacenti dove le varie classi siano spettralmente ben definite e dove tutti i pixel dell'immagine siano nettamente appartenenti all'una o all'altra classe. Di fatto le condizioni reali non sono mai così nette, indi per cui ciascun metodo presenterà sempre vantaggi e svantaggi.

La funzione di verosimiglianza in statistica è una funzione di probabilità condizionata, considerata funzione del suo secondo argomento, mantenendo fissato il primo argomento; formalmente è una funzione:

$$b \mapsto P(A|B = b)$$

Si definisce ancora funzione di verosimiglianza ogni funzione proporzionale a tale probabilità. Dunque, la funzione di verosimiglianza per B è la classe delle funzioni:

$$\mathcal{L}(b|A) = \alpha P(A|B = b),$$

per ogni costante $\alpha > 0$. A causa di ciò, l'esatto valore di $\mathcal{L}(b|A)$ non è in generale rilevante; ciò che rileva sono rapporti nella forma: $\mathcal{L}(b_2|A)/\mathcal{L}(b_1|A)$, invarianti rispetto alla costante di proporzionalità.

¹ (Pirotti F., Vettore A., Guarnieri A.- Laboratorio di Geomatica)

A livello interpretativo, l'uso di una funzione di verosimiglianza trae giustificazione dal teorema di Bayes, in base al quale, per due qualsiasi eventi A e B :

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}$$

dove sia $P(A|B)$ che $\frac{P(A|B)}{P(A)}$ sono funzioni di verosimiglianza. L'uso di funzioni di verosimiglianza ai fini dell'inferenza statistica costituisce un tratto distintivo dell'inferenza classica, o frequentista; esso rappresenta inoltre una fondamentale differenza rispetto alla scuola dell'inferenza bayesiana, in quanto lo statistico bayesiano conduce inferenza tramite la probabilità $P(B|A)$ nell'espressione sopra.

Data una distribuzione di probabilità D , con funzione di massa (o densità, se continua) di probabilità \mathcal{L}_D , caratterizzata da un parametro ϑ , dato un campione di dati osservati $\{x_i\}_{i=1}^n$ di dimensione n si può calcolare la probabilità associata ai dati osservati:

$$P(\{x_i\}_{i=1}^n | \vartheta) = \mathcal{L}_D(\vartheta | \{x_i\}_{i=1}^n)$$

D'altra parte, può darsi che il parametro ϑ sia ignoto, sebbene sia noto che il campione è estratto dalla distribuzione D . Un'idea per stimare ϑ è allora quella di utilizzare i dati a nostra disposizione: $\{x_i\}_{i=1}^n$ per ottenere informazioni su ϑ .

Il metodo della massima verosimiglianza ricerca il valore più verosimile di ϑ , ossia ricerca, all'interno dello spazio Θ di tutti i possibili valori di ϑ , il valore del parametro che massimizza la probabilità di aver ottenuto il campione dato. Da un punto di vista matematico, $\mathcal{L}_D(\vartheta | \{x_i\}_{i=1}^n)$ o equivalentemente $\mathcal{L}_D(\vartheta | x_1, \dots, x_n)$ è detta funzione di verosimiglianza, e lo stimatore di massima verosimiglianza è ottenuto come:

$$\hat{\vartheta} = \arg \max_{\vartheta \in \Theta} \mathcal{L}_D(\vartheta | x_1, \dots, x_n)$$

4.2.4-Il filtraggio delle immagini

L'applicazione di filtri di pre e post classificazione è una tecnica assai diffusa e le varie tipologie di filtraggio prevedono a loro volta l'applicazione di parametri variabili in base alle specifiche problematiche da risolvere. Per ovvie ragioni non è scopo di questo lavoro dilungarsi sui vari metodi di filtraggio, tuttavia è utile descriverne i lineamenti essenziali.

In genere, prima di iniziare il processo di classificazione delle immagini è utile valutare la presenza di eventuali disturbi o rumori di fondo che possono ingerire negativamente sulla corretta definizione delle classi. Quindi vi è la possibilità di ridurre o eliminare il disturbo applicando opportuni filtri quali il Low Pass Filter (Figura 60) ed anche il Focal Median Filter, algoritmi di uso ormai consolidato nell'ambito dell'Image Processing.

Low-Pass Filtering (Spatial Domain)

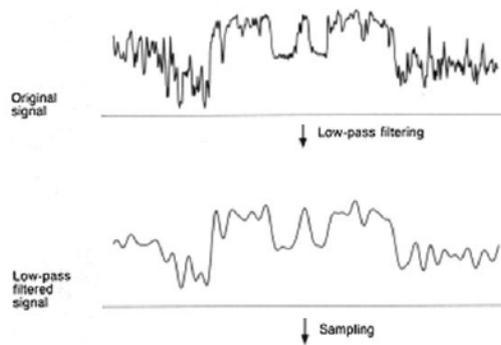


Figura 60 - Filtro passa basso

Il primo è un filtro utile alla rimozione del disturbo casuale e periodico, inoltre esalta eventuali "background pattern" dell'immagine.

Il secondo, invece, si basa su un algoritmo statistico il quale permette di assegnare ad un pixel il valore mediano rilevato sui pixel adiacenti. La distanza di adiacenza e la forma geometrica dell'intorno possono essere scelti dall'utente. Quando il numero di celle vicine valide è dispari, il valore mediano viene calcolato, classificando i valori e selezionando il valore centrale. Se il numero di valori nell'ambito è pari, i valori saranno classificati e due valori intermedi saranno mediati. (Figura 61) Il risultato sarà un'immagine meno "sporca" da pixel isolati, tuttavia nasce il problema di perdita di pixel ai bordi, ovvero una piccola inclusione all'interno di una fase ad esempio verrà ridotta nella sua superficie o in alcuni casi obliterata del tutto.

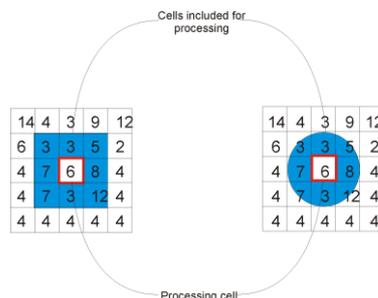


Figura 61 - Filtro statistico Focal Median

Quest'ultima tecnica è più diffusa nella fase di postclassificazione; infatti, dopo aver eseguito una classificazione automatica o semiautomatica di un'immagine per mezzo di algoritmi di segmentazione che assegnano ciascun pixel dell'immagine ad una determinata classe, molto spesso ci si ritrova di fronte ad una moltitudine di pixel isolati che, il più delle volte, derivano da errori di classificazione a motivo dei loro valori non del tutto omogenei rispetto ai pixel presenti nell'intorno. E' pur vero che, in base alla tipologia di immagine che si elabora, è opportuno eseguire "caso per caso" uno studio di dettaglio ed applicare successivamente filtraggi dedicati anche per mezzo di operazioni di Map Algebra.

4.3-PROCEDURA "X RAY MAP ANALYZER": APPLICAZIONE AL CASO STUDIO

La procedura implementata in questo lavoro è stata denominata "X Ray Map Analyzer". Essa prevede l'esecuzione da una "shell di Windows" che può essere lanciata anche tramite icona associata ad un file batch dal desktop, previa installazione di un pacchetto Python 2.5 o successive versioni e la presenza sul proprio calcolatore della suite Esri ArcGis® 9.3 o successive versioni, comprensiva dell'estensione Spatial Analyst®. Una volta editato il file di configurazione per fornire i percorsi corretti degli applicativi richiesti, si può iniziare la sessione di lavoro inserendo nella subdirectory "DATA" un'altra subdirectory con nome arbitrario contenente le immagini a raggi X del campione. Da qui è possibile lanciare il comando di avvio (Per ulteriori approfondimenti vedi tutorial in Appendice B).

Il metodo prevede due differenti cicli di analisi, il primo opera la classificazione globale del campione, quantificando le fasi presenti; il secondo consente una classificazione più raffinata della singola fase secondo gli schemi esposti nei paragrafi successivi, ove verrà illustrato il metodo in dettaglio.

Nello specifico, la procedura è stata implementata in forma di script Python per l'integrazione con la suite ESRI ArcGIS®, curando particolari accorgimenti nella fase preclassificativa ed offrendo uno strumento semplice e compatto con cui anche l'utente meno esperto, tramite il prompt dei comandi di un comune Personal Computer gestito in Microsoft Windows, può ottenere in tempi brevi esiti indubbiamente apprezzabili.

Se nella letteratura petrologica una simile tecnica è già stata adottata (vedi Launeau et al., 1994), seppur con altri tipi di software di elaborazione immagini, non sembra sia stato mai confezionato uno strumento che, in modo ordinato e sequenziale, per mezzo di software largamente diffusi nella realtà geologiche come il GIS, guidi l'utente passo dopo passo, con una modalità che ricorda uno strumento di workflow, verso la soluzione di problematiche di complessa determinazione.

L'apporto maggiormente innovativo, quale aspetto teorico e concreto dell'intera procedura in essere, riguarda l'analisi morfologica (topologica) e minerochimica delle singole fasi dei minerali. Ad un primo ciclo di analisi, utile come detto alla discriminazione in più fasi dei minerali presenti nella scena (vedi Fig.57), fa seguito un ulteriore processo di classificazione applicato alle singole fasi (vedi Fig.58). Il secondo ciclo analitico ha lo scopo di differenziare e quantificare le cosiddette "zone" di un minerale, aree a composizione chimica lievemente differente a motivo di cambiamenti composizionali collegati alla crescita del minerale dovute a condizioni di disequilibrio o pseudoequilibrio rispetto alle variabili P e T in cui la roccia si è trovata durante la sua storia metamorfica, senza che questa abbia avuto il tempo di riequilibrarsi a causa delle mutate condizioni P-T. E' frequente, infatti, come alcuni minerali quali i granati, stabili solo in particolari condizioni P-T, abbiano registrato tale storia mutando la propria composizione in modo geometricamente indicativo, ovvero assumendo una specifica configurazione topologica in base al tipo di accrescimento ovvero alle potenziali reazioni chimiche che possono avvenire con i minerali circostanti. Questa è una delle cause dirette delle ben note "topologie ad anello", con bordi più o meno lisciati e/o sinusoidali, tipiche, queste ultime, delle zonature oscillatorie. La ricostruzione del P-T path di una roccia metamorfica è un'operazione di indiscusso interesse petrologico, ma soprattutto geologico-geodinamico, quale base per operare ricostruzioni palinspastiche, attraverso la congiunzione di tali vincoli con dati geocronologici e altri di tipo strutturale, in aree interessate da fenomeni tettonici complessi come quelli che si sviluppano in contesti orogenici, con campi di stress orientati, sollevamenti isostatici ed intrusioni di corpi plutonici, osservabili ad esempio nell'area oggetto di studio, ricadente in Calabria Centrale all'interno del cosiddetto Complesso di Mammola (Angi et al., 2010).

La definizione dei vincoli P-T è fondamentale negli studi di termodinamica applicata alle rocce metamorfiche e viene recentemente eseguita per mezzo del calcolo delle cosiddette pseudo sezioni, previa elaborazione quantitativa delle fasi presenti nella sezione e le loro possibili curve di equilibrio (e.g. Evans, 2004; Cirrincione et al., 2008; Angi et al., 2010). Per tale ragione è opportuno fornire al software di calcolo termodinamico (ad es. PerpleX – Connolly, 1990; Connolly e Petrini, 2003) parametri petrologici più congrui possibili, al fine di ottenere esiti maggiormente attendibili. Anche per tali ragioni è stato pensato l'X-Ray Map Analyzer, quale strumento di analisi microstrutturale e minerochimica quantitativa di X-Ray Map utile a definire propedeuticamente dati analitici univoci per la costruzione di diagrammi di fase il più possibile attendibili.

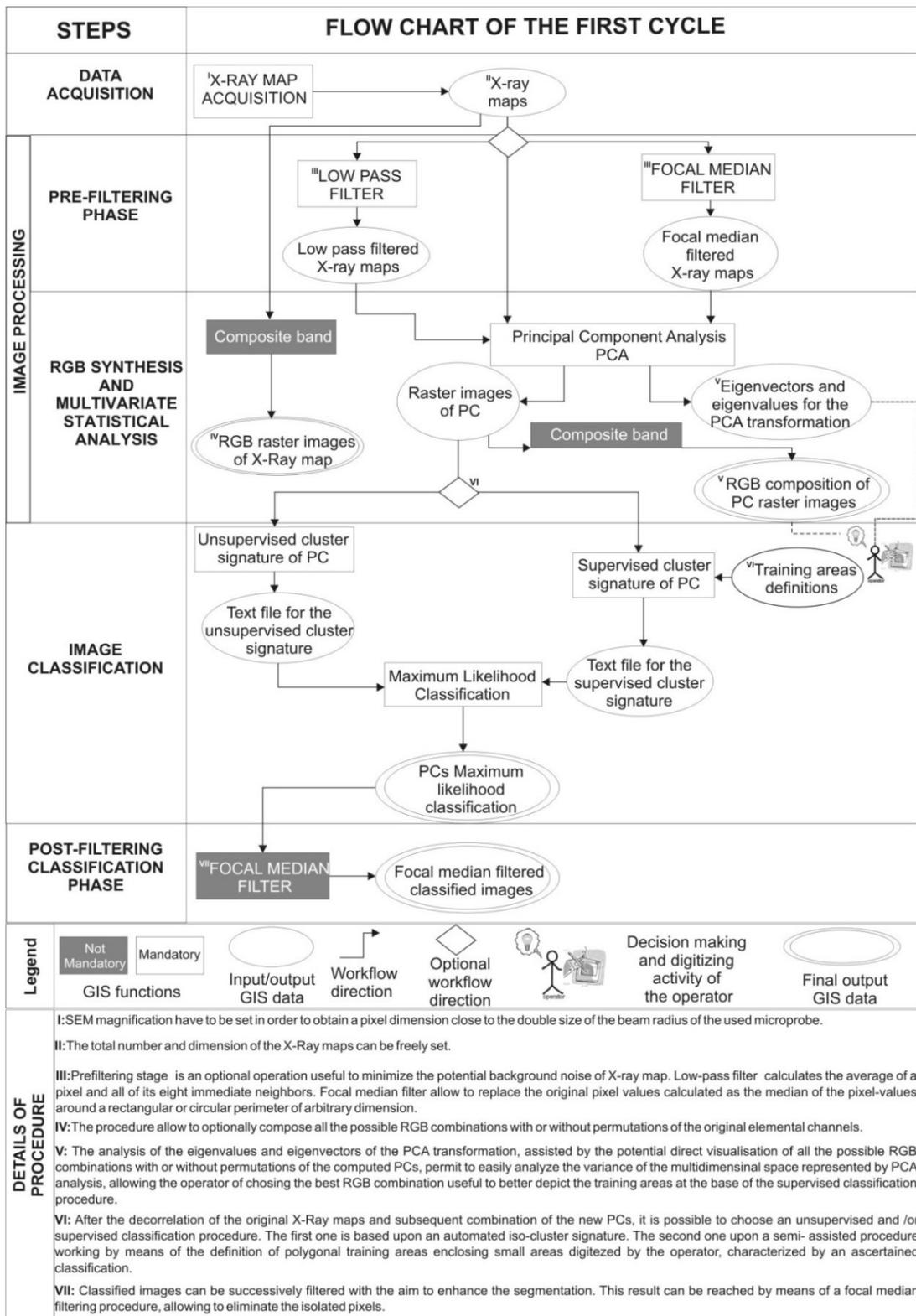


Figura 62 – Flow chart della procedura implementate nell’X-Ray Map Analyzer – (Primo Ciclo) (Ortolano et al., submitted)

