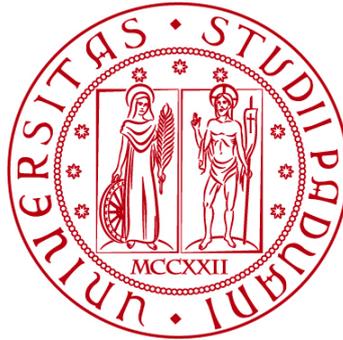


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Scienze Naturali



ELABORATO DI LAUREA

**Studio delle inclusioni di fuso silicatico nelle vulcaniti del
Gruppo Vulcanico Atesino (Alpi meridionali, Italia)**

Tutor: Prof.ssa Bruna Borges Carvalho
Dipartimento di Geoscienze

Co-tutor: Prof. Omar Bartoli
Dipartimento di Geoscienze

Laureanda: Gloria Roman

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

Riassunto	2
1. Introduzione e obiettivi del lavoro	3
2. Area di studio e campionamento.....	10
2.1 Inquadramento geologico	10
2.2 Stratigrafia del Gruppo Vulcanico Atesino	12
2.3 Campionamento	14
3. Materiali e metodi	17
3.1 Petrografia	17
3.2 Analisi di immagine	17
3.3 Micro-spettroscopia Raman	19
3.4 Microscopio elettronico a scansione (SEM)	20
3.5 Microsonda elettronica.....	20
4. Risultati	22
4.1 Descrizione petrografica	22
4.2 Descrizione delle inclusioni di fuso silicatico.....	27
4.3 Composizione del fuso silicatico.....	38
5. Discussione	41
6. Conclusioni	46
Bibliografia	48
Allegati.....	50

Riassunto

Le inclusioni di fuso silicatico sono delle porzioni di magma intrappolate nei minerali durante la loro cristallizzazione. Lo studio di tali inclusioni permette di comprendere l'evoluzione del magma (dalla formazione dell'inclusione fino all'eruzione), la sua composizione e il contenuto di volatili.

Vista l'importanza del tema, il lavoro svolto è finalizzato ad analizzare le inclusioni di fuso silicatico contenute nei cristalli di quarzo delle vulcaniti del Gruppo Vulcanico Atesino (Alpi meridionali) al fine di caratterizzarle microstrutturalmente e chimicamente. Per lo studio sono state raccolte rocce appartenenti a tre diverse Formazioni (Monte Luco, Gargazzone e Ora) della medesima successione stratigrafica.

Le inclusioni di fuso silicatico, individuate con il microscopio a luce polarizzata, presentano dimensioni comprese tra 1 e 100 μm e forme diverse, da irregolari a ben definite, talvolta riproducendo la forma negativa del minerale che le ospita, il quarzo. Solitamente all'interno delle inclusioni si trova una bolla occupata dalle fasi volatili, una porzione di vetro e fasi solide che cristallizzano sia nel vetro che nelle bolle.

Le analisi di micro-spettroscopia Raman hanno permesso di determinare sia le fasi mineralogiche presenti al loro interno (actinolite, magnetite, calcite, diopside, ilmenite e apatite) che le componenti volatili preservate nelle bolle (H_2O e CO_2).

Analisi di immagine condotte sulle inclusioni hanno permesso di determinare il rapporto tra il volume delle bolle e quello delle inclusioni, rivelando che il processo di intrappolamento delle inclusioni, per le Formazioni Ora e Monte Luco, è di tipo eterogeneo. Per la Formazione Gargazzone i dati acquisiti non permettono di discriminare in modo chiaro il processo di formazione.

Si è inoltre analizzato il vetro preservato nelle inclusioni con la microsonda elettronica per quantificare gli elementi maggiori presenti nei fusi appartenenti alle diverse Formazioni. L'utilizzo del diagramma TAS (SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) ha permesso di classificare chimicamente i fusi silicatici delle diverse unità. Le inclusioni di Monte Luco e Gargazzone hanno una composizione riolitica nonostante le rocce siano daciti. Questo probabilmente è dovuto alla cristallizzazione del quarzo avvenuta dopo plagioclasio, sanidino e biotite, presenti nella roccia in maggior quantità. Il processo di cristallizzazione frazionata ha portato ad un arricchimento in SiO_2 del fuso e per questo motivo le inclusioni hanno una composizione più evoluta.

I fusi relativi alla Formazione Ora si discostano invece dalle precedenti mostrando composizioni trachitiche, pur essendo le rocce delle rioliti. Il modello geochimico effettuato dimostra che tale incongruenza risulta dalla cristallizzazione di quarzo sul bordo

della cavità delle inclusioni. Tale cristallizzazione post-intrappolamento impoverisce il fuso in SiO₂.

1. Introduzione e obiettivi del lavoro

L'attività vulcanica gioca, e ha giocato, un ruolo principale nell'evoluzione di un pianeta geologicamente attivo come la Terra. Tra i componenti volatili dei magmi, H₂O e CO₂ sono i più abbondanti. La loro essoluzione come conseguenza della risalita del magma verso la superficie impatta fortemente sulle dinamiche eruttive, influenzandone l'esplosività, con conseguenze per i cambiamenti climatici e ambientali sia a scala locale che globale nel passato geologico (Capriolo et al., 2020 e riferimenti ivi contenuti).

Le inclusioni di fuso silicatico sono uno degli strumenti più utilizzati per studiare l'evoluzione dei sistemi magmatici e vulcanici, e il loro studio è particolarmente utilizzato per quantificare il contenuto in volatili dei magmi prima dell'eruzione (Esposito et al. 2011). Si tratta di goccioline di magma intrappolate all'interno dei cristalli durante la loro formazione in presenza di un fuso silicatico (Frezzotti, 2001). Tale intrappolamento può avvenire in due modi (**Figura 1.1**; Cesare et al., 2015):

- durante il riscaldamento (**Figura 1.1, 1-Peritectic**) quando, per una reazione di fusione incongruente, si ha la formazione di minerali peritettici insieme al fuso silicatico.

Questa modalità di inclusione del fuso avviene principalmente quando si hanno temperature elevate durante il metamorfismo e quindi una volta superata la soglia T_m (temperatura di fusione). Il fuso così intrappolato presenta la stessa composizione del fuso originario. Le inclusioni intrappolate nei minerali peritettici si trovano in rocce metamorfiche come migmatiti e granuliti.

- durante il raffreddamento (**Figura 1.1, 2-Igneous**) quando i minerali cristallizzano direttamente dal magma. Questa modalità di intrappolamento è la più comune e più studiata e le inclusioni così formatesi si trovano principalmente nelle rocce magmatiche intrusive ed effusive. Il fuso così intrappolato non presenta necessariamente la stessa composizione del fuso originario ma può anche avere una composizione più evoluta.

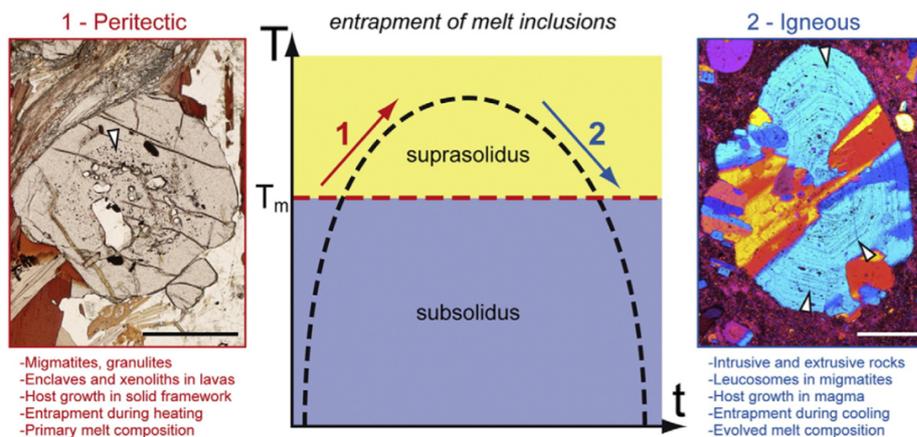


Figura 1.1: Modalità di intrappolamento delle inclusioni di fuso silicatico (riportata da Cesare et al., 2015). Il minerale a sinistra è granato, mentre quello a destra è plagioclasio. Le frecce bianche puntano verso le inclusioni di fuso silicatico.

In genere le dimensioni delle inclusioni possono andare da 1 a 100 μm (Cannatelli et al., 2016). La loro forma può variare da fortemente irregolare a ben definita. In certi casi le inclusioni possono avere anche la forma negativa del cristallo che le ospita (Cesare et al., 2015); per esempio, le inclusioni nel quarzo possono presentare una forma bipiramidale. Generalmente un'inclusione presenta una porzione di vetro, una o più bolle e dei cristalli che possono essere presenti sia nel vetro che dentro le bolle (**Figura 1.2**).

Più lenta è la velocità di raffreddamento più è probabile che il fuso nelle inclusioni si cristallizzi ma, a parità di velocità di raffreddamento, le inclusioni di dimensioni maggiori cristallizzano più velocemente di quelle più piccole (Cannatelli et al., 2016). La presenza nel fuso di elevate concentrazioni di H_2O favorisce la cristallizzazione dell'inclusione nella fase di raffreddamento (Cannatelli et al., 2016; Tacchetto et al., 2021).

A causa della diversa dilatazione termica del fuso silicatico e del minerale ospite, durante il raffreddamento e la decompressione in seguito alla risalita del magma, il fuso nelle inclusioni si contrae maggiormente rispetto al minerale ospite creando uno spazio "vuoto" che successivamente può essere occupato dalle fasi volatili (per esempio H_2O e CO_2) che si separano (Roedder, 1979; Moore et al., 2015). Per questo motivo, lo spazio vuoto è spesso chiamato "*shrinkage bubble*" (bolla di restringimento).

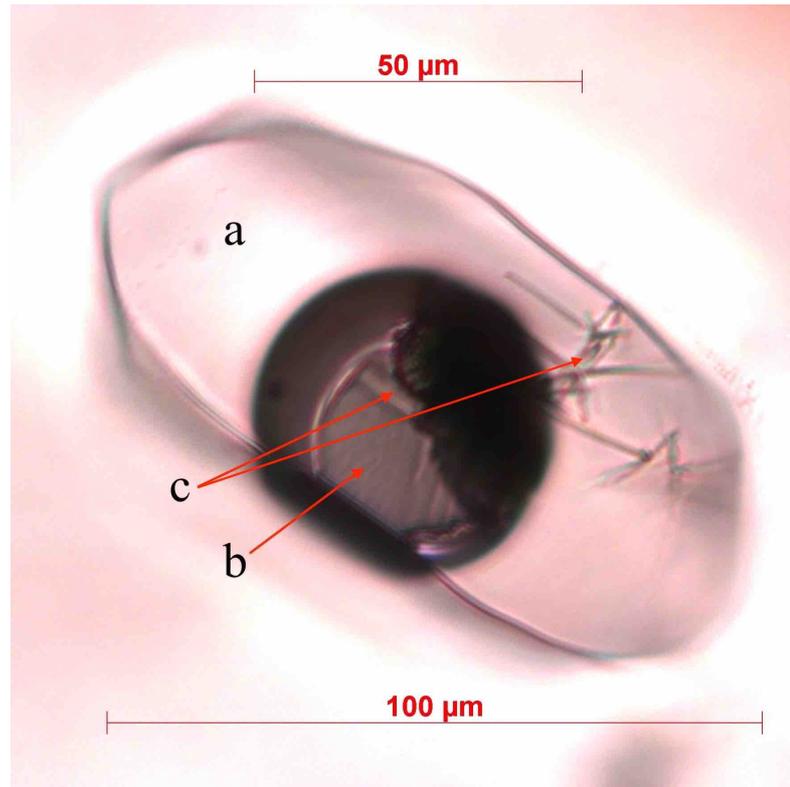


Figura 1.2: Immagine di un'inclusione di fuso silicatico in quarzo: (a) vetro, (b) bolla e (c) cristalli.

La disposizione delle inclusioni all'interno del cristallo ospite fornisce importanti informazioni sulla loro origine (Roedder, 1979). Le inclusioni intrappolate nel cristallo durante la sua crescita vengono dette primarie e possono avere una disposizione zonale, che spesso riflette la crescita concentrica del cristallo, o azonale, formando *cluster* (o raggruppamenti di inclusioni) localizzati nella parte centrale o distribuiti in modo casuale nel minerale ospite (**Figura 1.3A**).

Sono invece dette secondarie quelle inclusioni intrappolate in un momento successivo alla formazione dell'ospite. Queste sono localizzate in prossimità di fratture che hanno permesso l'infiltrazione del fluido nel cristallo (**Figura 1.3B**).

Se il fuso si infiltra all'interno delle crepe che si formano sulla superficie di un minerale durante la sua formazione, le inclusioni che ne derivano sono dette pseudosecondarie (e appaiono come in **Figura 1.3B**) in quanto sembrano secondarie ma non lo sono (Roedder, 1979; Cesare et al., 2015).

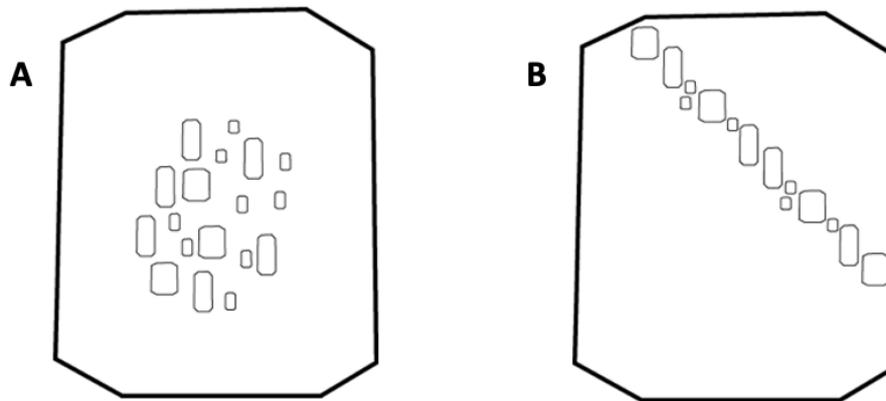


Figura 1.3: Disposizione delle inclusioni primarie (A) e secondarie (B) all'interno di un cristallo (modificato da Roedder, 1979).

Con lo studio delle inclusioni è possibile determinare la composizione del magma (fuso silicatico + componenti volatili) al momento della cristallizzazione dell'ospite e quindi le condizioni a cui questa è avvenuta. Ciò è possibile solo nel caso in cui le porzioni di magma incluso (i.e. le inclusioni di fuso silicatico) si comportino come un sistema chiuso. Per sistema chiuso si intende la condizione in cui il fuso silicatico incluso nell'ospite e quello esterno non sono più in comunicazione e l'evoluzione delle due parti è indipendente. In questo caso, lo studio delle inclusioni permette di ricostruire l'evoluzione del magma dal momento della sua formazione all'eruzione poiché le inclusioni sono in grado di registrare il contenuto volatile preruttivo che normalmente viene perso per degassamento o differenziazione magmatica (Cannatelli et al., 2016).

Invece nel caso in cui il sistema fosse aperto la composizione del fuso intrappolato sarebbe influenzata nella sua evoluzione dal magma esterno e pertanto non registrerebbe le condizioni del magma al momento della cristallizzazione dell'ospite. Inoltre, un ulteriore problema deriva dalla conseguente perdita delle componenti volatili.

Poiché le inclusioni di fuso silicatico possono registrare i contenuti dei volatili prima del degassamento, comprendere il processo di formazione delle bolle che contengono e la loro successiva evoluzione è fondamentale. Conoscere le dimensioni delle bolle in confronto con quelle delle inclusioni e osservare se un'inclusione di fuso ha più di una bolla potrà dare informazioni sul processo di intrappolamento, i.e. intrappolamento omogeneo vs eterogeneo (**Figura 1.4**, Frezzotti et al., 2001). Nel caso dell'intrappolamento omogeneo (rappresentato in **Figura 1.4A (i)** e **Figura 1.4B** con pallini neri e bianchi) le inclusioni avranno una sola bolla e il rapporto tra il volume delle bolle e delle inclusioni (V_b/V_g) sarà costante, quindi, la tendenza osservata in un diagramma che confronta V_b e V_g sarà lineare.

Questo succede perché il magma viene incorporato nel minerale come un'unica fase liquida e la separazione delle fasi (sia solide che vapore) avviene dopo l'intrappolamento. La separazione può avvenire durante il raffreddamento a seguito di un calo della pressione esterna, con possibile cristallizzazione del minerale ospite sui bordi dell'inclusione, formazione di cristalli secondari all'interno dell'inclusione stessa (PEC - *Post Entrapment Crystallization*) e/o separazione di una fase vapore con formazione di una bolla. La PEC va a modificare anche in modo significativo la composizione del fuso (vetro) rimasto all'interno dell'inclusione (Steele-MacInnis et al., 2011). L'evoluzione del fuso silicatico all'interno dell'inclusione è quindi del tutto indipendente dall'evoluzione del magma iniziale da cui si è separato in seguito all'intrappolamento nel minerale ospite. Invece, nel caso di intrappolamento eterogeneo (rappresentato in **Figura 1.4A (ii)** e **Figura 1.4B** con quadratini grigi), le inclusioni potranno avere più di una bolla e le loro dimensioni possono variare molto, di conseguenza il rapporto V_b/V_g è molto variabile, e in questo caso la distribuzione nel grafico sarà disordinata. Tale comportamento si verifica perché il magma viene intrappolato insieme ad un'altra fase fluida immiscibile che coesiste con il magma stesso (Frezzotti, 2001). Le grosse dimensioni delle bolle possono essere ulteriori evidenze di intrappolamento eterogeneo, per esempio se le bolle rappresentano più del 10 vol.% dell'inclusione probabilmente il fuso è stato intrappolato insieme ad una fase fluida (Moore et al., 2015).

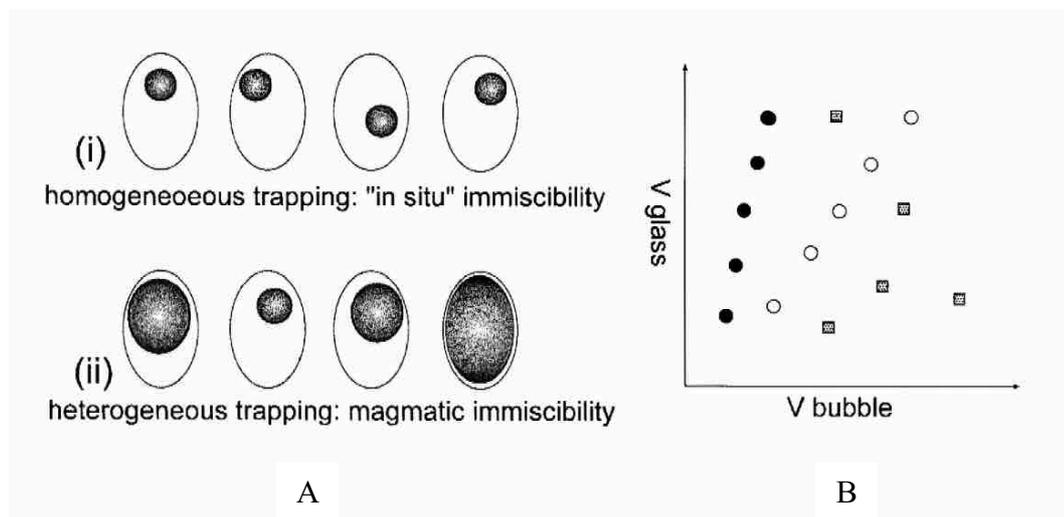


Figura 1.4: Schema illustrativo per l'intrappolamento omogeneo ed eterogeneo (tratto da Frezzotti, 2001).

(A) Inclusioni in cui l'immiscibilità è avvenuta dopo la formazione dell'inclusione - intrappolamento omogeneo (i) e in cui è avvenuta prima - intrappolamento eterogeneo (ii).

(B) Grafico raffigurante l'andamento dei rapporti tra volume dell'inclusione (V_g) e volume della bolla (V_b) in inclusioni formatesi attraverso processi di intrappolamento diversi.

Spesso l'analisi mineralogica e della composizione chimica delle inclusioni di fuso può essere difficoltosa per le piccole dimensioni che queste possono avere (Cesare et al., 2015) e per farlo, negli anni, sono state affinate numerose tecniche analitiche. Le più utilizzate sono:

- la micro-spettroscopia Raman che permette di analizzare sia le fasi fluide che solide oltre a stimare l'abbondanza delle componenti volatili presenti all'interno di un'inclusione vetrosa non esposta (Frezzotti et al., 2012). Trattasi di una tecnica non distruttiva e con una risoluzione spaziale di 1-2 μm . Più in profondità si trova l'inclusione studiata e più debole sarà il segnale Raman registrato (Cannatelli et al., 2016).
- la microsonda elettronica (EMP) che permette di stimare le concentrazioni dei vari elementi maggiori all'interno dell'inclusione. Anche questa tecnica ha un'elevata risoluzione spaziale (inferiore a 1-2 μm). Non è una tecnica distruttiva, ma poiché elementi diversi reagiscono in modo diverso al fascio incidente e alcuni tendono a migrare durante l'analisi, è necessario variare le condizioni del fascio a seconda degli elementi che si stanno analizzando (Cannatelli et al., 2016).
- il microscopio elettronico a scansione (SEM) che è utile per individuare le fasi mineralogiche e per analizzare la distribuzione degli elementi (analisi semi-quantitativa) all'interno dell'inclusione creando delle mappe composizionali. Anche in questa tecnica, come nella precedente, alcuni elementi interagendo con il raggio di elettroni possono diventare estremamente mobili (Cannatelli et al., 2016).
- la spettrometria di massa di ioni secondari (SIMS), una tecnica parzialmente distruttiva utile per determinare l'abbondanza degli elementi in traccia, il rapporto tra isotopi stabili e radioattivi e la quantità di elementi volatili presenti. Utilizza un fascio di ioni primari con diametro di 15-30 μm per scavare il campione di 2-5 μm ; raccoglie e analizza, attraverso uno spettrometro di massa, gli ioni secondari che vengono espulsi (Cannatelli et al., 2016).
- la rifusione sperimentale che permette, tramite apparati come il piston cylinder o l'heating stage, di riprodurre le condizioni di temperatura/pressione di intrappolamento e riomogenizzare l'inclusione, annullando gli effetti della PEC. Il successivo raffreddamento estremamente rapido (quenching) permette di ottenere un vetro omogeneo che può essere analizzato con SEM, EMP e SIMS.