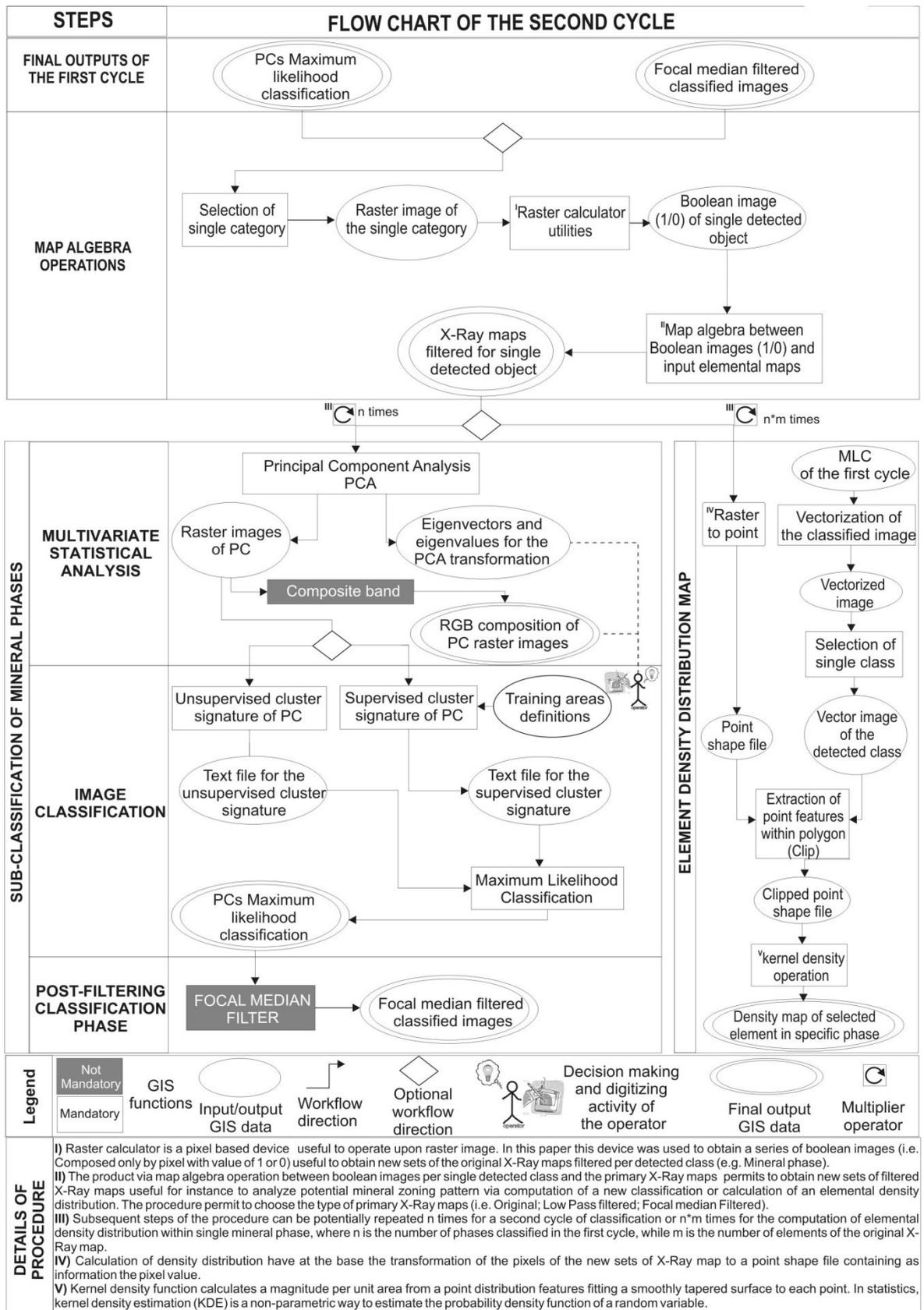


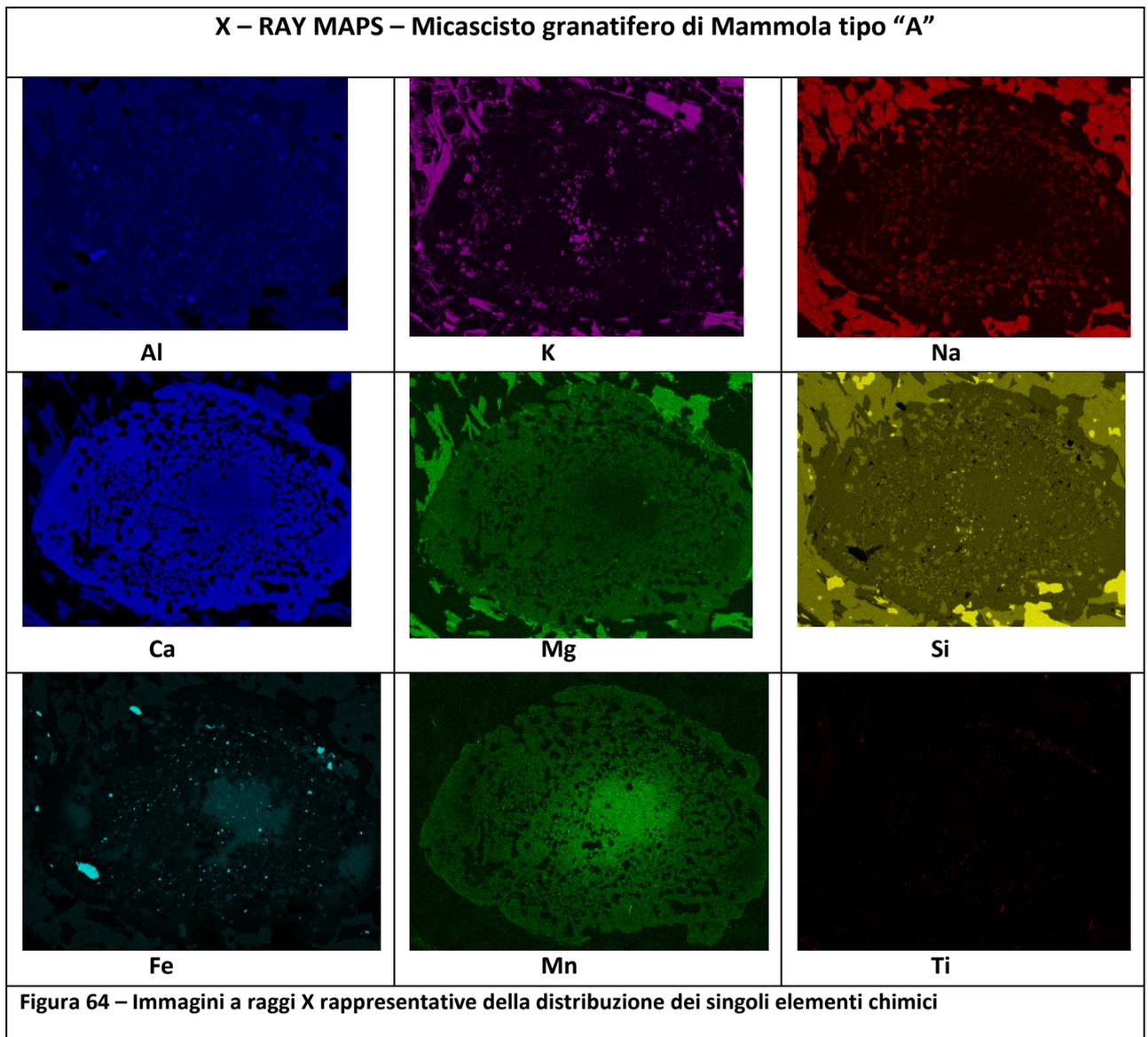
Figura 63 - Flow chart della procedure implementate nell’X-Ray Map Analyzer – (Secondo Ciclo) (Ortolano et al., submitted)

4.3.1-L'acquisizione delle immagini

L'acquisizione delle immagini gioca un ruolo fondamentale ai fini operativi della procedura. Sebbene il sistema sia in grado di elaborare qualunque tipo di immagini purchè di numero non inferiore a 3, al fine garantire un risultato affidabile bisogna utilizzare immagini con un numero di pixel non inferiore a $256 * 256$, con dimensione dei pixel prossimo al doppio delle dimensioni del raggio del fascio elettronico dello strumento di acquisizione utilizzato. Si può, dunque, importare una qualunque serie di mappe a raggi X monocromatiche di qualsiasi elemento analizzato, indifferente se si tratti di un sistema WDS o di uno EDS. L'esempio utilizzato per verificare l'attendibilità della procedura, è basato sull'elaborazione di una serie di mappe a raggi X acquisite mediante un rivelatore EDS della serie EDAX Neptune XM460 montato su un TESCAN-VEGA\LMU, microscopio elettronico a scansione (SEM), con modalità ad elettroni retrodiffusi, in condizioni di alto vuoto a tensione di accelerazione 20 kV e corrente del raggio (beam) pari a 0,2 nA.

Le immagini rese dallo strumento sono settate a $512*400$ pixel rappresentate con 255 livelli di grigio (immagini ad 8 bit) e qui rappresentate in falsi colori, ottenute con un tempo di attesa di 500 ms per pixel per 128 fotogrammi ognuno. Per coerenza geometrica sono state selezionate aree di scansione con una risoluzione prossima alla dimensione del pixel, ossia di larghezza vicina alla regione di eccitazione attorno al fascio di elettroni (Friel e Lyman 2006). Secondo Anderson e Hasler (1966), infatti, la regione di eccitazione per gli aggregati silicatici può essere approssimata mediamente al doppio delle dimensioni del raggio del fascio di elettroni. In questa prospettiva le nostre immagini sono state acquisite con un ingrandimento vicino a 200X che, per la risoluzione in pixel selezionata, corrisponde ad una dimensione media del pixel di 2 micron per lato. Dunque, ogni mappa permette di indagare su una superficie composta da una matrice di 204.800 pixel, ciascuno dei quali rappresenta, nella sua esatta posizione, una quantità proporzionale alla concentrazione dell'elemento chimico riconosciuto, espressa con valore numerico compreso tra 0 e 255. E' possibile selezionare contemporaneamente fino a 16 elementi per acquisire l'immagine multispettrale di un campione nel dominio selezionato.

Nel caso studio, sono stati selezionati due microdomini provenienti da due differenti campioni di micascisto, costituiti da due porfiroblasti di granato caratterizzati da un accrescimento sviluppato in momenti differenti dell'evoluzione tettono-metamorfica del Complesso di Mammola. Entrambi i microdomini sono caratterizzati da 9 elementi chimici maggiori, chiaramente riconoscibili dai picchi osservabili dallo spettro globale relativo alla mineralogia dell'intero microdominio (Figura 67). In questo caso tra tutti gli elementi riconosciuti tutti e nove sono stati presi in considerazione per l'acquisizione delle serie X-Ray Maps.



Miscascisto a Granato Tipo “A”

Miscascisto a Granato Tipo “B”

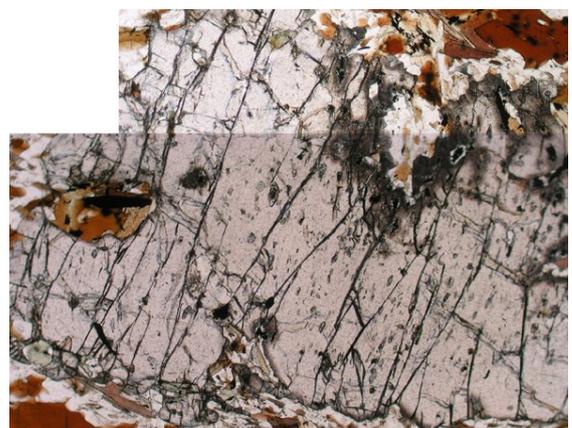


Figura 65 - Osservazioni al microscopio ottico dei 2 campioni di granato appartenenti ai micascisti granatiferi del Complesso di Mammola: A) Granato con zonatura di tipo progradata Nicols X; B) Granato con strutture di tipo retrogrado Nicols //

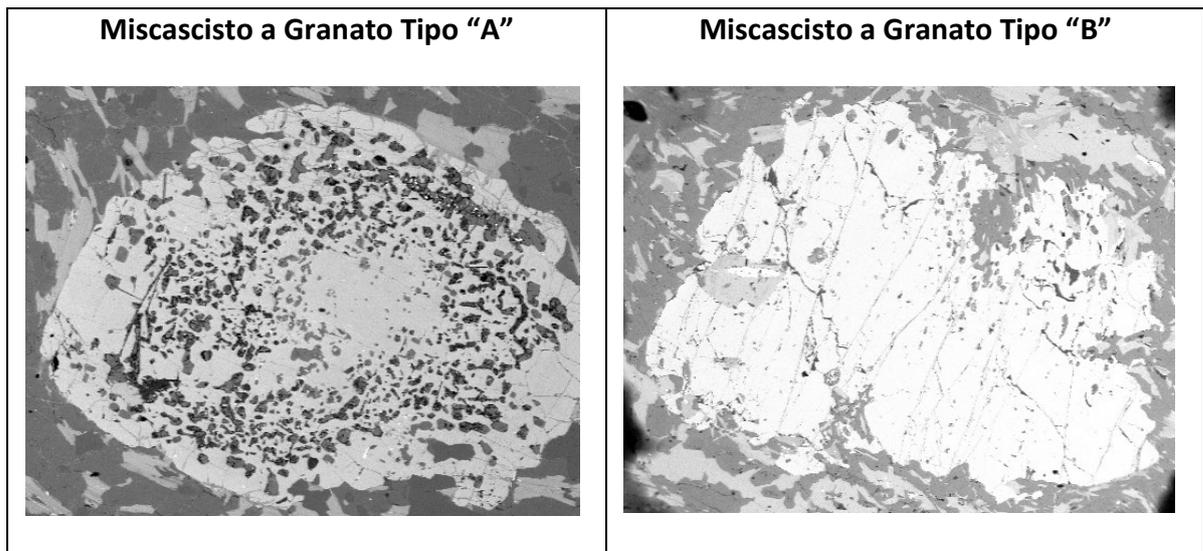


Figura 66 - Micascisti Granitiferi di Mammola - Back Scattered Images

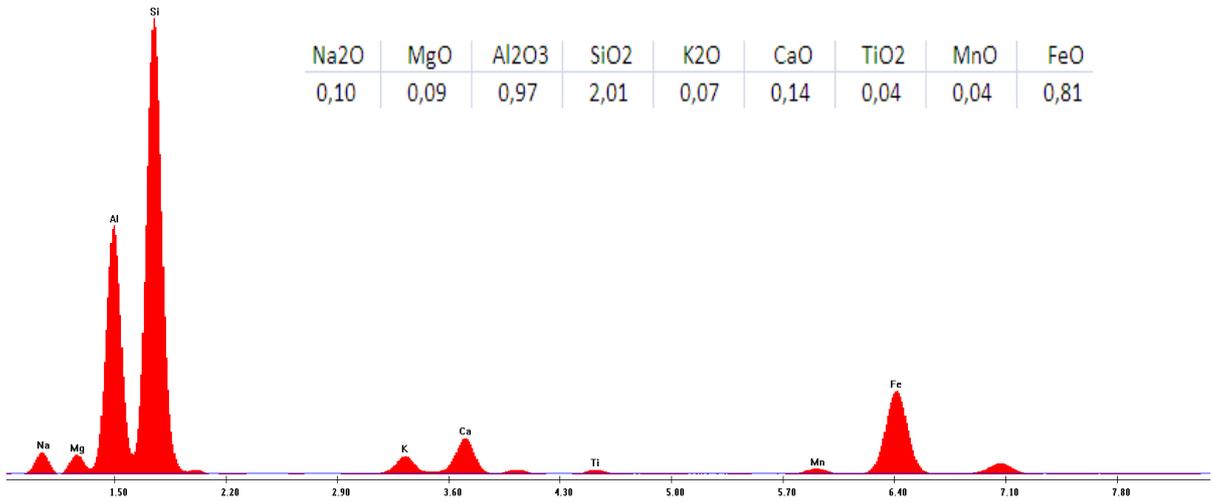
4.3.2-Il primo ciclo: classificazione del microdominio

Il primo ciclo analitico, denominato in procedura "Firs Cycle", ha lo scopo di analizzare l'intero dominio selezionato al fine di ottenere una classificazione delle fasi rappresentate mediante l'utilizzo di colori arbitrari. Esso include la possibilità di operare inizialmente un prefiltraggio delle immagini la cui scelta dipende dalla natura delle immagini stesse, ovvero dall'esigenza di migliorare l'input a fini classificativi. I filtri applicabili sono: il "Low Pass Filter", un filtro passa-basso che liscia i dati di input riducendo la variazione locale ai fini della rimozione del rumore di fondo, calcolando il valore medio (media) di ogni area composta da 3 x 3 pixel; Il secondo è il "Focal Median", un filtro statistico che esegue il calcolo della funzione "mediana" sull'intorno di ciascun pixel, quindi restituisce un raster finale in cui il valore di ciascun pixel è una funzione dei valori di tutti i pixel di input che si trovano in un intorno definito per forma e dimensione dall'utente.