Il lavoro svolto si è focalizzato sullo studio delle inclusioni di fuso silicatico nei cristalli di quarzo contenuti nelle vulcaniti del Gruppo Vulcanico Atesino, con particolare attenzione alle Formazioni Monte Luco, Gargazzone e Ora. I campioni di roccia sono stati raccolti nell'area tra Merano e Bolzano e dopo un'analisi petrografica dettagliata al microscopio ottico per individuare i campioni rappresentativi, le inclusioni sono state indagate tramite microscopia ottica, micro-spettroscopia Raman, microsonda elettronica (EMP) e microscopia elettronica a scansione (SEM).

Gli obiettivi di questa tesi di laurea si possono riassumere nei seguenti punti:

- identificare la presenza di inclusioni di fuso silicatico nelle rocce del Gruppo Vulcanico Atesino;
- caratterizzare in modo dettagliato le inclusioni identificando le fasi mineralogiche e le componenti volatili presenti al loro interno;
- determinare la composizione dei fusi silicatici intrappolati;
- ricostruire la storia di intrappolamento e l'evoluzione post-intrappolamento delle inclusioni di fuso silicatico.

2. Area di studio e campionamento

2.1 Inquadramento geologico

Il Gruppo Vulcanico Atesino comprende un'area di circa 2000 km² che si estende da Trento a Bolzano ed è delimitata a nord-ovest dalla Linea Periadriatica e a sud-est dalla Linea della Valsugana (**Figura 2.1**; Rottura et al., 1998). Si tratta del più importante sistema vulcanico della parte centrale e orientale delle Alpi Meridionali.

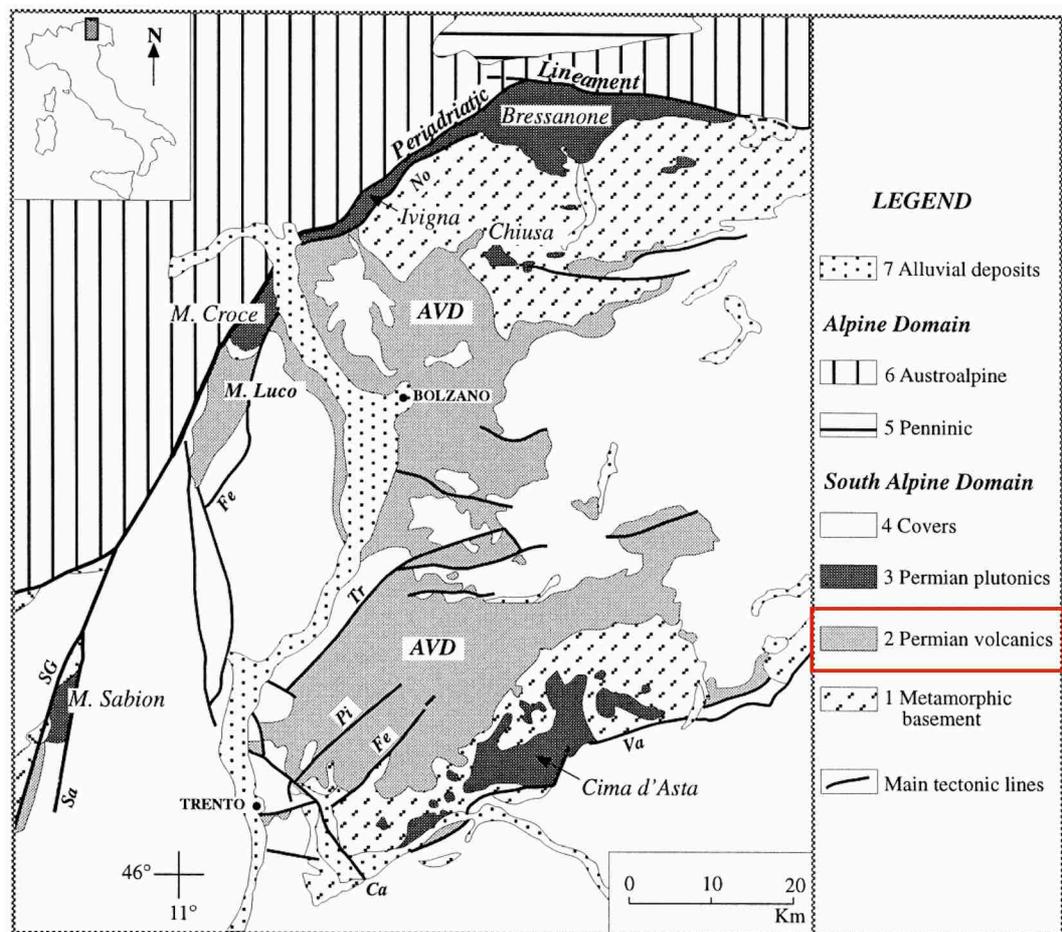


Figura 2.1: Carta geologica regionale dell'area di studio (tratto da Rottura et al., 1998). Le rocce del Gruppo Vulcanico Atesino sono evidenziate come "Permian volcanics".

Quest'area è stata interessata da frequente attività vulcanica per circa 10 milioni di anni in un contesto tettonico estensionale durante il periodo Permiano (da 285 a 274 milioni di anni fa), che ha prodotto rocce vulcaniche (soprattutto acide e con le basiche in proporzione molto minore) e plutoniche calc-alcaline per un totale di circa 2000 m di spessore per i depositi vulcanici, raggiungendo localmente anche i 4000 m (Marocchi et al., 2008).

La successione vulcanica presenta nella parte basale una sequenza riodacitica-andesitica e superiormente una sequenza riolitica. L'attività vulcanica è testimoniata dai voluminosi prodotti piroclastici che si presentano in successione intercalati da sedimenti di tipo alluvionale e lacustre che testimoniano interruzioni dell'attività eruttiva (Marocchi et al., 2008).

Da uno studio sulle composizioni dei minerali presenti nelle vulcaniti è emerso che i magmi riolitici del Gruppo Vulcanico Atesino si sono cristallizzati a temperature di circa 720°C e pressioni di 2 kbar (Ferrari, 2014).

L'area effettivamente considerata in questo studio è quella circostante le città di Merano, dove affiorano le Formazioni Monte Luco e Gargazzone, e di Bolzano, dove affiora la Formazione Ora, assieme alla zona di Passo Rolle (provincia di Trento), dove affiora la Formazione Gargazzone.

2.2 Stratigrafia del Gruppo Vulcanico Atesino

La stratigrafia del Gruppo Vulcanico Atesino è ben rappresentata nella **Figura 2.2** (Marocchi et al., 2008) e brevemente descritta di seguito.

La successione poggia sul Basamento Cristallino e inizia con il Conglomerato Basale (CGB), un conglomerato poligenico con areniti subordinate intercalate da ignimbriti riolitiche.

Segue la Formazione Monte Luco (MLC) che consiste in uno spesso strato (>1300m), formato principalmente da flussi di lave riodacitiche e grandi duomi. È il risultato di un'intensa attività vulcanica. Nella parte alta e in quella occidentale della Formazione sono presenti orizzonti singoli di lave afanitiche andesitiche.

Alla Formazione Monte Luco, nell'area a sud di Merano, segue la Formazione Sarentino (RTO), costituita da lave andesitiche. Superiormente si trovano depositi di ignimbriti riodacitiche appartenenti alla Formazione di Castel Leone (ICL). La sequenza continua con la Formazione Gargazzone (IGG), anch'essa formata da ignimbriti riodacitiche con spessore di circa 1000 m e molto estesa lateralmente.

Successivamente alla deposizione della Formazione Gargazzone è avvenuto il primo collasso della porzione sud-orientale del Gruppo Vulcanico Atesino. Contemporaneamente la parte nord-occidentale è stata interessata da fenomeni di erosione con deposizione della Formazione Verano (COV), costituita da conglomerati e areniti, e della Formazione Avelengo (AGO), con lave riodacitiche. Quest'ultima ha interessato solo alcune porzioni dell'area.

Sequenze vulcaniche e vulcanoclastiche hanno riempito lo spazio creatosi dal collasso calderico della porzione sud-orientale con deposizione delle Formazioni Nalles (NAL), Guncina (FMG), Gries (IGR), Andriano (LAN), Tregiovo (TGV), fino alla più recente Formazione Ora (ORA).

Il collasso è stato generato dall'intrusione del corpo subvulcanico riodacitico di Terlano (TRL) lungo le fratture delle rocce preesistenti. A questo è seguita una variazione compositiva delle lave che ha portato la sequenza riodacitica-andesitica a diventare riolitica.

Un secondo collasso ha interessato poi la porzione meridionale del Gruppo. Lo spazio formatosi è stato occupato dai depositi ignimbritici delle Formazioni Gries e Ora per uno spessore totale di circa 1000 m.

La Formazione Ora è costituita da uno spesso strato (fino a 1300 m) di ignimbriti riolitiche. Il volume totale stimato dei prodotti vulcanici relativi a questa Formazione è compreso tra 1200 e 1500 km³, un volume notevole se comparato con quelli delle

maggiori caldere: l'eruzione del supervulcano sotto il Lago Toba (Indonesia) ha prodotto 2800 km³ di materiale mentre l'eruzione che ha originato la Caldera della Long Valley e formato i Bishop Tuff (USA) ha prodotto 600 km³ di materiale. I prodotti più recenti della Formazione Ora chiudono l'attività del Gruppo Vulcanico Atesino sigillando le differenze topografiche delle Formazioni più antiche.

Depositi epiclastici limitati a porzioni ristrette, intercalati nelle varie Formazioni, non registrano un arresto dell'attività vulcanica generale bensì episodi localizzati di erosione contemporanei ad attività vulcaniche in altre zone (Morelli et al., 2007).

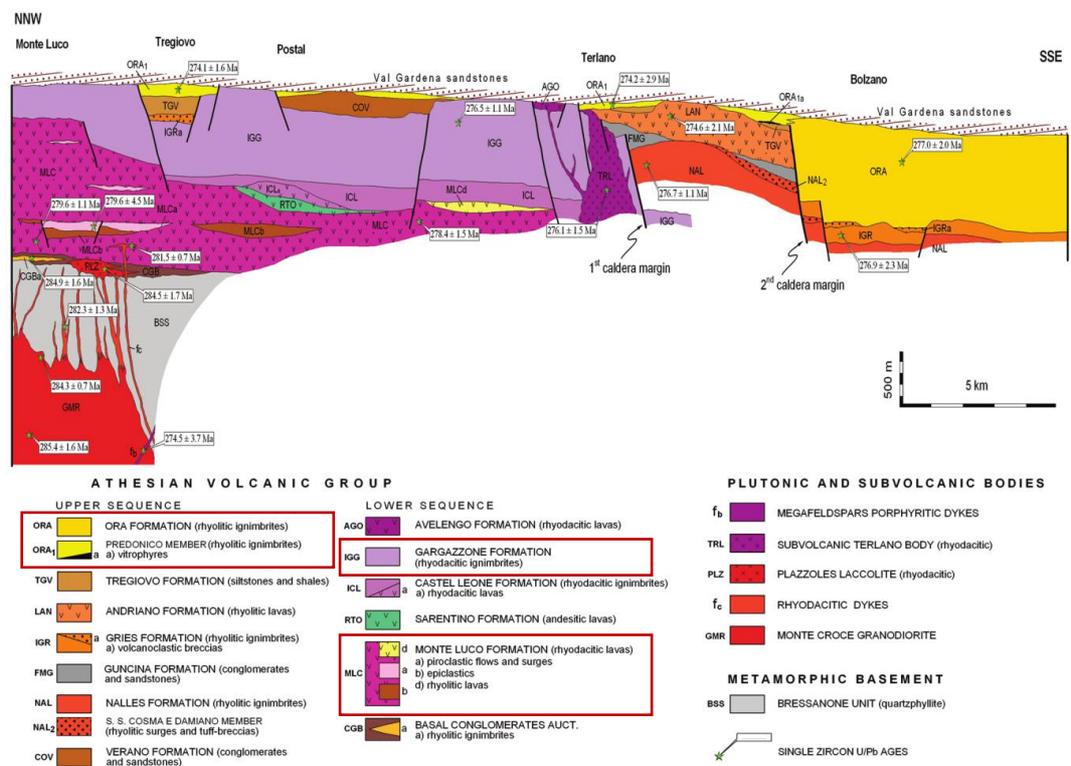


Figura 2.2: Successione stratigrafica della porzione nord-occidentale del Gruppo Vulcanico Atesino (tratta da Marocchi et al., 2008). Ciascuna Formazione è indicata con la sigla corrispondente. Le Formazioni indagate in questo lavoro sono evidenziate.