Più in particolare mentre nel primo caso (Low Pass Filter), l'algoritmo visita ogni pixel del raster e calcola la media in un intorno 3X3 pixels, nel secondo caso (Focal Median) l'algoritmo calcola la mediana del pixel centrale intorno ad un'area definita per dimensione e forma dall'utente. In entrambi i casi, la cella per la quale viene calcolata la statistica viene indicata come il pixel di elaborazione. Il valore del pixel di elaborazione, così come tutti i valori dei pixel nella zona identificata, è incluso nel calcolo dell'intorno. Gli intorni possono sovrapporsi, in modo che i pixel in un intorno possono anche essere inclusi in prossimità di un altro pixel di elaborazione. Nel caso dell'applicazione del Focal Median l'effetto è maggiormente utile per la riduzione dei pixel isolati, spesso indicativi della presenza di disturbo.

Miscisto a Granato - Tipo "A"

Label A:



Miscisto a Granato - Tipo "B"

Label A:

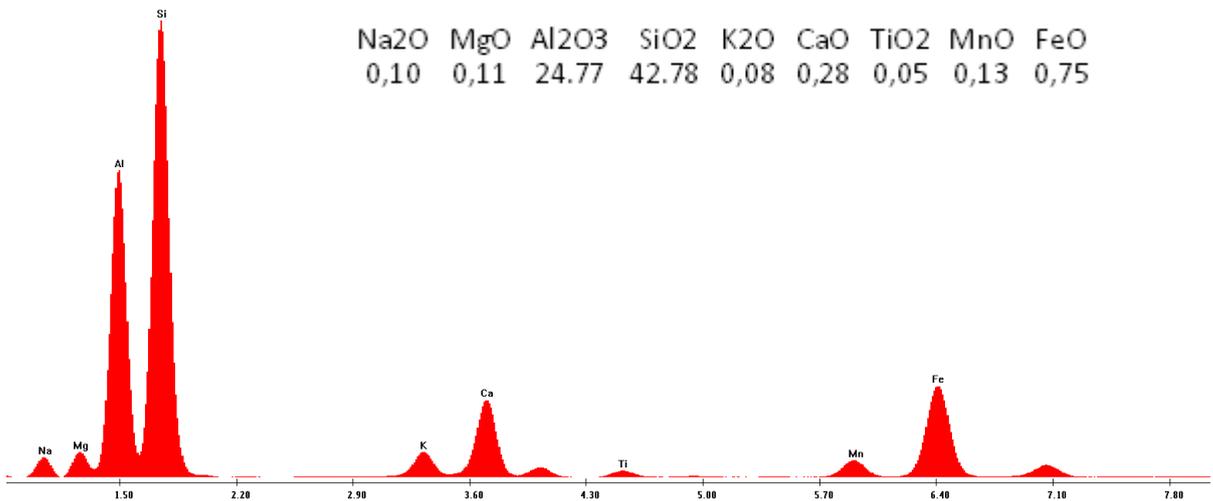


Figura 67 – Spettrogramma EDS dei micro domini selezionati: A) Granato a zonatura prograd; B) Granato fortemente retrocesso con anse di corrosione.

4.3.2.1-Sintesi additiva sui canali RGB

I dataset raster si possono rappresentare in modi diversi mediante tecniche di rendering che visualizzano i dati numerici sotto forma di immagini.

Tra le varie opzioni che offre un sistema GIS vi è la possibilità di attribuire e modificare i colori di visualizzazione, di raggruppare i dati in classi o valori “elasticizzati” (Stretching) per aumentare il contrasto visivo. Per i raster multibanda, è possibile visualizzare tre bande insieme come: rosso, verde e blu (RGB composito), ottenendo dunque una composizione a tre bande di dati raster delle immagini a raggi X, con la possibilità di visualizzare e cambiare la combinazione delle bande stesse. Di seguito è riportato un esempio di un dataset raster multibanda visualizzato nei tre canali RGB (Fig. 63).

RGB Composito

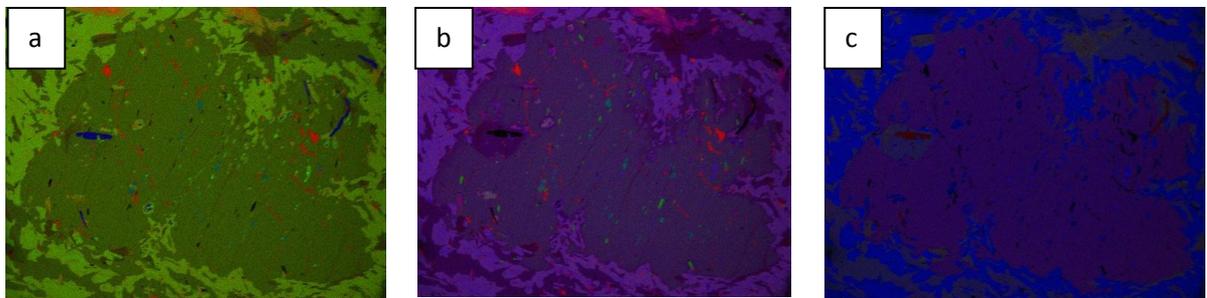


Figura 68 – Esempio di visualizzazione della composizione RGB del granato di tipo “B”: a) Red – Al, Green – Si, Blu – Ti; b) Red – Al, Green – Ca, Blu – Si; c) Red – Fe, Green – Mg, Blu – Si

Si è riscontrato che la combinazione delle varie bande delle immagini nei tre diversi canali RGB, fornisce informazioni assai utili allo studio preliminare del campione, specie se si intende procedere con il metodo della classificazione assistita (Supervised Classification), ove sarà necessario tracciare della Training Areas, ossia aree omogenee che, a giudizio dell’operatore, raggruppino pixel relativi alla stessa classe.

Mediante l’implementazione di un algoritmo ricorsivo basato su principi di calcolo combinatorio si è ottenuta la possibilità di generare automaticamente tutte le “combinazioni semplici” o le “disposizioni semplici”, di lunghezza “k” pari a 3 (tre), delle “n” immagini a raggi X disposte alternatamente sui tre canali RGB. Questa funzionalità può essere invocata sia sulle immagini native che su quelle prodotte dalla successiva applicazione della PCA (Principal Component Analysis).

Nel primo caso delle combinazioni semplici otteniamo:

$$C_{k,n} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \binom{n}{k}$$

immagini in RGB, ovvero la sequenza tipo 123, 124, 234 ...etc, mentre nel caso delle disposizioni semplici si avrà:

$$D_{k,n} = \frac{n!}{(n-k)!}$$

ottenendo dunque la sequenza tipo 123, 321, 231, 132 Etc.

Considerando il numero elevato di immagini da generare, l'algoritmo in uso su un PC desktop QuadCore riesce a produrre circa 1000 immagini in poco meno di un minuto primo, ottimizzando un tempo operativo che diversamente richiederebbe alcune giornate uomo di tediosa applicazione sull'interfaccia utente della funzione "Composite Band" di ArcGis®.

L'operatore potrà quindi successivamente osservare le varie immagini, selezionando quelle utili come base per la seguente operazione di classificazione vera e propria.

4.3.2.2-Riduzione della ridondanza

Come detto in precedenza l'analisi delle componenti principali viene utilizzata nell'immagine processing per trasformare gli attributi dei dati da un input originale multibanda ad un nuovo spazio multidimensionale con assi ruotati rispetto allo spazio vettoriale originale (Figura 69) . La teoria della PCA è descritta in numerose pubblicazioni (ad esempio Reyment , 1996; Bonnet , 1998) ed in questa stessa dissertazione si è fornito un accenno a cui si rimanda per ulteriori dettagli.

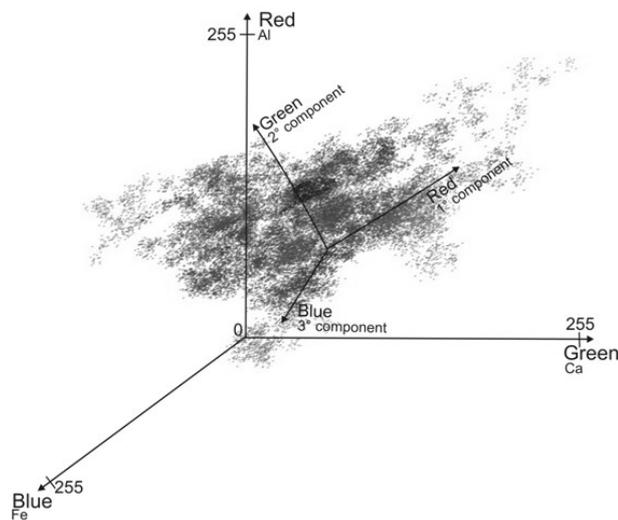


Figura 69 – Visualizzazione tridimensionale della rototraslazione vettoriale conseguente all'applicazione della PCA (Ortolano et al., submitted)

Questa tecnica è ben nota da tempo in quelle applicazioni legate al trattamento delle immagini multispettrali (ad esempio, Gonzalez e Woods , 1992; Jensen , 1996; Schowengerdt , 1997) ed è in

gran parte implementata in quasi tutti i software di "image processing". Nel nostro caso la PCA è stata applicata su di un set di immagini raster multi banda codificate ad 8 bit, ciascuna di esse rappresentativa di un elemento chimico. Nel software implementato in questo lavoro la funzione PCA produce un output a video costituito dal calcolo degli autovalori e degli autovettori elaborati sulle "n" immagini, articolati in modo tale che la varianza maggiore di qualsiasi proiezione dei dati si trovi sulla prima componente principale, che rimane quella più rappresentativa; via via le successive componenti principali rappresentano valori con varianza decrescente. Vedi Tabella PCA report) . Come si nota dall'analisi degli autovalori in Tabella 2, le prime tre componenti principali racchiudono le informazioni, quanto più decorrelate, relative alle "n" immagini. Le ultime componenti principali pur non rappresentando una significativa variabilità dell'immagine in oggetto, può tuttavia comprendere dati comunque utili ad individuare fasi accessorie meno evidenti in sezione sottile. Quale risultato finale dell'elaborazione, la funzione PCA crea in una directory preconfigurata del file system, una serie di immagini di pari numero rispetto a quelle iniziali.

Ciascuna di esse rappresenta una componente principale di ordine "k", con k compreso tra 1 ed "n". Il valore di ciascun pixel nell'immagine PCA(k) è correlato alla matrice di covarianza precedentemente calcolata. L'immagine PCA(k) è quindi rappresentativa del patrimonio informativo di tutte le "n" immagini di cui, eliminate le ridondanze, rimangono soltanto quei pixel che, nella spazio vettoriale di ordine "n" danno luogo ad una matrice di vettori linearmente indipendenti. Come si può riscontrare nella tabella 2, il peso di ciascun elemento chimico può essere osservato in ciascuna componente principale espressa in forma di percentuale relativa nella seconda riga. Ad esempio, nello scisto granatifero qui analizzato, sommando le prime cinque componenti principali si arriva a descrivere circa il 97 % della covarianza totale. Più in particolare, è possibile vedere come nella prima componente principale in ordine di lucentezza decrescente, dove per valori vicini a +1 si ottiene un bianco puro, mentre per valori negativi vicini a -1 si ottiene un nero puro (vedi elemental brightness in Tabella 2), è possibile verificare come il valore più elevato positivo si riscontri per il Si, seguito dal Na, permettendo così di definire come nella prima componente principale le fasi a pesare maggiormente in termini di variabilità composizionale siano il quarzo e l'albite. Nella seconda componente principale è invece possibile osservare il contributo elementare fondamentale di Al, Ca e Na, sottolineando la visualizzazione di plagioclasio e granato. Lo stesso ragionamento può essere estrapolato per le altre componenti principali, dando all'operatore la possibilità di comporre i canali RGB in grado di discriminare la quasi totalità

delle fasi presenti, usufruendo quindi di composizioni RGB utili ad una più oculata base discriminante per la classificazione di tipo assistita (i.e. supervisionata dall'operatore).

| Tabella 2 - PCA - Output degli autovalori e degli autovettori Micascisto di Mammola Tipo A | | | | | | | | | |
|---|----------|------------|---------------|----------------|-------------------|-----------|--------|----------------|---------|
| Eigenvalues | | | | | | | | | |
| | 1360,938 | 440,106 | 175,386 | 123,634 | 55,531 | 28,058 | 20,714 | 15,519 | 4,993 |
| Eigen % | 61.16 | 19.78 | 7.88 | 5.55 | 2.49 | 1.26 | 0.93 | 0.69 | 0.22 |
| Eigenvectors | | | | | | | | | |
| PC | c | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | 9° |
| Al | -0,067 | 0,786 | 0,414 | 0,306 | 0,298 | -0,079 | 0,071 | 0,116 | -0,009 |
| Ca | -0,029 | 0,125 | -0,804 | 0,220 | 0,522 | 0,058 | 0,030 | 0,103 | -0,034 |
| Fe | -0,400 | -0,518 | 0,340 | 0,454 | 0,407 | 0,259 | 0,084 | -0,060 | -0,081 |
| K | -0,012 | 0,037 | 0,159 | -0,740 | 0,575 | 0,174 | 0,042 | -0,253 | 0,013 |
| Mg | -0,065 | -0,074 | 0,087 | -0,198 | 0,058 | 0,240 | -0,297 | 0,880 | 0,141 |
| Mn | -0,030 | -0,035 | -0,009 | 0,073 | 0,043 | -0,054 | 0,128 | -0,090 | 0,982 |
| Na | 0,108 | 0,223 | -0,066 | 0,083 | -0,246 | 0,911 | 0,009 | -0,185 | 0,047 |
| Si | 0,904 | -0,200 | 0,171 | 0,196 | 0,259 | 0,021 | 0,054 | 0,073 | -0,003 |
| Ti | -0,027 | -0,028 | -0,023 | -0,123 | -0,101 | 0,046 | 0,937 | 0,294 | -0,081 |
| c | Si-Na | Al, Ca, Na | Al, Fe, K, Si | Fe, Al, Ca, Si | K, Ca, Fe, Al, Si | Na, Mg, K | Ti, Mn | Mg, Ti, Ca, Al | Mn, Mg |
| Mineral recognition | Qtz+Ab | Pl+Grt | Bt | Grt | Bt+Grt | Ab+Bt | Ilm | Chl+Pl | Grt+Chl |

Lo stesso ragionamento può essere fatto anche per il secondo micro-dominio analizzato (Tabella 3), dove nella prima componente principale è possibile discriminare meglio il contributo di Si, Al, Na, permettendo quindi di discriminare l'albite, mentre dalla seconda componente principale è ben osservabile il contributo di Si, Ca, Fe, Mn, utili per la discriminazione del quarzo con il granato e così via per le altre componenti principali.