2.3 Campionamento

Per acquisire le rocce da analizzare è stato svolto un lavoro di campionamento sul campo, raccogliendo campioni da affioramenti delle varie Formazioni investigate.

Nella **Figura 2.3** sono indicati i siti di raccolta dei campioni le cui coordinate sono riportate in **Tabella 2.4**.

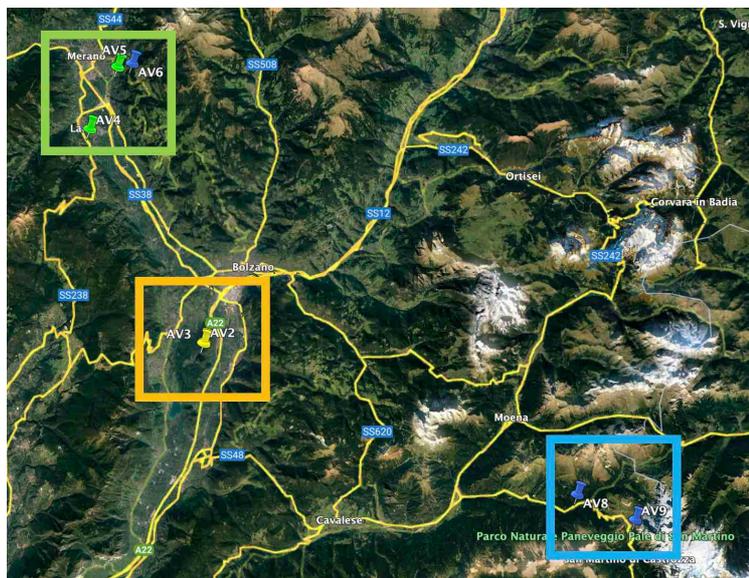


Figura 2.3: Punti di campionamento individuati con l'utilizzo di Google Earth.

Nome	Formazione	Coordinate
AV2	ORA	46°25'35.70"N - 11°17'37.90"E
AV3	ORA	46°25'32.00"N - 11°17'35.60"E
AV4	MLC	46°36'4.00"N - 11°9'16.00"E
AV5	MLC	46°39'10.60"N - 11°11'10.10"E
AV6	IGG	46°39'12.70"N - 11°12'25.00"E
AV8	IGG	46°18'17.10"N - 11°44'2.10"E
AV9	IGG	46°17'5.70"N - 11°48'3.60"E

Tabella 2.4: Tabella delle coordinate dei siti di raccolta e relative Formazioni.

Formazione Monte Luco - MLC:

Le rocce campionate affiorano tra Merano e Avelengo di Sopra e sono delle lave riodacitiche a dacitiche costituite da evidenti fenocristalli di plagioclasio (di colore rossastro, fortemente alterato), e in minor proporzioni di quarzo e minerali femici su una pasta di fondo a grana molto fine (**Figura 2.5**). Nell'affioramento visitato non si vedono strutture di flusso.



Figura 2.5: Affioramento della Formazione Monte Luco.

Formazione Gargazzone - IGG:

Le rocce appartenenti a questa unità sono ignimbriti dacitiche e gli affioramenti da cui sono stati raccolti i campioni si trovano nella località di Santa Caterina e nella zona di Passo Rolle. Queste rocce contengono fenocristalli di plagioclasio, K-feldspato e un po' di quarzo immersi in una massa di fondo a grana fine di colore rossastro (**Figura 2.6**). Sono stati individuati degli inclusi juvenili porfirici arrotondati, mentre le strutture di flusso sono poco visibili.



Figura 2.6: Affioramento della Formazione Gargazzone.

Formazione Ora - ORA:

Questa Formazione è costituita da ignimbriti riolitiche. Campioni di questa unità sono stati raccolti nella zona di Bolzano, sul Lago di Monticolo.

La roccia contiene abbondanti fenocristalli di quarzo, ma anche di plagioclasio, K-feldspato e in minor proporzione biotite, in una massa di fondo a grana molto fine (**Figura 2.7**). Si nota la presenza di inclusi juvenili porfirici che hanno forma schiacciata e definiscono strutture di flusso (fiamme).



Figura 2.7: Affioramento della Formazione Ora.

3. Materiali e metodi

3.1 Petrografia

Per poter analizzare le inclusioni di fuso è stato necessario produrre, a partire dalle rocce campionate, delle sezioni sottili con spessore pari a 30 μm da osservare con il microscopio a luce polarizzata. L'analisi petrografica ha permesso di identificare i campioni, con inclusioni di fuso silicatico nel quarzo, in tre unità stratigrafiche del Gruppo Vulcanico Atesino: Monte Luco, Gargazzone e Ora. Sono state investigate in totale 12 sezioni: 4 per la Formazione Monte Luco, 5 per la Formazione Gargazzone e 3 per la Formazione Ora.

3.2 Analisi di immagine

Per ottenere le dimensioni delle inclusioni e delle loro bolle è stata eseguita un'analisi di immagine utilizzando il software *Reconstruct v1.1.0.0, 2007* partendo da foto scattate in precedenza. Per ciascuna immagine importata è stato necessario trasferire nel software la scala di riferimento per poi procedere tracciando il perimetro delle bolle e delle inclusioni mediante lo strumento 'traccia', ottenendo così sia l'area delle tracce disegnate che il diametro degli oggetti di studio.

Le bolle nelle inclusioni di fuso presentano una forma riconducibile a una sfera quindi, a partire dall'area calcolata dal software, è stato possibile ricavare il raggio e il volume ($V_b = 4/3 * \pi * r^3$). L'inclusione invece è considerata di forma riconducibile a un ellissoide, quindi, sono stati tracciati l'asse maggiore (a) e minore (b) di ciascuna inclusione i cui valori sono stati utilizzati per calcolarne il volume, considerando la terza dimensione pari all'asse minore misurato ($V_g = 4/3 * \pi * (a/2) * (b/2)^2$).

Rapportando i volumi delle bolle con quelli delle inclusioni si è potuto poi costruire dei grafici che descrivono le loro tendenze per ciascuna Formazione. I dati ottenuti sono riportati nella **Tabella 3.1**.

		r	V _b	a	b	V _g	V _b /V _g %			
MLC	AV4B	MI1	3,71	214,71	13,14	13,01	1165	18,4		
		AV4C	MI1	3,53	184,13	12,33	11,12	798	23,1	
			MI2	6,12	959,22	22,87	21,19	5377	17,8	
	AV5A	MI3	5,91	862,66	21,6	18,83	4010	21,5		
		MI1	11,93	7116,43	51,8	38,62	40453	17,6		
		MI2	4,33	339,53	16,95	15,75	2202	15,4		
		MI3	8,71	2768,83	49,78	37,87	37380	7,4		
		MI4	5,58	729,02	20,18	17,64	3288	22,2		
		MI1	5,02	528,51	17,3	16,81	2560	20,6		
	AV5C	MI2	3,45	171,85	13,02	12,11	1000	17,2		
		MI3	6,46	1130,74	21,35	20,02	4480	25,2		
		MI4	7,06	1475,03	28,08	24,2	8610	17,1		
		MI5	7,18	1549,94	27,62	25,19	9177	16,9		
		MI6	5,51	698,86	20,67	16,03	2781	25,1		
		IGG	AV6B	MI1	4,56	396,49	26,62	25,23	8872	4,5
	AV6C			MI1	5,27	614,55	31,36	30,71	15486	4,0
				MI2	4,08	283,79	37,22	34,6	23331	1,2
	AV8A		MI3	6,01	907,81	42,64	38,06	32341	2,8	
MI4			6,84	1338,40	53,07	46,11	59080	2,3		
MI5			4,05	278,42	20,17	19,47	4003	7,0		
MI6			5,52	702,82	30,92	30,23	14795	4,8		
MI1			3,55	188,10	12,94	11,8	943	19,9		
MI2			5,57	724,22	20,55	18,52	3691	19,6		
AV8B	MI3		4,90	494,09	16,74	15,38	2073	23,8		
	MI4		6,92	1388,75	28,36	24,47	8891	15,6		
	MI1		3,53	184,13	13,02	11,86	959	19,2		
ORA	AV9A		MI1	8,30	2392,37	37,54	30,54	18333	13,0	
			AV2A	MI1	7,85	2022,46	29,83	27,57	11872	17,0
	MI2			8,39	2472,63	32	28,39	13505	18,3	
	MI3			3,99	266,52	12,56	11,76	910	29,3	
	MI4			3,30	149,93	14,07	11,13	913	16,4	
	MI5			7,79	1979,15	46,84	42,46	44216	4,5	
	MI6	2,25		47,51	7,76	7,32	218	21,8		
	MI7	4,74		444,73	15,57	15,36	1923	23,1		
	MI8	11,47		6319,05	41,61	41,15	36892	17,1		
	MI9	5,76		798,99	26,38	21,1	6149	13,0		
	MI10	6,93		1393,88	23,69	23,23	6694	20,8		
	MI11	14,30		12237,04	50,3	48,4	61696	19,8		
	MI12	12,01	7251,69	45,33	44,33	46642	15,5			
	MI13	11,73	6756,08	41,74	41,29	37260	18,1			
	MI14	9,30	3370,28	30,4	27,05	11647	28,9			
	MI15	8,87	2924,26	26,2	23,74	7731	37,8			
	AV2B	MI1	10,47	4813,17	40,7	37,25	29570	16,3		
		MI2	12,78	8748,50	43,59	42,34	40915	21,4		
MI3		16,07	17380,56	54,12	51,64	75566	23,0			
MI4		22,20	45821,21	95,52	79,13	313166	14,6			
MI5		22,46	47443,14	117,6	53,51	176310	26,9			
MI6		10,35	4645,73	35,21	35,14	22765	20,4			
MI7		10,94	5491,39	39,9	35,41	26195	21,0			
MI8		9,52	3617,45	36,74	31,34	18895	19,1			
MI9		6,27	1030,81	20,39	18,5	3654	28,2			
MI10		8,14	2256,62	31,62	26,11	11287	20,0			
AV3A	MI1	16,13	17581,81	66,68	56,75	112441	15,6			

Tabella 3.1: Dati relativi all'analisi di immagine sulle inclusioni. **r** è il raggio della bolla, **V_b** il suo volume, **a** è l'asse maggiore, **b** l'asse minore e **V_g** il volume dell'inclusione.