La sintesi additiva nei tre canali RGB delle PCA(k), osservata nelle varie combinazioni prodotte dall'algoritmo, consente, quindi di cogliere particolari della scena laddove l'analisi delle singole immagini risulta inefficace nell'evidenziare il contrasto determinato da fasi meno distinte.

Selezionando quelle combinazioni maggiormente informative si ottiene dunque la base sulla quale disegnare le nostre Training Areas per la successiva “classificazione supervisionata”.

| Tabella 3 - PCA - Output degli autovalori e degli auto vettori | | | | | | | | | |
|---|----------|----------------|----------------|---------------|--------|--------|------------|---------|--------|
| Micascisto di Mammola Tipo B | | | | | | | | | |
| Eigenvalues | | | | | | | | | |
| | 867,622 | 228,65 | 172,82 | 101,84 | 47,89 | 39,25 | 20,81 | 10,8 | 8,628 |
| Eigen % | 61.16 | 19.78 | 7.88 | 5.55 | 2.49 | 1.26 | 0.93 | 0.69 | 0.22 |
| Eigenvectors | | | | | | | | | |
| PC | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | 9° |
| Al | 0,418 | -0,558 | 0,668 | 0,233 | 0,057 | 0,093 | 0,029 | 0,013 | -0,002 |
| Ca | 0,049 | 0,447 | 0,414 | -0,358 | 0,678 | -0,083 | 0,165 | 0,036 | 0,058 |
| Fe | -0,411 | 0,338 | 0,261 | 0,751 | 0,048 | 0,108 | 0,071 | -0,250 | 0,060 |
| K | -0,028 | -0,373 | -0,416 | 0,244 | 0,693 | -0,046 | 0,321 | - | -0,092 |
| Mg | -0,076 | -0,197 | -0,216 | 0,176 | 0,119 | -0,113 | 0,838 | 0,383 | 0,044 |
| Mn | -0,067 | 0,122 | 0,111 | 0,098 | -0,095 | 0,055 | 0,313 | - | 0,733 |
| Na | 0,157 | -0,009 | -0,051 | -0,140 | -0,141 | 0,058 | 0,237 | -0,487 | 0,798 |
| Si | 0,784 | 0,425 | -0,268 | 0,345 | 0,017 | 0,067 | 0,014 | 0,058 | -0,077 |
| Ti | -0,059 | -0,023 | -0,087 | -0,125 | 0,106 | 0,973 | 0,088 | 0,054 | -0,061 |
| Elemental brightness | Si-Al-Na | Si, Ca, Fe, Mn | Al, Ca, Fe, Mn | Fe, K, Mg, Si | K, Ca, | Ti, Fe | Mg, Ca, Na | Mn, Mg | Na, Mn |
| Mineral recognition | Qtz+Ab | Qtz+Grt | Grt | Bt | Bt+Grt | Ilm | Chl+Pl | Chl+Grt | Pl+Grt |

4.3.2.3-Applicazione dell' algoritmo di classificazione

Ottenuto, dunque, un set di immagini epurato da disturbo e ridondanza, questo primo ciclo prevede la possibilità di identificare le classi, riconoscibili all'interno del microdominio analizzato. Al fine di invocare la funzione Maximum Likelihood Classification, di cui si è discusso ampiamente nella parte introduttiva del presente capitolo, è necessario generare una firma spettrale tramite un algoritmo di “clustering”, in ArcGis® “Iso Cluster”. Esso utilizza una versione modificata della procedura iterativa di clustering di ottimizzazione, anche conosciuta come la tecnica del “migrating means”. L'algoritmo separa tutte i pixel nel numero specificato dall'utente di gruppi unimodali distinti nello spazio multidimensionale di un raster multibanda. Questo tipo di raggruppamento utilizza un processo in cui, nel corso di ogni iterazione, tutti i pixel sono assegnati

al centro dei cluster esistenti e vengono ricalcolate iterativamente nuove medie per ogni classe. Il numero ottimale di classi in cui suddividere l'immagine di solito è sconosciuta. Pertanto, si consiglia di inserire inizialmente un numero elevato di classi attese, con lo scopo di analizzare i cluster ottenuti, ed eseguire di nuovo la funzione con un numero ridotto di classi. Nella procedura sono stati volutamente semplificati alcuni input, quali il numero di iterazioni ed altri che, per convenzione, sono settati con valori di default.

E' da notare che, talvolta, il numero di cluster nel file di firma prodotto dalla funzione può non essere uguale al numero specificato per <number_classes> . Ciò accade per varie ragioni ad esempio: quando i cluster si fondono con i cluster vicini ed i valori statistici sono tra loro simili. Alcuni cluster possono essere così vicini l'uno all'altro da assumere parametri statistici, come la varianza e la covarianza, talmente simili che tenerli separati sarebbe inutile e, per tali ragioni vanno quindi accorpati.

Come accennato tali firme spettrali, dette "signatures" costituiscono un importante parametro di input per l'esecuzione della MLC in modalità UNSUPERVISED (indipendente da precondizioni specificate dall'operatore) o SUPERVISED (assistita dall'operatore per mezzo della definizione di training areas. Come lo stesso termine suggerisce, la prima, è basata su un approccio di classificazione non supervisionata, mentre, la seconda prevede una fase di istruzione alla classificazione strutturata per mezzo della vettorializzazione preliminare di aree riconosciute dall'utente come aree note. Nel nostro caso il riconoscimento del minerale è facilitato dall'uso delle immagini composite in RGB a partire dalla PC opportunamente selezionate, coadiuvandosi potenzialmente anche con l'uso della BSE (Back Scattered Image) monocromatica.

I risultati ottenuti mediante l'uso delle signatures di Iso Cluster appaiono soddisfacenti soprattutto ove le classi sono spettralmente ben definite ed i pixel dell'immagine mostrano una chiara appartenenza ad una determinata classe. L'eliminazione delle ridondanze e le tecniche di prefiltraggio viste in precedenza si rivelano particolarmente vantaggiose per la buona riuscita della procedura di classificazione.

Da un punto di vista operativo, la procedura consente l'impostazione di taluni parametri utili all'esecuzione della clusterizzazione, quali ad esempio "A PRIORI", per impostare la probabilità con cui le classi possano sussistere all'interno del dominio. Le scelte ricadono su EQUAL, indicando la stessa probabilità per tutte le classi o SAMPLE, in cui la probabilità sarà proporzionale al numero di pixel in ciascuna classe rispetto al numero totale di pixel campionati in tutte le classi nel file di firma.

Una classificazione "Unsupervised" fornisce come risultato un'immagine con aree distinte in colori differenti, ciascuna ascrivibile ad una fase, minerale, amorfa o addirittura al vuoto. E' quindi una

tecnica che può essere eseguita in prima istanza per avere una mappa di confronto sulla quale operare successivamente con la tecnica "Supervised". In quest'ultima, particolare importanza va rivolta al disegno delle "training areas", fase in cui il petrografo, col supporto di immagini precedentemente generate e con l'ausilio di un qualunque software GIS, crea dei poligoni etichettati con un nome proprio (in genere la sigla della fase corrispondente) includendo i pixel appartenenti alla medesima fase e salvando il layer vettoriale in una directory dedicata come TrArea.shp (shape file universalmente compatibile). Di seguito l'algoritmo di classificazione farà riferimento alle aree di training per catalogare i restanti pixel dell'immagine restituendo un'immagine classificata, tanto più verosimile quanto migliore è l'informazione suggerita dalle aree guida. Dunque la procedura fornisce una tabella descrittiva dell'immagine, con i nomi delle fasi presenti, il numero di pixel appartenenti a ciascuna di esse e la percentuale modale. Fin qui si è raggiunto un primo step del nostro lavoro, ovvero l'implementazione di un metodo di analisi in grado di fornire in tempi molto brevi l'analisi modale di un materiale polifasico con tessitura granulare quale può essere una roccia. Si è preferito generalizzare la definizione per includere, tra i campioni potenzialmente analizzabili, anche materiali sintetici o naturali derivati da processi di lavorazione, come le ceramiche, pozzolane ed altro.

Il primo ciclo di analisi si conclude con l'opzione di applicare un filtro statistico di postclassificazione.

4.3.2.4-La Post Classificazione

Eseguita la MLC, in una delle due modalità già viste, si può ottenere che una certa quantità variabile di pixel isolati può essere classificata erroneamente a causa della loro originaria non omogeneità rispetto pixel circostanti. Si può rimediare a tale effetto eliminando la maggior parte di questi pixel per mezzo di strumenti di filtraggio in post-classificazione, già analizzati in precedenza per la fase di preclassificazione, ovvero il Focal Median. Queste metodiche vengono oggi eseguite di routine in diversi strumenti di elaborazione delle immagini, con il risultato di ridurre notevolmente il peso percentuale dei pixel isolati, conferendo all'immagine classificata un aspetto più omogeneo. La procedura propone all'utente la possibilità di adattare la distanza di adiacenza (ossia da 1 a 9 pixel) e la forma geometrica (cioè rettangolare o circolare) dell'intorno, al fine di reiterare l'operazione fino al raggiungimento di un risultato ottimale, ovvero un'immagine coerente non eccessivamente lisciata o tantomeno sale e pepe. Infatti, il risultato finale della procedura è una significativa riduzione del potenziale effetto sale e pepe, ma con la minima perdita di quelle aree che potrebbero rivelare eventuali microinclusioni. Ecco perché la perizia del petrografo rimane alla base di una buona classificazione del campione, ovvero saper adottare una idonea misura nei parametri di filtraggio in virtù della scena che si ha dinanzi e del problema che

si vuole risolvere. Nel caso studio qui presentato è possibile ottenere quale risultato finale del primo ciclo di classificazione gli output osservabili nelle figure 65 e 66.

FASE DI CRESCITA DI UN GRANATO IN METAMORFISMO DI TIPO PROGRADO

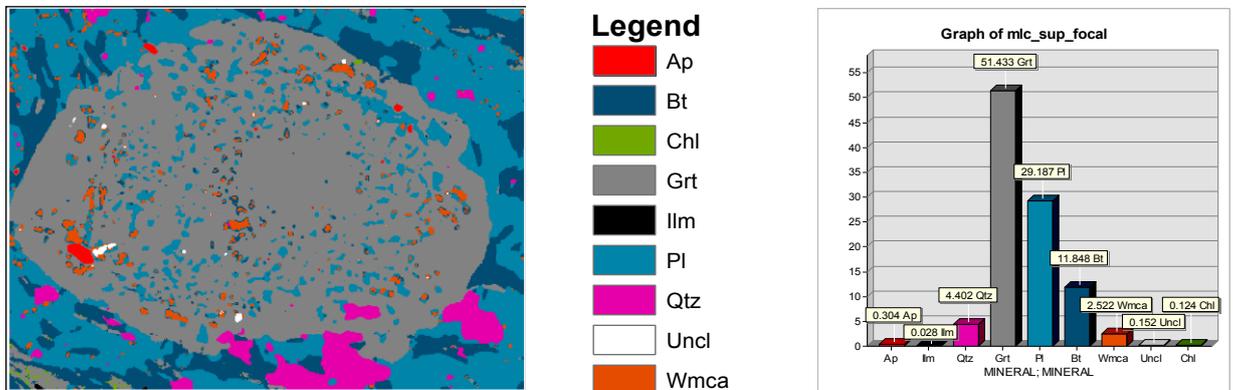


Figura 70 - Classificazione mineralogica del Granato tipo "A"

FASE DI RIASSORBIMENTO DI UN GRANATO IN METAMORFISMO DI TIPO RETROGRADO

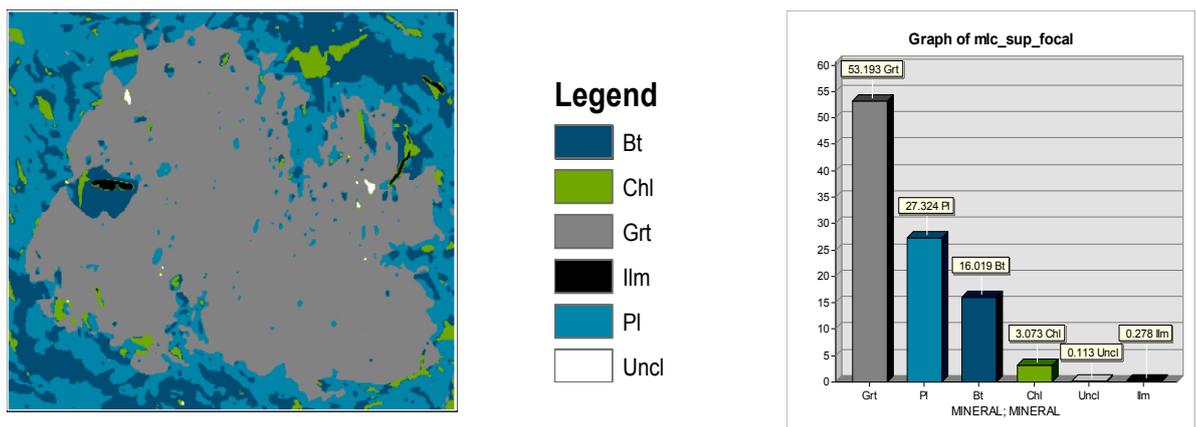


Figura 71 - Classificazione mineralogica del Granato tipo "B"

4.3.3-II secondo ciclo: distribuzione minero-chimica in un singolo minerale

Operativamente il secondo ciclo inizia con un'operazione implementata in modo iterativo che utilizza funzioni di map-algebra per produrre nuove mappe per ciascun elemento chimico distribuito all'interno del minerale classificato (nella procedura: element_in_phase – vedi Tutorial in Appendice B per ulteriori dettagli). Si ottiene tale risultato creando tante immagini booleane (i.e immagini costituiti da pixel number 0 o 1) per quanti sono i minerali individuati e poi moltiplicandole per ogni mappa elementale originale. Quindi la riesecuzione della PCA e della MLC, come descritte nel paragrafo precedente, generano delle mappe specifiche di ogni minerale in cui vengono esaltate e quantificate le variazioni composizionali intrafase, ovvero eventuali tipologie di zonature con topologie più o meno diffuse e regolari ovvero articolate o scheletrali. Ciò

ha consentito nel caso studio l'individuazione di due diverse topologie all'interno dei granati appartenenti ai micascisti granatiferi di Mammola: nel primo granato (Figura 70) è chiara un'evidente zonatura concentrica di tipo "ad anello" che delinea le tre zone nettamente distinte, inner core, outer core e rim, con un contenuto decrescente di Mn dal centro verso il bordo. In accordo con Spear (1995), tale zonatura è indicativa di uno stadio metamorfico evolutivo di tipo progrado, in cui le variazioni delle condizioni PT aumentano al progredire della crescita del granato.

La Figura 67 b mostra invece una situazione significativamente diversa alla precedente, ovvero un granato frastagliato, ricco di anse di corrosione, con evidenti segni di microfratturazione, verosimilmente riconducibili ad incipienti effetti di una evoluzione retrograda. E' chiara infatti, la fase di instabilità evidenziata dal drastico riaumento del contenuto di Mn osservabile al bordo del granato, nonché dai fenomeni di consunzione del granato stesso ad opera di fasi più stabili a condizioni P-T inferiori.

L' X-Ray Map Analyzer propone infine la generazione di mappe di densità degli elementi, definite per mezzo di funzioni di interpolazione, nella fattispecie la "Kernel Density Map" (Fig.68 e 69) invocate dalle stesse librerie dello Spatial Analyst di ArcGis®, eseguita dopo la settorializzazione di tutti i punti dell'immagine e la sua successiva riclassificazione. Tale processo, eseguibile iterativamente su tutti i minerali componenti il campione di roccia, consente un'istantanea quantificazione della zoneografia dei minerali studiati, ovvero la potenziale suddivisione dello stesso in vere e proprie sub-fasi, da utilizzare per una ricostruzione del sistema termodinamico utile al calcolo delle pseudosezioni fondamentali per la definizione dei vincoli PT caratteristici di un dato ambiente.

4.4-SINTESI CONCLUSIVA

I valori così ottenuti ci hanno consentito da un lato di ottenere dei vincoli a priori più attendibili nella definizione delle paragenesi di equilibrio, specie utilizzando i risultati della classificazione ottenuti durante il primo ciclo di analisi. Dall'altro lato ci hanno consentito invece a posteriore di ottenere dei vincoli quantitativi minerochimici utili a scegliere in maniera più oculata e consapevole quei punti analisi rappresentativi di un particolare stadio di crescita dei granati presi in esame, consentendoci di ottenere vincoli geotermobarometrici più attendibili per mezzo delle pseudo sezioni precedentemente calcolate per i campioni del Complesso di Mammola (vedi Fig. 68 e 69).

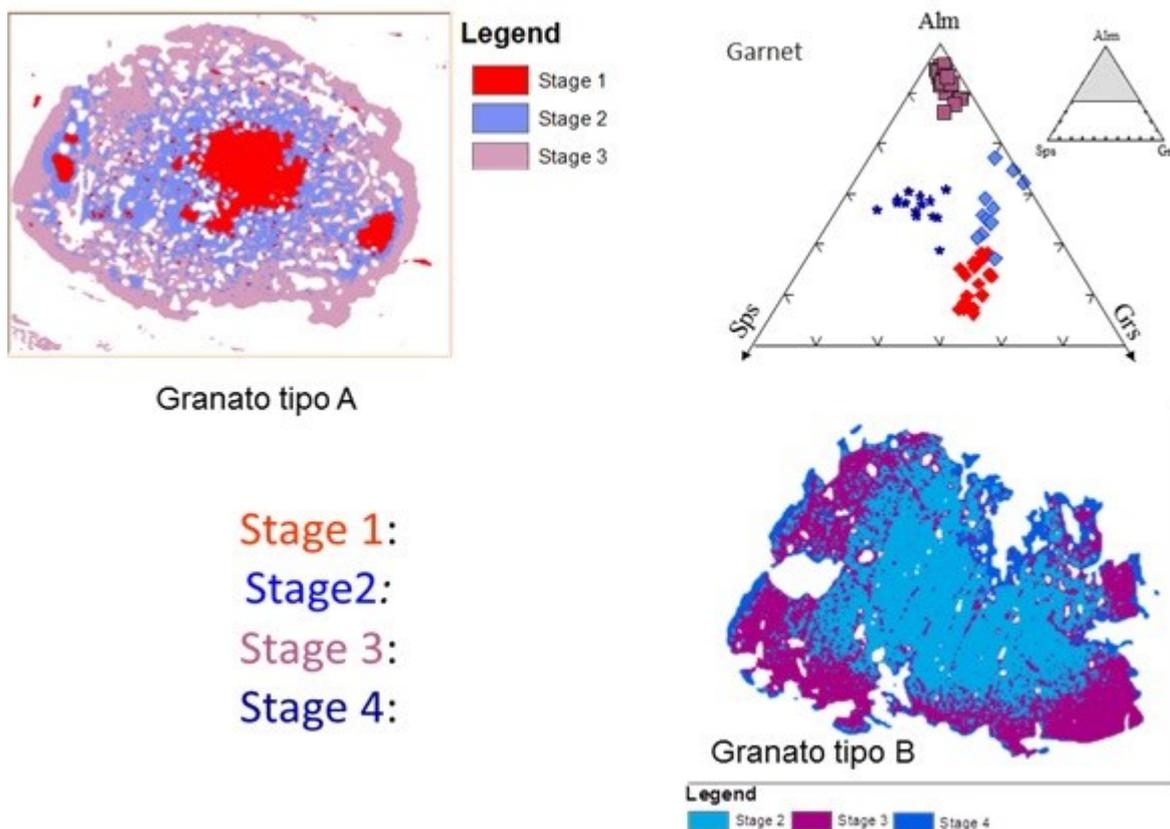


Figura 72 - Classificazione della zoneografia mineralogica nei granati di tipo "A" e di tipo "B"

Infine è bene sottolineare che nell'accezione più generale, la procedura ivi descritta, testata su campioni di rocce provenienti dall'area centrale calabrese, grazie alla semplicità nell'interazione uomo/macchina ed alla estrema rapidità nell'effettuare operazioni iterative lunghe ed articolate, ha consentito e consentirà uno studio rapido ed attendibile di una grande quantità di campioni di rocce fornendo risultati la cui precisione sembra superare nettamente quella derivante da altre tecniche investigative, evidenziando, altresì, aspetti mineralogici a volte imperscrutabili con i tradizionali metodi di osservazione, pur invocando la stessa microscopia elettronica a scansione limitatamente all'osservazione delle immagini BSE sia pur affiancate alle mappe a raggi X prese singolarmente. Sembra più facile, infine, cogliere dettagli utili alla costruzione di nuove carte tematiche complementari. Ad esempio, si consideri l'ipotesi che un particolare tipo di zonazione nel granato indichi uno specifico tipo di evoluzione tettonometamorfica. Esistono centinaia se non addirittura migliaia di mappe di zonazione nei granati in letteratura che potrebbero essere organizzate in un "Database" che se ben popolato avrebbe un'enorme valenza geoscientifica internazionale (Frank Spear et al., 2009).

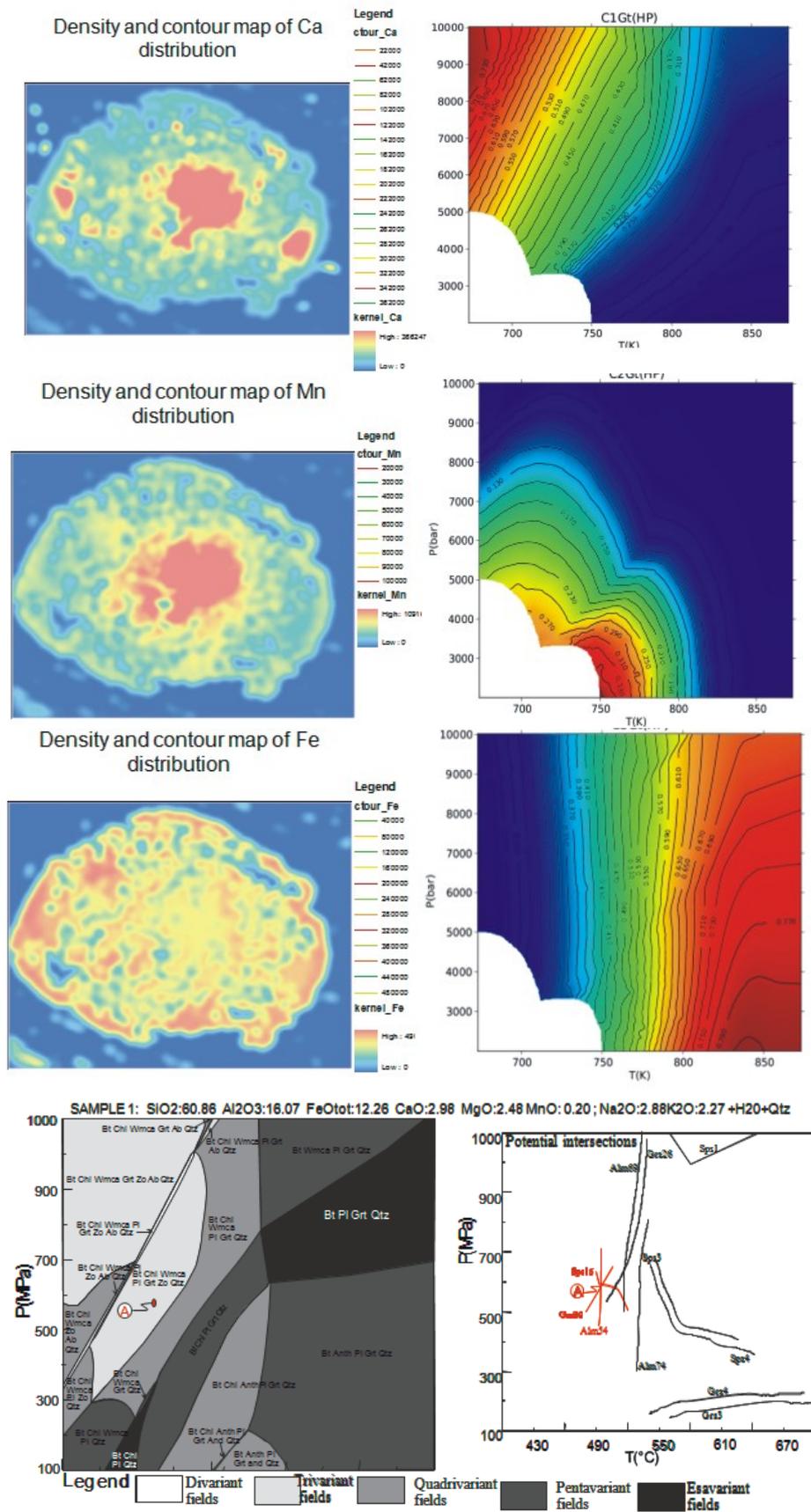


Figura 73 – Distribuzione zoneografica del granato di tipo A e seguenti vincoli termobarici

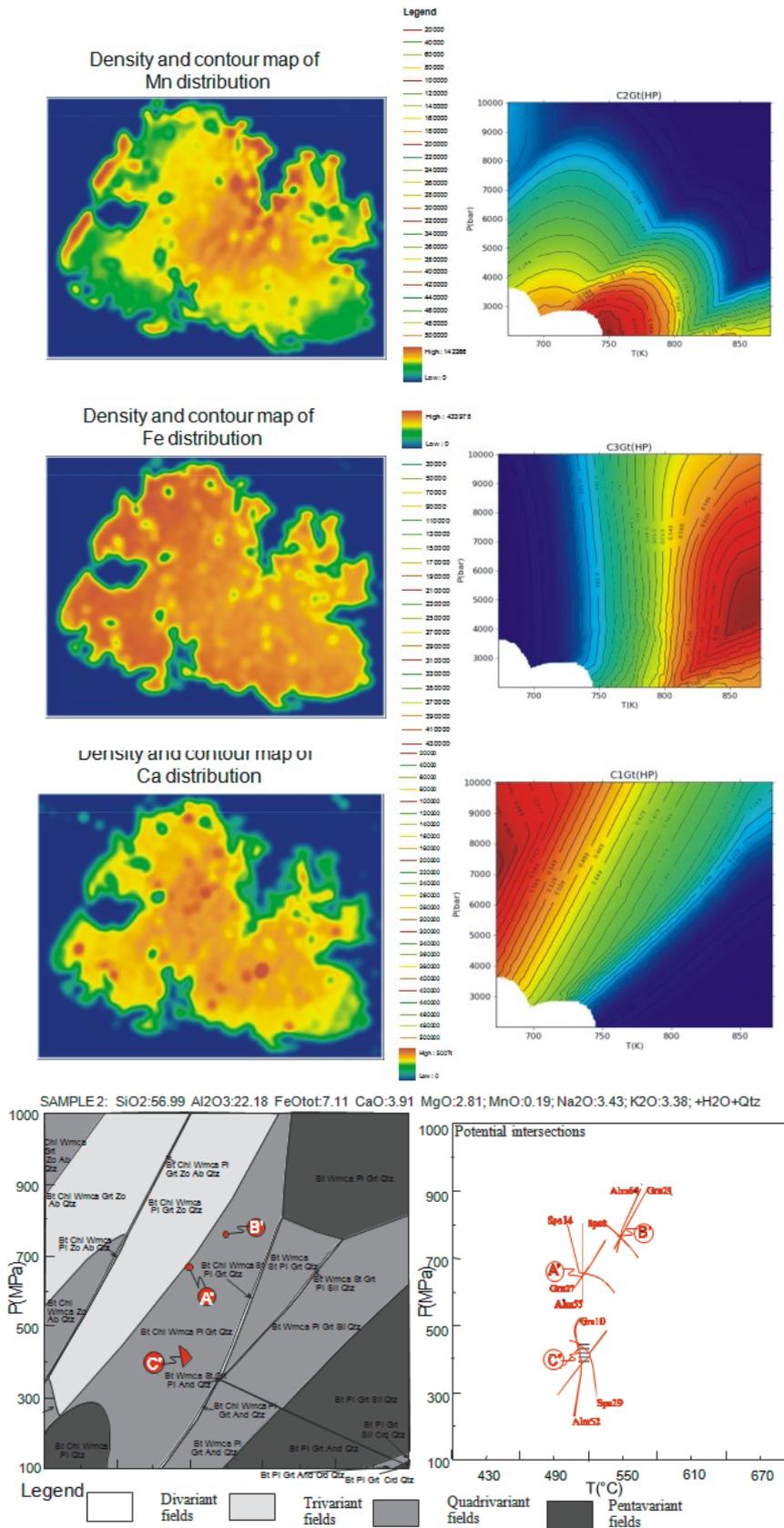


Figura 74 - Distribuzione zoneografica del granato di tipo B e seguenti vincoli termo barici

5- CONCLUSIONI GENERALI

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di implementare nuovi concetti e metodi mutuati dalla statistica e dall'informatica nel settore geopetrologico, nell'ottica di ampliare gli orizzonti verso tecniche di indagine sempre più razionali ed economiche, puntando ad ottimizzare i tempi di esecuzione e l'efficacia delle pratiche del rilevamento geostrutturale e petrologico di campagna.