3.3 Micro-spettroscopia Raman

La micro-spettroscopia Raman è una tecnica non distruttiva che si basa su un fascio di luce monocromatica, un laser, che, dopo aver colpito un campione, si disperde e viene raccolto (con angoli di 90° e 180°) e analizzato da un detector. La micro-spettroscopia Raman è utilizzata nello studio delle inclusioni di fuso per identificare le fasi mineralogiche presenti al loro interno oltre alle componenti fluide e volatili trovate sia nel fuso che nelle bolle. I dati ottenuti usando questa tecnica sono estremamente accurati in quanto la risoluzione spaziale è di 1 μm . Per avere una miglior precisione è preferibile analizzare le inclusioni che si trovano vicino alla superficie della sezione (Cannatelli et al., 2016; Frezzotti et al., 2011).

Ogni punto analizzato restituisce un intero spettro che è possibile confrontare con quelli di diversi minerali per riconoscere la fase corrispondente. Per fare questo è necessario avvalersi di librerie Raman online e non; quelle consultate sono state *Handbook of Raman Spectra for Geology* (www.geologie-lyon.fr/Raman/search_panel.php?refer=index.php) del *Laboratoire de géologie de Lyon*, quella del *RRUFF Project* (<https://rruff.info/>) e il database riportato da Frezzotti et al. (2011).

Per l'analisi degli spettri Raman sono stati usati i software *CrystalSleuth* e *LabSpec v5.41.15* che hanno permesso l'analisi dettagliata di ciascun picco e un miglior confronto dato dalla possibilità di sovrapporre lo spettro ottenuto con quelli dei diversi minerali dei database Raman.

Lo strumento utilizzato per le analisi è un *WITec confocal Raman alpha 300 R*, specificamente con il laser di lunghezza d'onda 532 nm (verde), disponibile presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova. Accoppiato al Raman, un microscopio petrografico Zeiss con un obiettivo di 50x e 100x sono stati utilizzati per localizzare le inclusioni da analizzare. Gli spettri ottenuti variano da 100 a 4000 cm^{-1} e le condizioni analitiche da 30 a 60 secondi di integrazioni, e da tre a cinque accumulazioni, con una risoluzione spettrale di 10 cm^{-1} .

Per le analisi di micro-spettroscopia Raman sono state utilizzate sezioni petrografiche lucide con spessore di 100 μm .

3.4 Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione (o SEM) è stato utile per un'analisi qualitativa dei campioni. La tecnica prevede l'utilizzo di un fascio di elettroni che viene concentrato sul campione e poi ricatturato da un rivelatore in condizioni di vuoto spinto. Questo manda un impulso a un monitor il quale procede con una seconda scansione e restituisce un'immagine priva di colori dell'area. Per le analisi chimiche è stato usato un rivelatore a dispersione di energia (energy dispersive X-ray spectroscopy - EDS) che sfrutta i raggi X emessi da un fascio di elettroni accelerato. Questi colpiscono il campione in modo estremamente preciso restituendo uno spettro che evidenzia i componenti più abbondanti (https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_elettronico_a_scansione; https://it.wikipedia.org/wiki/Spettroscopia_EDX). Le analisi sono state fatte al Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova utilizzando un FEG (field emission gun) - FIB (focused ion beam) - SEM Tescan, modello Solaris. Le condizioni analitiche per l'acquisizione delle immagini sono state una tensione di accelerazione tra 10 e 15 KeV, una corrente del fascio da 1 a 3 nA e una distanza di lavoro di 5 mm.

3.5 Microsonda elettronica

La microsonda elettronica è una tecnica analitica utile perché in grado di determinare la composizione chimica dei campioni senza distruggerli. Agisce in maniera analoga a quanto precedentemente descritto per il microscopio elettronico a scansione (https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Microsonda_elettronica&oldid=120296529). Però, diversamente dal SEM, con la microsonda è possibile fare non solo delle analisi composizionali qualitative (EDS), ma anche delle analisi quantitative (wavelength dispersive X-ray spectroscopy - WDS).

Per analizzare la composizione del fuso silicatico nelle inclusioni e dei minerali (biotite, K-feldspato e plagioclasio - in allegato come **Tabella supplementare 1** e **Tabella supplementare 2**) presenti nelle rocce studiate è stata utilizzata la microsonda JEOL JXA 8200 Superprobe del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano usando una tensione di accelerazione pari a 15 kV, corrente di fascio di 5nA, tempo di analisi di 10s per il campione e 5s per il background e un diametro del fascio di 1 μ m.

I valori restituiti rappresentano le quantità relative a ciascun elemento, rilevate come elementi e poi convertite in ossidi: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, MnO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅.

Nel caso delle inclusioni di fuso silicatico, una correzione ulteriore dei dati ottenuti è stata fatta perché gli alcali possono essere persi durante le analisi con l'eccitazione del fascio elettronico. I fattori di correzione ricavati con l'utilizzo di appositi standard sono i seguenti: 0,99 per SiO₂, 0,98 per Al₂O₃, 1,07 per CaO, 1,32 per Na₂O e 1,04 per K₂O. I dati sono stati poi normalizzati a 100% per la realizzazione di diagrammi comparativi; questo passaggio permette il confronto dei fusi con diversi contenuti di volatili. La chiusura delle analisi dei fusi silicatici fatti con la microsonda può essere utilizzata come un'approssimazione al contenuto di elementi volatili che non vengono misurati (per esempio H₂O, CO₂). Tale stima viene chiamata "volatile per differenza" (*volatiles by difference*).

Le analisi mediante microsonda elettronica hanno permesso di classificare chimicamente i fusi silicatici delle diverse unità e confrontarli tra loro.

Nella **Tabella 3.2** sono presentati i dati delle inclusioni di fuso silicatico analizzate dopo aver applicato il fattore di correzione.

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Tot	Volatile per differenza		
MIC	AV4C	MI1	70,67	0,09	12,81	1,01	0,01	0,00	0,42	4,40	5,51	0,00	95,01	4,99	
	AV4C	MI1	72,29	0,08	15,18	0,26	0,02	0,04	0,92	4,61	7,20	0,02	100,67	anidra	
		MI2	72,25	0,06	15,34	0,15	0,06	0,06	1,22	4,46	7,17	0,04	100,92	anidra	
IGG	AV9A	MI1	71,89	0,00	15,33	0,28	0,00	0,00	0,72	4,59	7,13	0,01	100,07	anidra	
		MI2	73,26	0,00	14,56	0,23	0,00	0,04	0,38	5,12	7,05	0,00	100,78	anidra	
		MI3	72,95	0,02	14,82	0,19	0,00	0,02	0,41	4,65	7,14	0,01	100,30	anidra	
	AV9B	MI4	72,61	0,00	14,67	0,24	0,00	0,02	0,43	5,11	7,12	0,04	100,33	anidra	
		MI5	71,04	0,09	15,46	0,08	0,00	0,06	0,96	4,95	7,29	0,00	99,98	0,02	
		MI1	72,26	0,13	15,03	0,22	0,00	0,08	0,68	5,19	7,25	0,02	100,99	anidra	
	AV9A	MI2	71,96	0,01	15,36	0,49	0,00	0,01	0,87	4,30	7,17	0,04	100,32	anidra	
		MI3	70,24	0,01	15,25	0,53	0,00	0,04	1,09	4,45	7,16	0,00	98,91	1,09	
		MI4	71,57	0,01	15,10	0,45	0,02	0,05	0,98	4,91	7,13	0,00	100,33	anidra	
	AV8A	MI1	70,99	0,03	15,20	0,32	0,00	0,06	0,94	4,24	7,25	0,08	99,19	0,81	
		MI2	71,40	0,07	15,25	0,39	0,00	0,06	0,95	4,25	7,26	0,02	99,77	0,23	
		MI3	73,93	0,03	14,42	0,21	0,00	0,00	0,40	4,45	7,02	0,00	100,56	anidra	
	ORA	AV2B	MI1	72,51	0,09	15,29	0,38	0,01	0,10	0,92	4,13	6,87	0,03	100,43	anidra
			MI2	71,31	0,02	15,00	0,36	0,01	0,06	1,03	4,05	7,00	0,00	98,90	1,10
			MI1	74,10	0,00	13,54	0,15	0,00	0,01	0,68	4,65	5,30	0,00	98,53	1,47
AV3B		MI2	68,54	0,00	18,28	0,63	0,00	0,00	0,78	5,74	6,72	0,00	100,81	anidra	
		MI3	67,59	0,00	17,61	0,21	0,06	0,02	0,61	5,79	7,09	0,02	99,14	0,86	
		MI4	67,90	0,00	17,70	0,17	0,00	0,08	0,59	5,41	7,21	0,05	99,26	0,74	
AV2A		MI1	68,66	0,07	17,41	0,55	0,02	0,04	0,89	5,41	7,03	0,05	100,19	anidra	
		MI2	67,57	0,08	17,10	0,24	0,00	0,03	0,96	5,67	6,65	0,03	98,45	1,55	
		MI3	68,13	0,06	16,67	0,24	0,04	0,09	0,95	5,21	6,38	0,02	97,90	2,10	
		MI4	69,60	0,05	17,08	0,17	0,02	0,00	0,72	5,04	7,19	0,04	99,97	0,03	
		MI5	69,61	0,03	17,12	0,22	0,01	0,03	0,69	5,15	7,09	0,02	100,08	anidra	
		MI6	70,24	0,07	17,24	0,19	0,02	0,02	0,77	4,72	7,16	0,00	100,53	anidra	
	MI7	67,27	0,03	17,03	0,31	0,00	0,09	0,81	5,49	6,70	0,03	97,83	2,17		
AV3A	MI1	70,17	0,00	17,02	0,43	0,02	0,07	0,50	4,87	6,77	0,00	99,92	0,08		
	MI2	69,55	0,00	17,03	0,41	0,00	0,05	0,51	5,05	6,87	0,02	99,60	0,40		
	MI3	69,15	0,02	16,99	0,48	0,00	0,10	0,57	5,13	6,96	0,00	99,53	0,47		
	MI4	69,33	0,09	17,69	0,30	0,00	0,06	0,90	5,12	6,51	0,06	100,17	anidra		
	MI5	68,41	0,13	17,61	0,24	0,00	0,03	0,92	5,13	6,55	0,05	99,22	0,78		
	MI6	68,08	0,01	17,69	0,62	0,05	0,05	0,86	5,09	7,08	0,01	99,66	0,34		
	MI7	67,94	0,01	17,82	1,48	0,09	0,08	0,92	3,95	7,59	0,01	100,04	anidra		

Tabella 3.2: Dati relativi all'analisi di microsonda elettronica delle inclusioni. L'ultima colonna indica la quantità di volatili presenti in ciascuna inclusionione calcolata sottraendo a 100 il totale.

4. Risultati

4.1 Descrizione petrografica

Formazione Monte Luco

La roccia studiata presenta cristalli di plagioclasio, biotite, un po' di quarzo e minime quantità di K-feldspato. La tessitura è porfirica, caratterizzata dalla presenza di abbondanti fenocristalli eudrali di plagioclasio immersi in una pasta di fondo ipocristallina a grana molto fine (**Figura 4.1**). Il minerale più abbondante è il plagioclasio facilmente riconoscibile perché è incolore, di abito tabulare, rilievo basso e spesso geminato polisinteticamente. Il plagioclasio presenta anche delle alterazioni in sericite e tracce di ossidazione di colore rossastro. Sono presenti in abbondante quantità anche pseudomorfi di biotite, totalmente o parzialmente sostituiti da clorite (minerale con pleocroismo sulle tonalità del verde, con birifrangenza anomala) e minerali opachi (**Figura 4.2**). I cristalli di quarzo, anch'essi incolore e con rilievo basso, presentano forme sia subedrali che anedrali con profonde anse di corrosione. All'interno dei cristalli di quarzo si riconoscono molte inclusioni di fuso silicatico, presenti sia come inclusioni singole che come piccoli raggruppamenti di inclusioni (*cluster*). I minerali accessori (<5%) osservati sono zirconi, riconoscibili per l'alta birifrangenza e apatite, incolore, di alto rilievo e bassa birifrangenza. Le caratteristiche tessiturali osservate suggeriscono una sequenza di cristallizzazione iniziata dal plagioclasio, a seguire biotite e quarzo.