Ciò ha significato comprendere lo stato dell'arte di una recente disciplina che è la Geomatica e le sua entrata in seno alla geopetrologia.

I dati geoscientifici ad oggi sono sempre più caratterizzati da livelli di approfondimento crescente, grazie alla maggiore diffusione di tecniche investigative via via più sofisticate.

Questa considerazione è ancor più valida se si pensa all'esigenza di organizzare in maniera logica ed interoperabile tutti i dati derivanti dalle analisi di tipo petrologico s.l. che vanno rapportati ad osservazioni multiscalarari cui sempre si rende necessario associare un livello di attendibilità.

Su tali basi operative il presente progetto di ricerca ha compreso lo sviluppo di metodi informatici per l'analisi di problematiche petrologiche ed una geodatabase infrastructure interoperabile capace di organizzare ed esporre dati di interesse geopetrologico, che al tempo stesso permetta di trattare ed elaborare dati articolati e spesso disaggregati con metodi geostatistici.

Il progetto, dunque, si è articolato in tre fasi, ciascuna delle quali è inserita nel contesto in modo complementare pur trattando tematiche di natura differente.

Inizialmente è stato inquadrato il problema della disseminazione delle informazioni territoriali, che, il più delle volte sono acquisite in deroga alle ormai uniformate norme per il trattamento dei dati geospaziali previsto dagli standard ISO. Peggioro è il caso in cui essi rimangono disconnessi gli uni dagli altri perché detenuti all'interno di supporti cartacei o elettronici non interoperabili e non integrati a sistemi di workflow scientifico.

Nell'intento di amalgamare la moltitudine dei dati geopetrologici ricavabili dalla letteratura pregressa nonché continuamente acquisiti da nuove campagne geologiche, si è pensato di creare un filo conduttore tra le informazioni acquisite al rilievo campagna seguendo passo dopo passo i criteri di approfondimento della conoscenza geolitologica, ovvero armonizzare i dati dell'osservazione visiva con quelli di dettaglio crescente ottenuti dalla microscopia ottica e poi elettronica.

Tale motivazione ha spinto alla ricerca di nuove tecnologie e metodologie di trattamento interoperabile dal dato geologico, a partire dalle ontologie per passare alle semantiche, alle sintassi per poi scrutare nelle architetture distribuite su reti telematiche, strumento essenziale per la connessione intelligente del patrimonio dati su scala mondiale.

Il progetto e l'implementazione del geodatabase interoperabile "FOS2MAN", basato sull'Application Schema GEOSCIML e compatibile INSPIRE, è la sintesi di un'attività laboriosa e complessa di tipo interdisciplinare, che ha coinvolto insieme alla petrologia un background scientifico-tecnico come i linguaggi formali, le tecniche di modellazione delle informazioni, tecniche avanzate di database design e quant'altro derivato dall'ingegneria informatica, ivi compreso la realizzazione dell'infrastruttura di web service per la pubblicazione dei dati geospaziali sulla rete Internet.

Per dare il via al progetto sono stati, pertanto, inseriti circa 600 record relativi ad analisi chimiche di campioni di rocce tardo-Paleozoiche, parte acquisiti da pubblicazioni cartacee precedenti ed altri direttamente prelevati in sito, cui 309 riportano una geolocalizzazione attendibile. Di questi circa 200 ricadono sull'area del Massiccio delle Serre, in Calabria Centrale, osservando un maggiore addensamento nell'area nord all'interno del quadrilatero Squillace-Petrizzi-Copanello-Soverato ove si concentrano 56 campioni.

Grazie alla nuova infrastruttura, ancora in via sperimentale, si è pensato ad una nuova tecnica, tradotta in un algoritmo implementato in Python per ESRI ArcGIS® 9.3 e successive versioni, che potesse fornire automaticamente una mappatura geolitologica sulla base dei dati geochimici interpolati per via di tecniche come il "kriging", metodo principale dell'interpolazione geostatistica e sensibile alla variabilità spaziale del fenomeno da analizzare. Attraverso un'accurata analisi variografica si è cercato in ogni caso un modello ideale che potesse minimizzare gli errori quadratici, evidenziare particolari anisotropie sulla diffusione degli elementi chimici e fornire un grado di attendibilità delle "predizioni".

Sono state, dunque, elaborate una carta litologica e 21 mappe di distribuzione relative agli elementi maggiori e minori, a selezionati elementi in traccia e a specifici indici di significato petrologico. La carta litologica dell'area di Squillace-Petrizzi presenta 6 litotipi differenti: gabbri, quarzodioriti, quarzomonzodioriti, tonaliti, granodioriti e graniti. Un confronto con la corrispondente "carta geologica della Calabria" non è sostenibile, per via del differente grado di dettaglio: i 6 differenti litotipi della carta litologica non trovano infatti riscontro nell'unico litotipo plutonico di queste carte.

E' possibile, nonché interessante, un confronto con la carta realizzata da Caggianelli (1988) nella medesima area classificata su base mineralogica modale, da cui emerge che le tonaliti e le granodioriti della carta litologica realizzata in questo lavoro ricoprono nel complesso la stessa area delle tonaliti biotitiche e delle tonaliti biotitiche ad anfibolo di Caggianelli. La differente nomenclatura dei litotipi può essere attribuita al fatto che l'alto contenuto in potassio delle tonaliti di Squillace-Petrizzi è legato a un elevato contenuto modale di biotite piuttosto che di K-feldspato.

Va tenuto conto, inoltre, che la tecnica del "kriging" come qualunque altro metodo di interpolazione, consiglierebbe un addensamento di informazioni quanto più elevato possibile, per restituire un prodotto che possa essere considerato significativamente attendibile. In tale ottica, la quantità di dati interpolati sull'area pilota a disposizione, si sono rivelati relativamente sufficienti ed una maggiore densità degli stessi avrebbe potuto sicuramente coniugare meglio taluni aspetti relativi alla densità di campionamento, omogeneità geologica ed assenza di forti disturbi tettonici.

Dall'analisi di distribuzione geografica degli elementi chimici sono, inoltre, emersi ulteriori dettagli che accanto all'interpretazione dei diagrammi di Harker e di variazione hanno messo in luce alcuni aspetti relativi alla petrogenesi dei corpi plutonici in esame. In particolare questi:

- hanno confermato un possibile legame genetico dei termini da quarzomonzodioritici a leucotonalitici da imputare a processi di frazionamento;
- hanno evidenziato la presenza di alcuni "puls" magmatici a composizione da quarzomonzodioritica a quarzodioritica, localizzati nei settori centro-orientale, centro-occidentale, nord-orientale e nord-occidentale dell'area di Squillace-Petrizzi;
- hanno messo in evidenza il fatto che i corpi granodioritici del settore settentrionale presentano dei contenuti in elementi in traccia differenti rispetto a quelli del settore meridionale: la loro composizione potrebbe essere influenzata dall'interazione con il basamento.

In sintesi, si evidenzia la reale efficienza del metodo per la possibilità di indagare, nei limiti imposti da precondizioni geologiche favorevoli, anche al di sotto di coperture sedimentarie, antropiche o boschive, non solamente sui valori di ciascun elemento chimico bensì sul litotipo derivato ivi presente. Questo è un aspetto enormemente significativo in seno al lavoro svolto e merita di essere approfondito per ulteriori elaborazioni geochimiche non solamente basate sulle classificazioni TAS (vedi De La Roche, ANOR etc...).

Parte finale dell'attività di ricerca è stata successivamente dedicata allo sviluppo di una metodologia semi-automatica compilata in codice Python e largamente basata sulle applicazioni sequenziali di strumenti (noti come geoprocessors), disponibili dietro licenza su piattaforma ArcGis® 9.3 e/o sue successive versioni. Tale metodologia, implementata per funzionare una volta lanciata da una shell di windows, è basata sull'elaborazione statistica multivariata applicata allo studio delle X-Ray Map, quali strumenti fondamentali per la realizzazione di mappe tematiche di tipo quantitativo che, sono potenzialmente in grado di esaltare le caratteristiche minerochimiche e tessiturali di un micro-dominio rappresentativo, ad esempio, di una data sequenza paragenetica in seno ad una roccia metamorfica. La o le classificazioni ottenute per mezzo dell'X Ray Map Analyzer, ci hanno inoltre consentito da un lato di ottenere dei vincoli a priori più attendibili nella definizione delle paragenesi di equilibrio, specie utilizzando i risultati della classificazione ottenuti durante il primo ciclo di analisi. Dall'altro lato ci hanno consentito invece a posteriore di ottenere dei vincoli quantitativi minerochimici utili a scegliere in maniera più oculata e consapevole quei punti analisi rappresentativi di un particolare stadio di crescita dei granati presi in esame, consentendoci di ottenere vincoli geotermobarometrici più attendibili per mezzo delle pseudosezioni precedentemente calcolate (Angì et al., 2010) per i campioni selezionati provenienti dal Complesso di Mammola.

RINGRAZIAMENTI

In questo triennio di frequenza del corso di dottorato ho avuto modo di incontrare figure di elevato pregio accademico che, più o meno consciamente, hanno segnato questo progetto di tesi. Sono grato ad ognuno per il tempo a me dedicato, ad alcuni per il bene condiviso nella più sincera amicizia della quale ho goduto dentro e fuori il Dipartimento di Scienze Geologiche, ritrovando il mordente per sostenere la mia impresa nonostante le circostanze non siano sempre state propizie.

Quasi tutto devo a Gaetano¹, per aver tenacemente creduto, quale fraterno tutor, all'importanza di un progetto trasversale rispetto ai canoni delle scienze petrologiche, dedicandosi totalmente, contro le forze della natura, in un difficile dialogo interdisciplinare, talora convulso e controverso del quale nulla è stato vanificato, bensì condensato in questa dissertazione della quale egli può definirsi coautore, specie dei contenuti geopetrologici.

Uno speciale ed affettuoso ringraziamento è rivolto a Patrizia², anch'ella sopravvissuta ad un'esperienza singolare ed eccentrica che ha saputo condurre in modo integerrimo, con personalità e rigore alla stregua di un tutor, sviluppando insieme a me un argomento complesso ed innovativo cui ella ha curato minuziosamente gli aspetti connessi alla geochimica dei corpi batolitici.

Ringrazio vivamente Lino³, per il prezioso contributo nella fase di interpretazione e discussione delle mappature geochimiche interpolate quale esperto di petrologia dell'area calabra nonché per l'amicizia e per il supporto morale che in tali occasioni non è mai abbastanza.

A Stefano⁴, secondo tutor per scelta, un sentito ringraziamento per avere anch'egli sostenuto il mio progetto offrendomi l'opportunità di collaborare con questo gruppo di ricerca e sovrinteso alle fasi critiche e preparatorie delle esposizioni generali.

All'amico Carmelo⁵, maestro di ironia applicata alle cose di questo e dell'altro mondo; con lui ho condiviso assiduamente dialoghi di ben più alto interesse scientifico, persino del sacro e del profano, tradotti nella sintesi dei concetti scientifici qui sviluppati.

¹ Prof. Gaetano Ortolano – Ricercatore e docente di “Geologia dei basamenti cristallini” presso il DSBGA -CT-

² Prof.ssa Patrizia Fiannacca – Ricercatrice e docente di “Mineralogia” presso il DSBGA -CT-

³ Prof. Rosolino Cirrincione – Professore associato docente di “Petrografia” presso il DSBGA -CT- (CT)

⁴ Prof. Stefano Catalano – Professore Ordinario docente di “Geologia Strutturale” presso il DSBGA -CT-

⁵ Prof. Carmelo Ferlito – Ricercatore e docente di “Vulcanologia” presso il DSBGA -CT-

Voglio ancora ricordare Biagio¹, da molti detto “Allevi” per via dell’esatta somiglianza al noto musicista, per il proficuo contributo alla redazione del geodatabase nella fase di georeferenziazione e di popolamento dei dati geochimici, oltremodo per la memorabile ed esilarante creazione di una nuova figura retorica: l’Asino del Fariseo.

A tutti i docenti dell’area Geopetrologica, Antonino Pezzino, Renato Cristofolini, Paolo Mazzoleni, Rosalda Punturo, Germana Barone, Marco Viccaro, Eugenio Fazio, Annalisa Tranchina ed al personale tecnico-scientifico Elisabetta Giuffrida sono grato per l’ausilio e la costante disponibilità prestata in ogni occasione di dialogo e confronto, sia sul piano scientifico che generale, e per la sincera amicizia da sempre dimostrata.

Infine, come quando la fine è parte di un ossimoro, ringrazio la cara Simona², prima creatura umana concepita da un acceleratore di particelle, sagace personal trainer ed astro nascente nell’arte del “poi vediamo...”, per l’eccellente assetto apportato alla bibliografia ed il tentativo di tradurmi il dono della sintesi, ma ancor di più per avermi infuso la consapevolezza che questa tesi non si sarebbe mai scritta da sola.

Dedico questa tesi alla mia Rossella, eterna compagna di vita ed ai miei cuccioli Sofia e Gaspare, vera gioia di esistere, ai quali sarò per sempre grato per il loro costante sostegno ed amore incondizionato. A mia madre, che mi ama da sempre, ai mie fratelli, mia unica roccaforte e soprattutto al mio caro Papà la cui icona rimarrà per sempre accanto al mio Signore come “lampada per i miei passi e luce del mio cammino”.

¹ Dott. Biagio Centamore - Studente di Laurea Magistrale in Scienze Geologiche presso il DSBGA -CT-

² Dott.ssa Simona Raneri – Dottoranda XXVIII ciclo in Scienze della Terra presso il DSBGA -CT-

BIBLIOGRAFIA

ABANI SAMAL R., RAJA SENGUPTA R. and FIFARECK R.H. (2011) - Modelling spatial anisotropy of gold concentration data using GIS-based interpolated maps and variogram analysis: Implications for structural control of mineralization, *Journal of Earth System Science* 120, 583-593.

ACQUAFREDDA P., LORENZONI S., MINZONI N., ZANETTIN LORENZONI E. (1987) – The paleozoic sequence in the Stilo-Bivongi area (Central Calabria). *Memorie Scienze Geologiche Università di Padova* 39, 117-127.

ACQUAFREDDA P., FORNELLI A., PAGLIONICO A., PICCARRETA G. (2006) – Petrological evidence for crustal thickening and extension in the Serre granulite terrane (Calabria, southern Italy). *Geological Magazine* 143 (2), 145-163.

ACQUAFREDDA P., FORNELLI A., PICCARRETA G., PASCAZIO A. (2008) - Multi-stage dehydration decompression in the metagabbros from the lower crust rocks of the Serre (southern Calabria, Italy). *Geological Magazine* 145 (3), 397-411.

ALVAREZ W., SHIMABUKURO D. H. (2009) - The Geological Relationships Between Sardinia And Calabria During Alpine And Hercynian Times. *Italian journal of geosciences*, 128, 257-268

AMODIO-MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI A., ZUPPETTA A. (1976) – L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide. *Mem. Soc. Geol. It.*, 17, 1-60.

ANDERSON C.A., HASLER M.F. (1966) - Extension of electron microprobe techniques to biochemistry by the use of long wavelength X-rays. In *Proceedings of the Fourth International Conference on X-ray Optics and Microanalysis*, Castaing, R., Deschamps, P. and Philibert, J. Eds, 310–327. Paris: Hermann.

ANGI' G., CIRRINCIONE R., FAZIO E., FIANNACCA P., ORTOLANO G., PEZZINO A. (2010) - Metamorphic evolution of preserved Hercynian crustal section in the Serre Massif (Calabria-Peloritani Orogen, southern Italy). *Lithos* 115, 237-262.

ARMSTRONG M. (1998) - *Basic Linear Geostatistics*. Springer Verlag.

ATZORI P., CIRRINCIONE R., DEL MORO A. & PEZZINO A. (1994) - Structural, metamorphic, and geochronologic features of the Alpine event in south-eastern sector of the Peloritani Mountains (Sicily). *Periodico di Mineralogia*, v. 63, p. 113–125.

ATZORI P., PEZZINO A., ROTTURA A. (1977) - La massa granitica di Cittanova (Calabria Meridionale): relazioni con le rocce granitoidi del massiccio delle Serre e con le metamorfiti di Canolo, San Nicodemo e Molochio (nota preliminare). *Bollettino della Società Geologica Italiana* 96, 387-391.

- BARBARIN B. (1990) - Granitoids: main petrogenetic classification in relation to origin and tectonic setting. *Geological Journal* 25, 227-238.
- BARRAUD J. (2006) - The use of watershed segmentation and GIS software for textural analysis of thin sections. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 154, 17-33
- BEN OTHMAN D., FOURCADE S., ALLEGRE C. J. (1984) – Recycling processes in granite-granodiorite complex genesis: the Querigut case studied by Nd-Sr isotope systematics. *Earth and Planetary Science Letters* 69, 290-300.
- BIEHL L., LANDGREBE D. (2002) - MultiSpec - a tool for multispectral–hyperspectral image data Analysis. *Computers and Geosciences* 28, 1153–1159
- BONARDI G., CAVAZZA W., PERRONE V., ROSSI S. (2001) – Calabria-Peloritani Terrane and Northern Ionian Sea. In: VAI G. B. & MARTINI I. P. Ed., *Anatomy of a oroge: the Apennines and adjacent Mediterranean Basins*. 287-306, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- BONARDI G., MESSINA A., PERRONE V., RUSSO S., ZAPPETTA A. (1984) - L'unità di Stilo nel settore meridionale dell'Arco Calabro-Peloritano. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 103, 279–309.
- BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI A. & ZUPPETTA A. (1976) – L'Arco calabro-peloritano, *Carta Geologica 1:500.000*, Società Geologica Italiana, 68° Congresso. L. A. C. Firenze 1976.
- BONNET N. (1995) - Processing of images and image series: A tutorial review for chemical microanalysis. *Microchimica Acta* 120, 195-210
- BONNET N. (1998) - Multivariate statistical methods for the analysis of microscope image series: applications in material science. *Journal of Microscopy*. 190, 2-18.
- BORSI, S., HIEKE MERLIN, O., LORENZONI, S., PAGLIONICO, A., ZANETTIN LORENZONI, E. (1976) Stilo Unit and "dioritic-kinzigitic" unit in Le Serre (Calabria, Italy). Geological, petrological, geochronological characters *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 19, pp. 501-510
- CAGGIANELLI A. (1988) - Le tonaliti di Squillace-Petrizzi (Serre Calabre): aspetti petrogenetici. *Doct. Thesis, Dip. Geominer. University of Bari*.
- CAGGIANELLI A., DI FLORIO M.R. (1989) - Trondhjemitic evolution caused by compactation of a crystal mush: an example from southern Calabria (Italy). *Periodico Mineralogia* 58, 9-23.

CAGGIANELLI A., DEL MORO A., PAGLIONICO A., PICCARRETA G., PINARELLI L., ROTTURA A. (1991) - Lower crustal granite genesis connected with chemical fractionation in the continental crust of Calabria (Southern Italy). *Eur. J. Mineral.* 3,159-180.

CAGGIANELLI A., PROSSER G., ROTTURA A. (2000) - Thermal history vs. fabric anisotropy in granitoids emplaced at different crustal levels: an example from Calabria, southern Italy. *Terra Nova* 12, 109-116.

CAGGIANELLI A., LIOTTA D., PROSSER G., RANALLI G. (2007) - Pressure-temperature evolution of the late Hercynian Calabrian continental crust: compatibility with postcollisional extensional tectonics. *Terra Nova* 19, 502-514.

CASTAING R. (1951) - Application des sondes electronique a une methode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique. Université de Paris (publication ONERA), Paris.

CARMIGNANI L., PERTUSATI P. C., BARCA S., CAROSI R., DI PISA A., GATTIGLIO M., MUSUMECI G. & OGGIANO G. (1992) – Struttura della Catena Ercinica in Sardegna. Guida all'escursione. *Gr. Inform. Geol. Strutt.*, 177 pp., Siena.

CIRRINCIONE R., ORTOLANO G., PEZZINO A., PUNTURO R. (2008) - Poly-orogenic multi-stage metamorphic evolution inferred via P–T pseudosections: an example from Aspromonte Massif basement rocks (Southern Calabria, Italy). *Lithos* 103, 466–502

CIRRINCIONE R., PEZZINO A. (1991) - Caratteri strutturali dell'evento Alpino nella serie mesozoica di Alì e nell'Unità metamorfica di Mandanici (Peloritani Orientali). *Memorie Società Geologica Italiana*, v. 47, p. 263–272.

CLARKE G. L., DACZKO N. R., NOCKOLDS C. (2001) - A method for applying matrix corrections to X-ray intensity maps using the Bence-Albee algorithm and Matlab, *J. metamorphic Geol.*, 19, 635-644

CLARKE D.B., ROTTURA A. (1994) - Garnet forming and garnet-eliminating reactions in a quartz diorite intrusion at Capo Vaticano, Calabria, southern Italy. *Canad. Mineral.* 32, 623-635.

CLARKE D.B., PAGLIONICO A., ROTTURA A. (1990) - Garnet-forming and garnet eliminating reactions in the Capo Vaticano quartz diorite, Calabria, Southern Italy. *GAC-MAC Annual Meeting*, Vancouver, May 10-18, 1990, 15, A25.

COLONNA V., LORENZONI S., ZANETTIN LORENZONI E. (1973) – Sull'esistenza di due complessi metamorfici lungo il bordo sud-orientale del massiccio granitico delle Serre (Calabria). *Bollettino della Società Geologica Italiana* 92, 801-830.

- COSSIO R., BORGHI A. (1998) - PETROMAP: MS-DOS software package for quantitative processing of X-ray maps of zoned minerals. *Computers and Geosciences*, 24, p.797-803.
- COSSIO R., BORGHI A., RUFFINI R. (2002) - Quantitative modal determination of geological samples based on X-ray multielemental map acquisition. *Microsc. Microanal.* 8, 139-149.
- COX K.G., BELL J.D., PANKHURST R.J. (1979) - *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen and Unwin, London.
- CRISCI G.M., LEONI L., MAZZUOLI R., MORESI M., PAGLIONICO A. (1980) - Petrological and geochemical data on two intrusive stoles of the «Serre» (Calabria, Southern Italy). *N.Jb. Mineral. Abh.*, 138, 274-291.
- D'AMICO C., ROTTURA A., MACCARRONE E., PUGLISI G. (1982) - Peraluminous granitic suite of Calabria-Peloritani Arc (Southern Italy). *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia* 38, 35-52.
- DEL MORO A., MACCARRONE E., PARDINI G. & ROTTURA A. (1982) – Studio radiometrico Rb/Sr di granitoidi peraluminosi dell'Arco Calabro-Peloritano. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia* 38, 1015-1026.
- DEL MORO A., PAGLIONICO A., PICCARRETA G., ROTTURA, A. (1986) – Tectonic structure and post- Hercynian evolution of the Serre, Calabrian Arc, southern Italy: geological, petrological and radiometric evidences. *Tectonophysics* 124, 223-238.
- DEL MORO A., FORNELLI A., PAGLIONICO A. (1994) - K-feldspar megacrystic suite in the Serre (Southern Calabria - Italy). *Periodico di Mineralogia* 63, 19-33.
- DE ANDRADE V., VIDAL O., LEWIN E., O'BRIEN P., AGARD P. (2006) - Quantification of electron microprobe compositional maps of rock thin sections: an optimized method and examples. *J. Metam. Geol.* 24, 655–668.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANDCLAUDE, P., MARCHAL, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1, R_2 -diagrams and major element analysis—its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29, 183–210.
- DE VIVO B., AYUSO R.A., BELKIN H.E., LIMA A., MESSINA A., VISCARDI A. (1992) -Whole-rock geochemistry and fluid inclusions as exploration tools for mineral deposit assessment in the Serre batholith, Calabria, Southern Italy. *European Journal of Mineralogy* 4, 1035-1051.
- DE VIVO, B., LIMA, A., BOVE, M.A., ALBANESE, S., CICCHELLA, D., SABATINI, G., DI LELLA, L.A., PROTANO, G., RICCOBONO, F., FRIZZO, P. and RACCAGNI, L. (2008) - Environmental geochemical maps of Italy from the FOREGS database. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 8 (3-4), pp. 267-277.

DUBOIS R. (1970) - Phases the serrage, nappes de socle et métamorphisme alpine à la jonction Calabre-Appennin: la suture calabro-appennique. *Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, s. 2,12 (3): 221-253.

EL BOUSEILY A.M., EL SOKKARY A.A (1975) - The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. *Chem. Geol.*, 16, 207-219.

EVANS, T.P. (2004) - A method for calculating effective bulk composition modification due to crystal fractionation in garnet-bearing schist: Implications for isopleth thermobarometry. *Journal of Metamorphic Geology*, 22 (6), 547-557

FAZIO E. (2004) - Rilevamento geologico-strutturale delle unità metapelitiche affioranti nell'area meridionale del Massiccio dell'Aspromonte: Caratterizzazione petrografica ed implicazioni termo bariche. Unpubl. Ph.D. thesis, Università degli Studi di Catania, 137 pP.

FAZIO E., CIRRINCIONE R., PEZZINO A. (2008) - Estimating P–T conditions of Alpine-type metamorphism using multistage garnet in the tectonic windows of the Cardeto area (southern Aspromonte Massif, Calabria). *Mineralogy and Petrology*, 93, 111-142.

FESTA V., DI BATTISTA P., CAGGIANELLI A., LIOTTA D. (2003) - Exhumation and tilting of the late Hercynian continental crust in the Serre Massif (Southern Calabria - Italy). *Bollettino della Societa Geologica Italiana* 2, 79-88.

FIANNACCA P. (2000) - Petrologia dei corpi leucocratici a plagioclasio dei Peloritani nord-orientali (Sicilia Nord-Orientale). *Doct. Theisis, Universita di Catania.*

FIANNACCA P., WILLIAMS I.S., CIRRINCIONE R. AND PEZZINO A. (2008) – Crustal Contributions to Late Hercynian Peraluminous Magmatism in the Southern Calabria-Peloritani Orogen, Southern Italy: petrogenetic Inferences and the Gondwana Connection. *Journ. Petrol.* 49:1497-1514.

FIANNACCA P., WILLIAMS I.S, CIRRINCIONE R., PEZZINO A. (2013) - The augen gneisses of the Peloritani Mountains (NE Sicily): Granitoid magma production during rapid evolution of the northern Gondwana margin at the end of the Precambrian. *Gondwana Research* 23, 782-796.

FIANNACCA P., LO PO D., ORTOLANO G., CIRRINCIONE R., PEZZINO A. (2012) - Thermodynamic modeling assisted by multivariate statistical image analysis as a tool for unraveling metamorphic P-T-s evolution: an example from ilmenite garnet-bearing metapelite of the Peloritani Mountains, Southern Italy. *Miner. Petrol.* 106, 151-171.

FINGER F., QUADT A. VON, PIN C., STEYRER HP. (1998) – The ophiolite chain along the western Moravo-Silesian plate margin: a trace of the Rheic suture? *Acta Univ. Carolinae Geol.*, 42:244-245.

- FLESCHE H., NIELSEN A.A., LARSEN R. (2000) - Supervised mineral classification with semi-automatic training and validation set generation in scanning electron microscope energy dispersive spectroscopy images of thin sections. *Math Geol* 32:337–366
- FORNELLI A. (1991) - Il plutonismo tardo-ercinico nelle Serre orientali (Calabria meridionale): aspetti petrologici. *Doct. thesis, Dip. Geom. University Bari*, 133.
- FORNELLI A., CAGGIANELLI A., DEL MORO A., BARGOSSO G.M., PAGLIONICO A., PICCARRETA G., ROTTURA A. (1994) - Petrology and evolution of the Central Serre Granitoids (Southern Calabria - Italy). *Periodico di Mineralogia* 63, 53-70.
- FORNELLI A., PICCARRETA G., ACQUAFREDDA P., MICHELETTI F., PAGLIONICO A. (2004) - Geochemical fractionation in migmatitic rocks from Serre granulitic terrane (Calabria, southern Italy). *Periodico di Mineralogia* 73, 145-157.
- FRIEL J.J., LYMAN C. E. (2006) - X-ray mapping in electron-beam instruments. *Microsc. Microanal.* 12, 2-25.
- GHISSETTI F., PEZZINO A., ATZORI P., VEZZANI L. (1991) – Un approccio strutturale per la definizione della linea di Taormina: risultati preliminari. *Mem. Soc. Geol. It.*, 47, 273-289.
- GOMARASCA M. A. (2004) - Elementi di geomatica, Associazione italiana di rilevamento, Ed. AIT – Milano, 618.
- GONZALEZ R. C., WOODS R. E. (1992) - Digital Image Processing. Addison-Wesley, 166–171
- GRAESSNER, T., SCHENK, V., BRÖCKER, M., MEZGER, K. (2000) Geochronological constraints on the timing of granitoid magmatism, metamorphism and post-metamorphic cooling in the Hercynian crustal cross-section of Calabria *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (4), pp. 409-421
- GUERRERA F., MARTIN-ALGARRA A. & PERRONE (1993) – Late Oligocene-Miocene syn-late orogenic successions in western and Central Mediterranean chains from the Betic Cordillera to the southern Apennines. *Terra Nova*, v. 5, pp. 525-544.
- HILDRETH W., MOORBATH S. (1988) - Crustal contribution to arc magmatism in the Andes of Central Chile, *Contrib. Mineral. Petrol.* 98, 1988, 455 - 489
- HEYMES T., BOUILLIN J.-P., PÊCHER A., MONIÉ P. & COMPAGNONI R. (2008) - Middle Oligocene extension in the Mediterranean Calabro–Peloritani belt (southern Italy): insights from the Aspromonte nappes-pile. *Tectonics* 27, TC2006.
- HEZEL D.C. (2010) - A mathematica code to produce phase maps from two element maps. *Computers and Geosciences* 36, 1097–1099

- HIEKE M. O., LORENZONI S. (1973) – Il massiccio granitico delle Serre (Calabria). Stato attuale delle conoscenze petrografiche. Mem. Ist. Geo. Min. Università di Padova, 29, 1-29.
- IRVINE T.N & BARAGAR W.R (1971) – A guide to the chemical classification of common igneous rock. Can.J. Earth Sci., 8, 523-548.
- ISAAKS H. E., SRIVASTAVA R. M. (1989) - An introduction to Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press
- JENSEN J. R. (1996) - Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. (2nd ed.) Prentice Hall. 316
- LAUNEAU, P., CRUDEN, A.R., AND BOUCHEZ, J.L. (1994) - Mineral recognition in digital images of rocks: a new approach using multichannel classification. Can. Min. 32, 919–933.
- LAURENZI M.A., DEL MORO A. and ROTTURA A. (1986) - Preliminary K-Ar and Rb-Sr data on Capo Vaticano and Le Serre granitoids (Calabria, southern Italy). ICOG VI, Cambridge. Terre Cognita, 6 (2): 142.
- LAXTON, J.A , SERRANO, J.-J.B, TELLEZ-ARENAS, A.B. (2010) - Geological applications using geospatial standards - an example from OneGeology-Europe and GeoSciML. International Journal of Digital Earth, 3 (1), 31-49
- LE BAS M.J., LE MAITRE R.W., STRECKEISEN A., ZANETTIN B. (1986) - A Chemical Classification of Volcanic Rocks based on the Total-Alkali-Silica Diagram; Journ. of Petrol., 27, 745-750
- LE MAITRE, R.W. (1989) - A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms; Recommendations of the IUGS, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks
- LE MAITRE R. W. (2005) - Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, Cambridge University Press, 236.
- LI Y., ONASCH M.C., GUO Y. (2008) - GIS-based detection of grain boundaries. Journal of Structural Geology 30, 431–443.
- LIBERI, F., MORTEN, L., PILUSO, E. (2006) Geodynamic significance of ophiolites within the Calabrian Arc Island Arc, 15 (1), pp. 26-43
- LILLESAND T. M., KIEFER R. W. (1987) - Remote sensing and image interpretation. Wiley, 721.
- MA X., FOX P. (2013) - Recent progress on geologic time ontologies and considerations for future works, Earth Sci Inform 6, 31–46.