In affioramento non sono state osservate chiare evidenze di flusso, tuttavia, in sezione sottile si osserva la presenza di fiamme (**Figura 4.3**) che sono strutture allungate che marcano la direzione del flusso piroclastico.

La roccia è classificata come una ignimbrite dacitica.

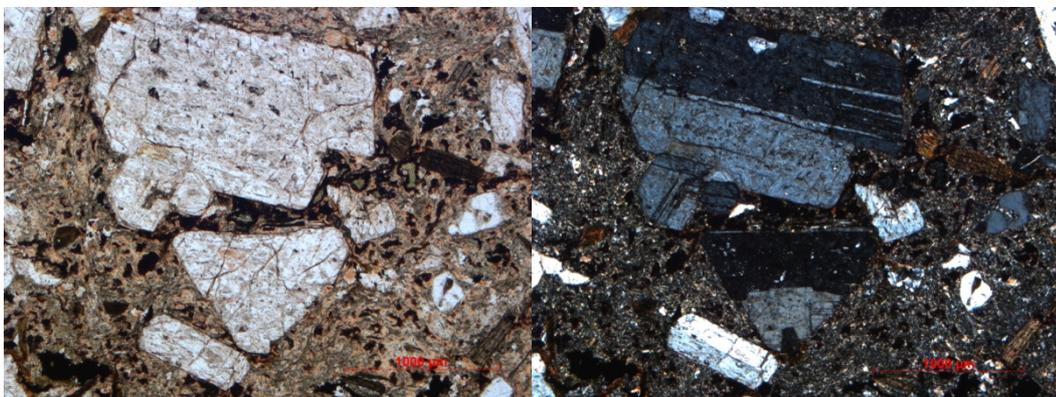


Figura 4.1: Microfoto di una sezione sottile rappresentativa della Formazione Monte Luco a nicoli paralleli (SX) e incrociati (DX). Sono presenti numerosi cristalli di plagioclasio geminato.

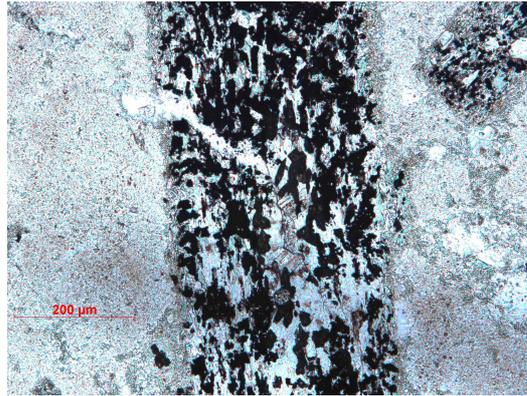


Figura 4.2: Microfoto raffigurante un polimorfo di biotite parzialmente sostituito da cristalli di clorite (verdi) e minerali opachi.

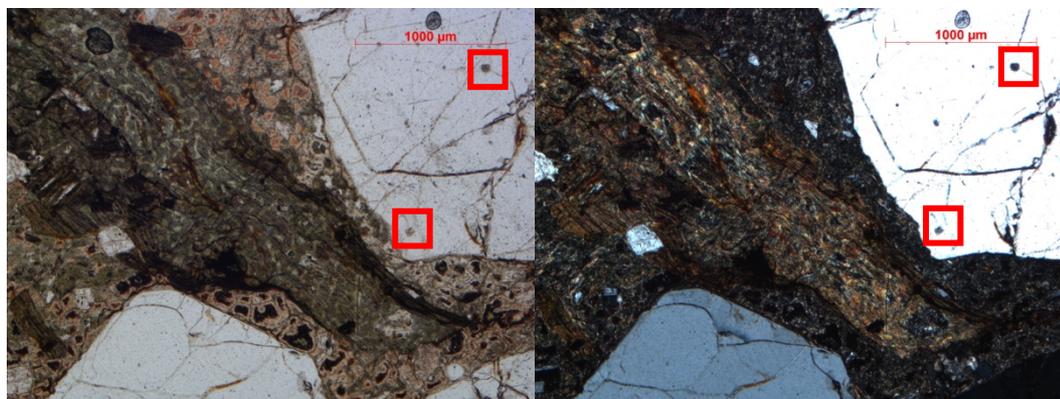


Figura 4.3: Microfoto che mostra una fiamma tra due cristalli di quarzo fotografata a nicol paralleli (SX) e incrociati (DX). Le inclusioni di fuso silicatico presenti all'interno del quarzo sono evidenziate con quadrati rossi.

Formazione Gargazzone

La roccia studiata presenta dei fenocristalli di plagioclasio, quarzo, biotite e sanidino immersi in una matrice ipocristallina con chiare evidenze di devetrificazione e strutture di flusso. La roccia appare alterata. Anche in questo caso la tessitura è porfirica con fenocristalli, soprattutto euedrali di plagioclasio e anedrali di quarzo, immersi in una pasta di fondo di vetro vulcanico devetrificato (**Figura 4.4**). Il plagioclasio ($Or_{0-1}Ab_{98-99}An_{0-1}$) è geminato polisinteticamente e presenta frequente saussuritizzazione. Tale alterazione è caratterizzata dalla presenza di minerali ad alta birifrangenza (sericite e carbonati, in particolare calcite) al suo interno. Il quarzo ha una forma perlopiù anedrale, presenta anse di corrosione e contiene varie inclusioni di fuso (**Figura 4.4**). Numerosi sono i cristalli di biotite (X_{Mg} ($Mg/Mg+Fe$) 0,38, TiO_2 4,94 wt.%), un fillosilicato di colore marrone pleocroico e rilievo medio. Il K-feldspato presente è il sanidino, polimorfo stabile ad alta temperatura; presenta rilievo basso, frequente geminazione Carlsbad e tracce di ossidazione.

In questa roccia sono presenti delle microstrutture sferulitiche (**Figura 4.5**) che sono evidenze chiare della devettrificazione del vetro nella pasta di fondo.

La sequenza di cristallizzazione vede per prima la formazione di plagioclasio e successivamente quella di biotite, sanidino e quarzo.

La roccia è classificata come una ignimbrite dacitica.

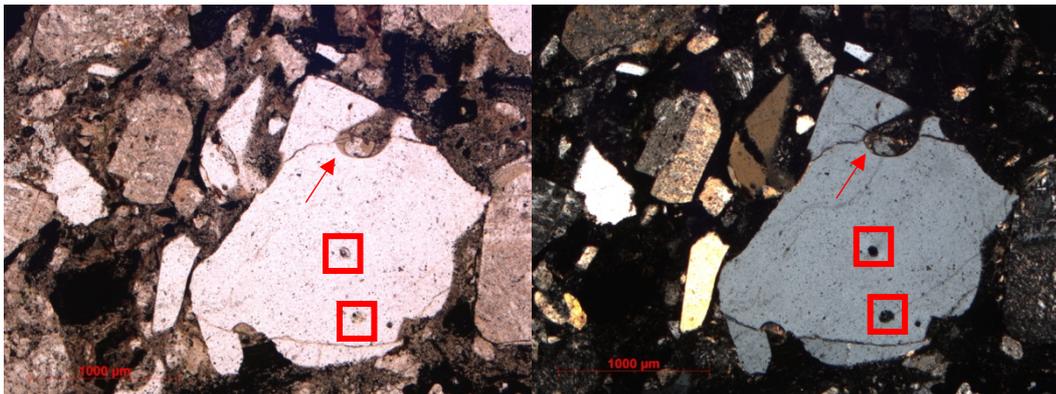


Figura 4.4: Microfoto a nicol paralleli (SX) e incrociati (DX) di una sezione sottile relativa alla Formazione Gargazzone che presenta plagioclasio e un grande cristallo di quarzo anedrale con anse di corrosione (freccia rossa) e delle inclusioni di fuso silicatico (dentro ai quadrati rossi).

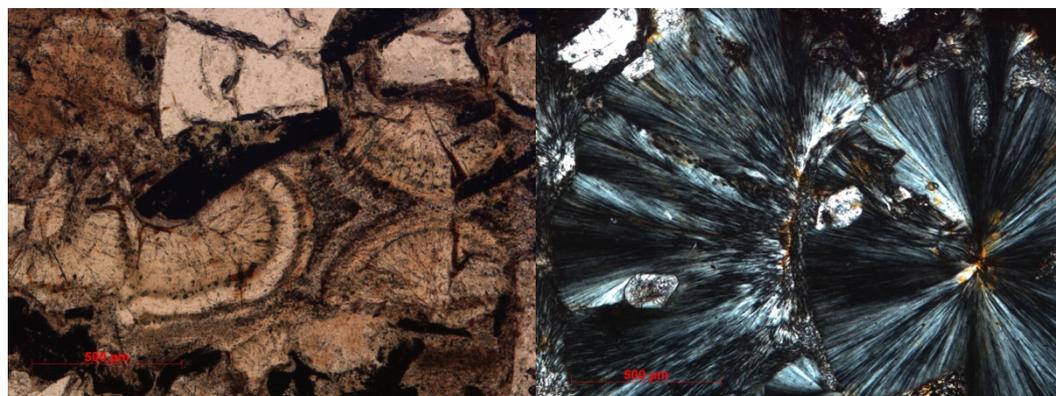


Figura 4.5: Microfoto di una microstruttura sferulitica a nicol paralleli (SX) e incrociati (DX).

Formazione Ora

La roccia in esame ha una tessitura porfirica con una pasta di fondo ipocristallina e contiene evidenti strutture di flusso. I minerali presenti sono quarzo, sanidino, biotite e plagioclasio (**Figura 4.6**). Apatite e zirconio sono le fasi accessorie. Diversamente dalle rocce precedenti, il fenocristallo più abbondante è il quarzo, spesso anedrale, con anse di corrosione e numerose inclusioni di fuso al suo interno. Il K-feldspato è sanidino ($Or_{64-90}Ab_{9-34}An_{0-1}$) e presenta abito tabulare, forma subedrale, mostra in superficie tracce di ossidazione e non appare geminato; è presente in quantità maggiori rispetto alla Formazione Gargazzone. Sono presenti cristalli di biotite (XMg 0,39, TiO₂ 3,44 wt.%) che

possono presentare estinzione ondulata (**Figura 4.7**), definendo delle strutture di flusso, e un bordo di reazione evidenziato dalla presenza di abbondanti minerali opachi. Cristalli di zirconi, con birifrangenza molto alta, e apatiti possono essere presenti come inclusioni nella biotite, come si evince dall'immagine in **Figura 4.8**, ottenuta da analisi al SEM. Il dettaglio di uno zircone incluso in tale biotite è riportato in **Figura 4.9**; si noti l'abbondante presenza di inclusioni al suo interno.