- MACCARRONE E., PAGLIONICO A., PICCARRETA G., ROTTURA A. (1983) – Granulite amphibolite facies metasediments from the Serre (Calabria, Southern Italy): their protoliths and the processes controlling their chemistry. *Lithos* 16, 95-111.
- MACERA, P., DEL MORO, A., BARGOSSO, G.M., CAMPANA, R., ROTTURA, A. (1994) Polygenetic nature of the Cima d'Asta intrusive complex, Southern Alps, Italy. Inferences from petrological, geochemical and isotopic (Sr and Nd) data *LITHOS*, 32 (1-2), pp. 47-62
- MAMANI M. (2010) - Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin* 122,162.
- MENARD T., SPEAR F. (1993) - Metamorphism of calcic pelitic schist, Strafford Dome, Vermont: compositional zoning and reaction history. *Journal of Petrology* 34, 977–1005.
- MIDDLEMOST A. K. E. (1994) – Naming materials in the magma/igneous rock system, *Earth Science Review* 37, 215-224.
- MORESI M., PAGLIONICO A. (1975) - Osservazioni geologiche, petrografiche e geochimiche sulle rocce granitoidi delle Serre orientali (Calabria). *Bollettino della Società Geologica Italiana* 94, 1855-1882.
- MUSSIO L., NOCERA R., POLI D. (1998): Numeric Solution Strategies in Data Processing and Spatial Data Analysis. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXII, part 3/1. Columbus (OH), p. 138-145.
- MUSSIO L., NOCERA R., POLI D. (1999): Discrete Mathematics for Spatial Data Classification and Understanding. In S.F. El Hakim, A. Gruen (Ed's) *Videometrics VI - SPIE*, vol. 3641. SPIE, San Jose (CA), p. 217 – 226.
- NESBITT H. W., YOUNG G. M. (1982) - Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715 - 717
- O'CONNOR J. T. (1965) - A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratio. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 525B, 79-84.
- ORTOLANO G., CIRRINCIONE R. & PEZZINO A. (2005) – P-T evolution of Alpine metamorphism in the southern Aspromonte Massif (Calabria – Italy). *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 85, 31-56.
- ORTOLANO G., ZAPPALA' L., MAZZOLENI P. (submitted) - X-Ray Map Analyzer: a new ArcGIS® based tool for the quantitative statistical data handling of X-ray maps (Geoscience and Geomaterial applications) – *Computer and Geoscience*

- PAGLIONICO A. & ROTTURA A. (1979) – Variscan magmatism in the calabro-peloritan arc (Southern Italy). Newsletter, 1, Sassi F.P. and Visonà D. Ed. S, Padova.
- PASSCHIER C.W., TROUW R.A.J. (1996) - Microtectonics. Springer-Verlag Berlin. 289 pp.
- PEACOCK M.A (1931) – Classification of igneous rock series. J.Geol., 39, 54-67.
- PECCERILLO A., TAYLOR S.R. (1976) - Geochemistry of the Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contrib. Mineral.Petrol., 58, 63-81
- PEZZINO A., ANGI' G., FAZIO E., FIANNACCA P., LO GIUDICE A., ORTOLANO G., PUNTURO R., CIRRINCIONE R., DE VUONO E. (2008) - Alpine metamorphism in the Aspromonte Massif: implications for a new framework for the southern sector of the Calabria-Peloritani Orogen (Italy). International Geology Review, 50, 423-441.
- PILUSO, E., CIRRINCIONE, R., MORTEN, L. (2000) Ophiolites of the calabrian peloritan arc and their relationships with the crystalline basement (catena costiera and sila piccola, calabria, southern Italy) glom 2000 excursion guide-book Ofioliti, 25 (2), pp. 117-140.
- PLATT J. P., COMPAGNONI R. (1990) - Alpine ductile deformation and metamorphism in a Calabrian basement nappe (Aspromonte, south Italy). Eclogae Geologicae Helvetiae. 83, 41-58.
- PUGLISI G., PEZZINO A. (1994) – Metamorphism in the central Aspromonte area: geological, mineralogical, and petrogenetic relationships. Per. Mineral., 63, 153-168.
- PUGLIESE A. (2012) – Tecniche di interpolazione geostatistica per la stima della piena di progetto in bacini non strumentati, Ph. D. Thesis, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.
- PULIATTI G. (2011) – Studio geo-petro-strutturale della shear zone milonitica di Palmi (RC): implicazioni reologiche e cinematiche, Ph. D. Thesis, Università di Catania.
- RASPA G., BRUNO R. (1994a) - Dispense di Geostatistica Applicata. Capitolo 3 – Geostatistica di base. url: <http://w3.uniroma1.it/geostatistica/Geostatistica/Dispense.pdf>
- RASPA G., R. BRUNO (1994b) - La pratica della geostatistica lineare: il trattamento dei dati spaziali. Ed. Angelo Guerini ed Associati S.r.l., 170.
- RIZZO G., PILUSO E. e MORTEN L. (2005) - Tonalitic to trondhjemitic dykes within metabasic lower-crust rocks, Serre massif, Calabrian-Peloritan arc. Memorie Società Geologica Italiana 4, 45-52.
- ROMANO V., CIRRINCIONE R., FIANNACCA P., LUSTRINO M., TRANCHINA A. (2011) - Late-Hercynian post-collisional dyke magmatism in central Calabria (Serre Massif, southern Italy). Per. Mineral., 80, 489-515.

ROTTURA A., BARGOSSO G.M., CAIRONI V., DEL MORO A., MACCARRONE E., MACERA P., PAGLIONICO A., PETRINI R., PICCARRETA G. (1989) - Petrology, geochemistry and Sr, Nd isotopes of contrasting Hercynian granitoids from the southern Calabrian Arc (southern Italy). *Miner. Petrogr. Acta* 32, gen-36.

ROTTURA A., BARGOSSO G.M., CAIRONI V., DEL MORO A., MACCARRONE E., MACERA P., PAGLIONICO A., PETRINI R., PICCARRETA G., POLI G. (1990) - Petrogenesis of contrasting Hercynian granitoids from the Calabrian Arc, southern Italy. *Lithos* 24, 97- 119.

ROTTURA A., DEL MORO A., PINARELLI L., PETRINI R., PECCERILLO A., CAGGIANELLI A., BARGOSSO G.M., PICCARRETA G. (1991) - Relationships between intermediate and acidic rocks in orogenic granitoid suites: petrological, geochemical and isotopic (Sr,Nd, Pb) data from Capo Vaticano (southern Calabria, Italy). *Chem. Geol.* 92, 153-176.

SADEGHI, M., MORRIS, G.A., CARRANZA, E.J.M., LADENBERGER, A., ANDERSSON, M., (2013) - Rare earth element distribution and mineralization in Sweden: An application of principal component analysis to FOREGS soil geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 133, 160–175

SCHENK V. (1980) - U/Pb and Rb/Sr radiometric dates and their correlation with metamorphic events in the granulite-facies basement of the Serre, southern Calabria (Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 73, 23-38.

SCHENK V. (1984) - Petrology of felsic granulites, metapelites, metabasics, ultramafics and metacarbonates from southern Calabria (Italy): prograde metamorphism, uplift and cooling of a former lower crust. *Journal of Petrology* 25, 255-298.

SCHENK V. (1989) - P-T-t path of the lower crust in the Hercynian fold belt of southern Calabria. In: Daly, J.S., Cliff, R.A., Yardley, B.W.D. (Eds.), *Evolution of metamorphic belts: Geological Society of London, Special Publication* 43, 337-342.

SCHOWENGERDT R.A. (1997) - *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 2nd edn., Academic Press, New York, 522.

SHATAGIN N. N., JAFAR S., CHEKALIN B. M. (2007) – Variography of the ores from the Rubtsovsk Massive-Sulfide Copper-Lead-Zinc deposit (Altai Territory). *MOSCOW UNIVERSITY GEOLOGY BULLETIN*, 62, 376–382

SPEAR F. (1995) - *Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time path*, Mineralogical Society of America Monograph 2nd Ed., 799.

SPEAR F., PYLE M. J., CHERNIAK D. (2009) - Limitations of chemical dating of Monazite. *Chemical Geology*, 266 (2009) 227-239.

STAMPFLI G. (1996) - The Intra-Alpine terrain: a Palaeotethyan remnant in the Alpine Variscides. *Eclogae geologicae Helveticae*, 89, 13-42.

STAMPFLI G. M. (2000) - Tethyan oceans. Geological Society, London, Special Publications; v. 173, p. 1-23.

STAMPFLI G. M., BOREL G. D. (2002) - A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Letters* 196, 17-33.

STAMPFLI G. M., BOREL G. D., MARCHANT R & MOSAR J. (2002) - Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 77-106.

TARQUINI S., FAVALLI M. (2010) - A microscopic information system (MIS) for petrographic analysis *Computers and Geosciences* 36 665–674

THOMSON S. R. (1994) – Fission track analysis of the cristalline basement rocks of the Calabrian Arc, southern Italy: evidence of Oligo-Miocene late orogenic extension and erosion. *Tectonophysics*, 238, 331-352.

THORNTON C.P., TUTTLE O.F. (1960) - Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation Index. – *Am. J. Sci.*, 258, 664-684.

TINKHAM D.K., GHENT E.D. (2005) - XRMMapAnal: A program for analysis of quantitative X-ray maps. *Am. Min.* 90, 737-744.

TORTORICI L. (1982) – Lineamenti geologico-strutturali dell'Arco Calabro-Peloritano. *Rendiconti Soc. It. Di Mineralogia e Petrologia*, 38 (3), 927-940.

UGIDOS J.M., RECIO C. (1993) - Origin of cordierite-bearing granites by assimilation in the Central Iberian Massif (CIM), Spain. *Chemical Geology* 103, 27–43.

VAI, G.B.(2001) GSSP, IUGS AND IGC: An endless story toward a common language in the earth sciences *EPISODES*, 24 (1), PP. 29-31

VAI, G.B., MARTINI, P. (EDS.), 2001. Anatomy of an orogen: the Apennines and adjacent Mediterranean basins. KLUWER ACADEMIC PUBLISHER, DORDRECHT, THE NEDERLANDS. 632 PP

VAI, G.B. (1992) Il segmento calabro-peloritano dell'orogene ercinico. disaggregazione palinspastica *BOLL. SOC. GEOL. IT.*, 111, PP. 109-129

VIELZEUF, D., CLEMENS, J. D., PIN, C., MOINET, E. (1990) - Granites, granulites, and crustal differentiation. In: Vielzeuf, D. & Vidal, Ph. (eds) *Granulites and Crustal Evolution*. Nato ASI Series. Dordrecht: Kluwer Academic, 59–85.

VON RAUMER J. F. et al. (1999a) – The Palaeozoic metamorphic evolution of the Alpine External Massifs. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 79, 5-22.

VON RAUMER J. F., BUSSY F., SCHALTEGGER U. (1999b) – Ordovician granitoids in the Alps: significant and Peri-Gondwanan correlation. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung, Terra Nostra 99/1, 165.

VON RAUMER J. F., STAMPFLI G. M., BOREL G. G., BUSSY F. (2002) - The organisation of pre- Variscan basement areas at the north-Gondwanan margin. Int. J. Earth Sc., 91, 35-52.

VON RAUMER J. F., STAMPFLI G. M., BUSSY F. (2003) – Gondwana-derived microcontinents. The constituents of the Variscan and Alpine collisional orogens. Tectonophysics 365, 7-22.

VOSHAGE H., HOFMANN A.W., MAZZUCHELLI M., RIVALENTI G., SINIGOI S., RACZEK I., DEMARCHI G. (1990) - isotopic evidence from the Ivrea Zone for a hybrid lower crust formed by magmatic underplating. Nature., 347, 731-736.

WACKERNAGEL H. (1998) - Multivariate Geostatistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

YING GU (2003) - Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis: An Introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyser. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2, 33-41.

ZHAO G., MACLEAN A. L. (2000) - A Comparison of Canonical Discriminant Analysis and Principal Component Analysis for Spectral Transformation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 66, 841-847.

ZIEGLER P. A., STAMPFLI G. M. (2001) – Late Paleozoic Early Mesozoic plate boundary reorganisation: collapse of the Variscan orogen and opening of Neotethys. In: R. Cassinis (Ed.), the continental Permian of the Southern Alps and Sardinia (Italy) regional reports and general correlations. Annali Museo Civico Scienze Naturali, Brescia 25, 17-34.

SITOGRAFIA

<http://www.cgi-iugs.org/>

<http://www.geosci.mil.org/>

<http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>

<http://www.iugs.org/>

<http://ncgmp.usgs.gov/>

<http://www.onegeology.org/>

<http://www.onegeology-europe.eu/>

<http://resource.geosciml.org/201202/>

<http://www.seegrid.csiro.au/wiki/CGIModel/GeoSciML/>

<http://www.usgs.gov/>

<http://webhelp.esri.com/>

<http://www.auscope.org.au/site/>

<http://www.iedadata.org/>

<http://metpetdb.rpi.edu/metpetweb/#home>

<http://www.geosamples.org/>

<http://www.earthchem.org/>

<http://www.earthchem.org/petdb>

<http://pet.gns.cri.nz/>

<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>

http://www.digitpa.gov.it/sites/default/files/catalogo_pac/Repertorio%20Nazionale%20dei%20Dati%20Territoriali%20-%20RNDT.pdf

ArcGIS® by Esri. ArcGIS® and ArcMap™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit www.esri.com