Il plagioclasio è presente in quantità più ridotte rispetto alle rocce delle due Formazioni precedenti ed è molto alterato. Come si osserva nella sua composizione, calcolata da analisi di microsonda elettronica ($Or_{0.4}Ab_{99}An_{0.6}$), il plagioclasio presente è fortemente arricchito in albite; questo è dato dalla forte alterazione che impoverisce la composizione totale in Ca^{2+} e la arricchisce in Na^{+} .

Il primo minerale a cristallizzare è stato il quarzo, a seguire la biotite, il sanidino e, quasi contemporaneamente, il plagioclasio.

La roccia è classificata come un'ignimbrite riolitica.

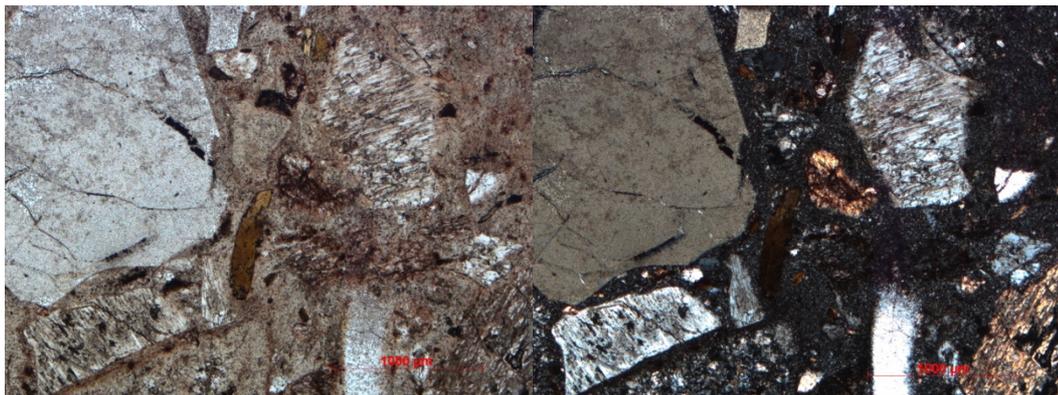


Figura 4.6: Microfoto di una porzione di sezione sottile rappresentativa della Formazione Ora con cristalli di sanidino, biotite e un grande quarzo. Nicol paralleli e incrociati, rispettivamente.

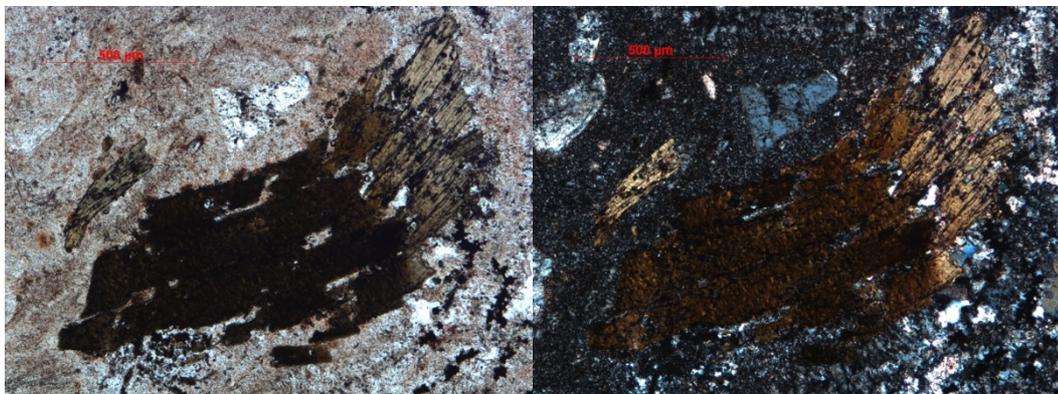


Figura 4.7: Microfoto che mostra una biotite, deformata dal flusso, visibile a nicol paralleli (SX) e incrociati (DX).

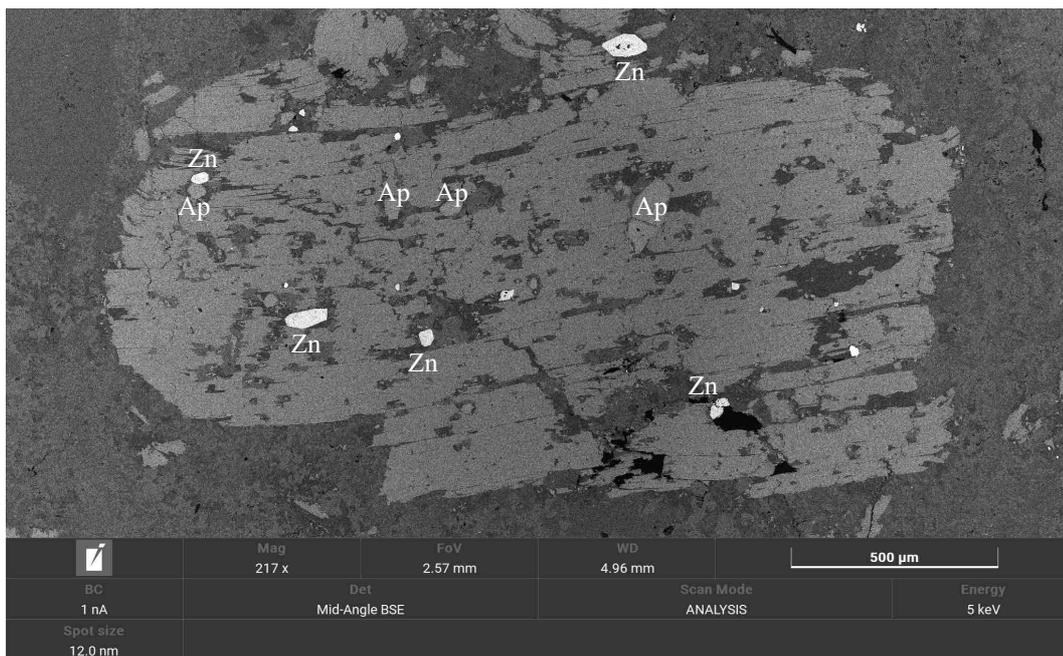


Figura 4.8: Immagine BSE di una biotite, ottenuta tramite SEM, in cui sono evidenti zirconi e apatiti. Gli zirconi (evidenziati nell'immagine con Zn) appaiono piú chiari in quanto presentano elementi di peso atomico maggiore rispetto alla biotite e ai cristalli di apatite (Ap), che hanno una tonalitá di grigio piú scura.

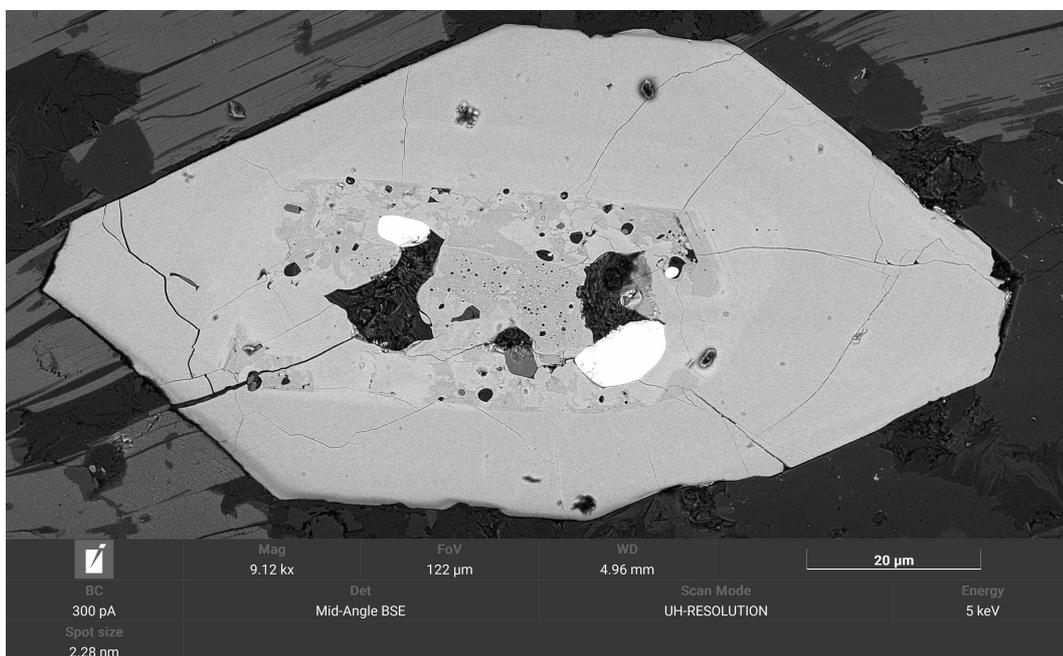


Figura 4.9: Immagine BSE di uno zirconio ottenuta tramite SEM.

4.2 Descrizione delle inclusioni di fuso silicatico

Prima di procedere con le analisi è stato necessario individuare le inclusioni di fuso silicatico all'interno dei cristalli di quarzo utilizzando il microscopio ottico. Le inclusioni intrappolate nel quarzo presentano dimensioni da 1 a 100 μm e forme variabili, da rotondeggianti a bipiramidali (forma negativa del cristallo ospite). In **Figura 4.10** sono riportate le forme più comunemente incontrate durante lo studio.

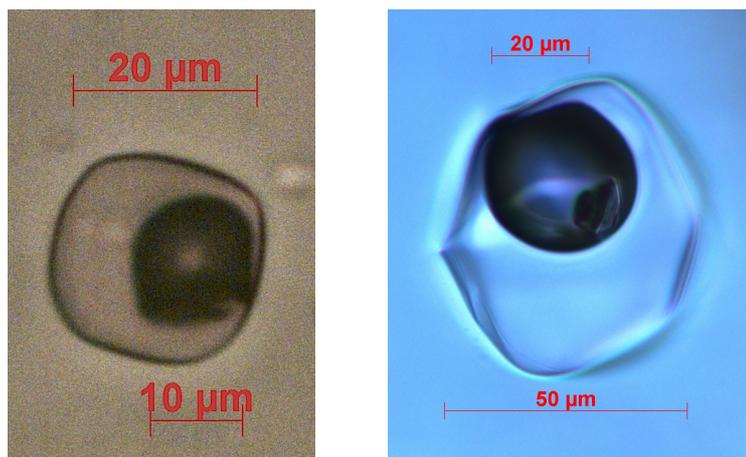


Figura 4.10: Microfoto che mostra le diverse forme di inclusioni trovate: inclusione rotondeggiante a sinistra e bipiramidale a destra.

Le inclusioni sono incolore a nicoli paralleli ma sono isotrope a nicoli incrociati pertanto il loro riconoscimento all'interno del quarzo è facilitato da questa proprietà. Le inclusioni presentano una porzione di vetro, una bolla e dei cristalli che possono essere sia nel vetro che all'interno delle bolle stesse. Le bolle sono scure a nicoli paralleli, anche se a nicoli incrociati spesso contengono cristalli birifrangenti. Date le ridotte dimensioni ($<5\mu\text{m}$), i singoli cristalli non possono essere riconosciuti attraverso la microscopia ottica, ma richiedono analisi più dettagliate per determinarne la natura.

Nelle immagini successive sono riportate 3 inclusioni per ciascuna Formazione: quelle appartenenti alla Formazione Monte Luco in **Figura 4.11**, alla Formazione Gargazzone in **Figura 4.12** e alla Formazione Ora in **Figura 4.13**.

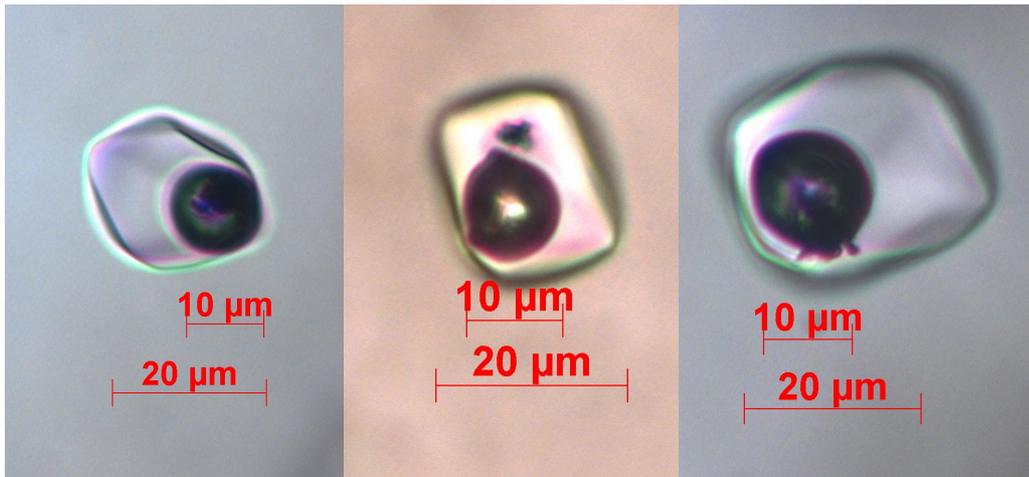


Figura 4.11: Microfoto con le inclusioni di fuso silicatico nel quarzo rappresentative della Formazione Monte Luco. In tutte le inclusioni si può notare la presenza di cristalli all'interno delle bolle, in quella centrale questi sono visibili anche nel fuso.

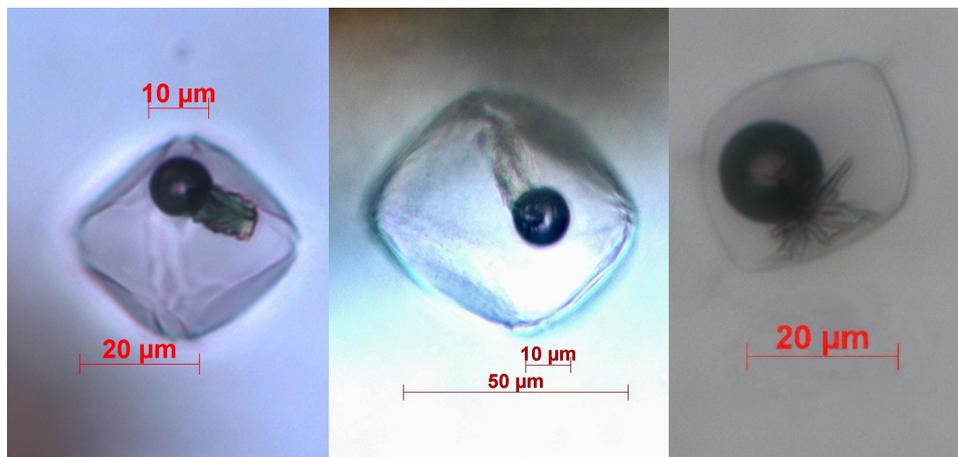


Figura 4.12: Microfoto che mostrano le inclusioni di fuso silicatico nel quarzo rappresentative della Formazione Gargazzone. Le tre inclusioni presentano cristalli nel fuso.

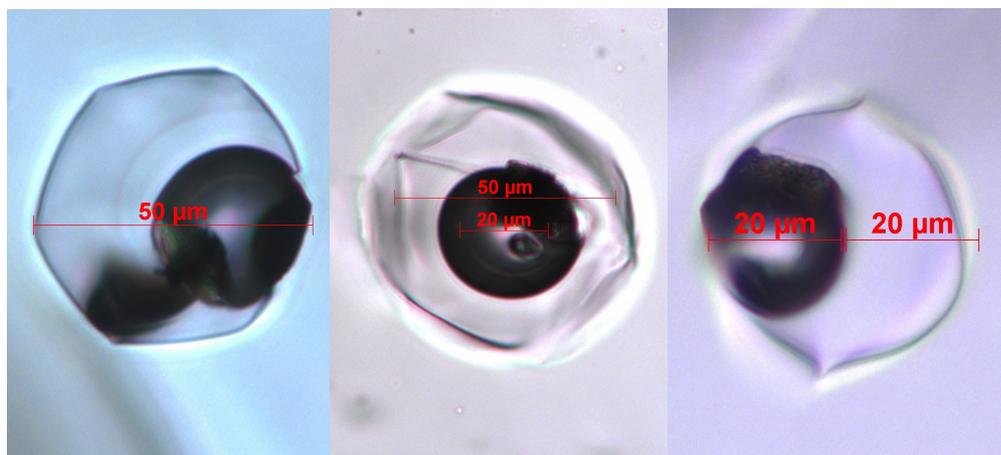


Figura 4.13: Microfoto con le inclusioni rappresentative della Formazione Ora. Queste presentano forma esagonale (negativa del quarzo) e bolle di dimensioni significative.

Inoltre, con l'analisi di immagine si è calcolato, per ciascuna Formazione, il rapporto percentuale tra il volume della bolla e quello delle inclusioni. I dati così ottenuti sono riassunti in **Tabella 3.1**.

Per un totale di 14 inclusioni misurate per la Formazione Monte Luco, le dimensioni delle bolle variano da 6,90 a 23,86 μm e la bolla occupa da un minimo di 7,4% a un massimo di 25,2% del volume totale dell'inclusione. La media dei valori ottenuti è 19% e la deviazione standard 4,4.

Considerando le inclusioni della Formazione Gargazzone le dimensioni delle bolle variano da 7,06 a 16,60 μm . Inoltre si riscontra una discrepanza tra campioni. In AV6, considerando 7 inclusioni, il rapporto calcolato dimostra che il volume delle bolle varia da 1% a 7%, con media 4% e deviazione standard 1,7. Invece, relativamente ai campioni AV8 e AV9, per un totale di 6 inclusioni analizzate, i volumi delle bolle sono compresi tra 13% e 24%, con media 19% e deviazione standard pari a 3,4 (simili a Fm. Monte Luco).

Le inclusioni relative alla Formazione Ora, similmente al comportamento riscontrato nel caso della Formazione Monte Luco, restituiscono rapporti che variano da un minimo di 4,5% a un massimo di 37,8% in 14 inclusioni studiate. La media dei valori è 20% e la deviazione standard 6,3. Le dimensioni delle bolle relative a questa Formazione variano da 4,5 a 44,92 μm .

Il grafico in **Figura 4.14** rappresenta la distribuzione dei dati e permette di apprezzarne la variabilità.

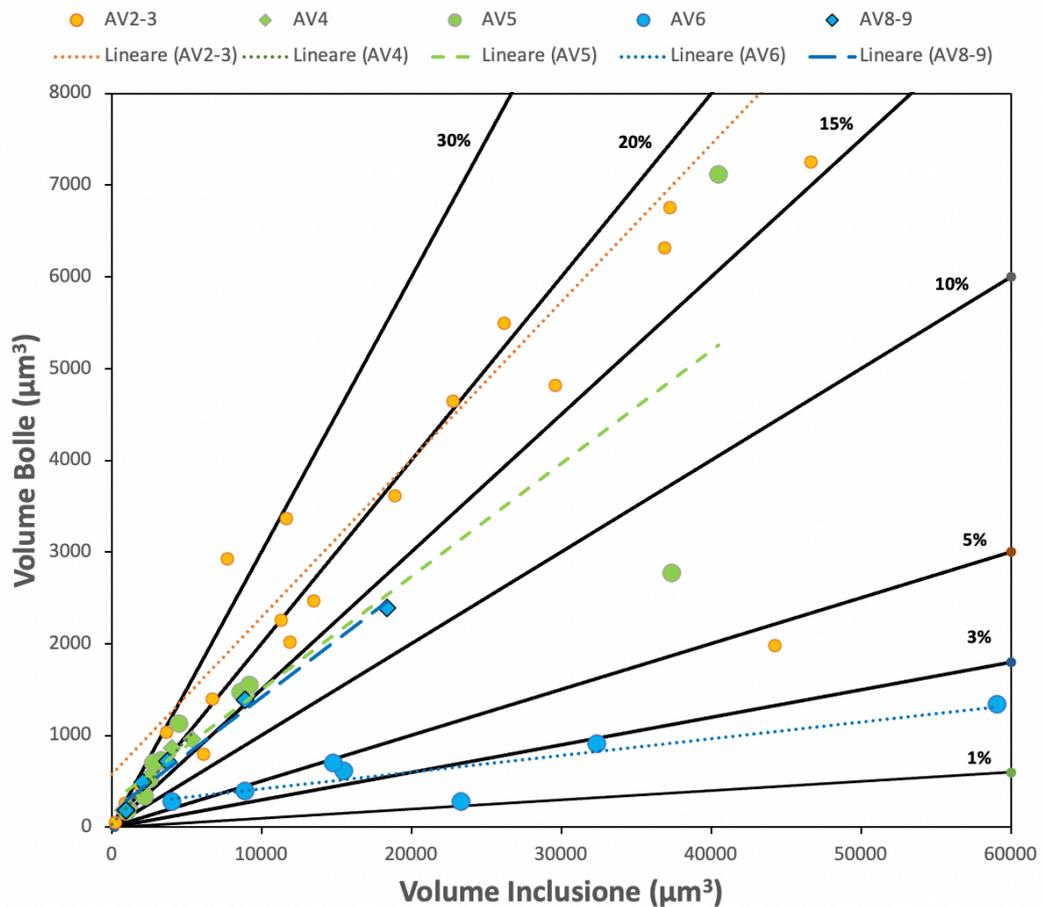


Figura 4.14: Grafico che mostra il volume delle bolle rispetto al volume delle inclusioni, con i dati ottenuti dall'analisi di immagine. Gli indicatori sono relativi ai diversi campioni esaminati, mentre le linee tratteggiate stimano l'andamento lineare della distribuzione dei dati per i vari campioni. Sono anche riportate le linee di tendenza (in nero) per rapporti tra il volume della bolla e quello delle inclusioni pari al 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30%. Per ogni Formazione studiata è stato utilizzato un colore diverso: il verde è associato alla Formazione Monte Luco, l'azzurro alla Formazione Gargazzone e l'arancione alla Formazione Ora.

Per determinare le componenti volatili e le fasi mineralogiche presenti all'interno delle inclusioni è stato necessario analizzarle con la micro-spettroscopia Raman; si sono esaminati i picchi degli spettri ottenuti sia da analisi interne alla bolla che del vetro intorno ad essa per riconoscere le varie fasi oltre all'eventuale presenza di componenti volatili separatesi dal fuso.

Prima di procedere con le analisi dei cristalli nelle inclusioni si è prodotto lo spettro del quarzo, il minerale ospite, al fine di facilitare l'individuazione dei picchi appartenenti alle fasi mineralogiche da riconoscere. Il picco più intenso si ha in corrispondenza del valore 463 cm^{-1} , inoltre gli altri picchi importanti del quarzo sono $128, 206, 265, 354, 402, 805, 1066$ e 1157 cm^{-1} . Uno spettro rappresentativo del quarzo è presentato in **Figura 4.15**.

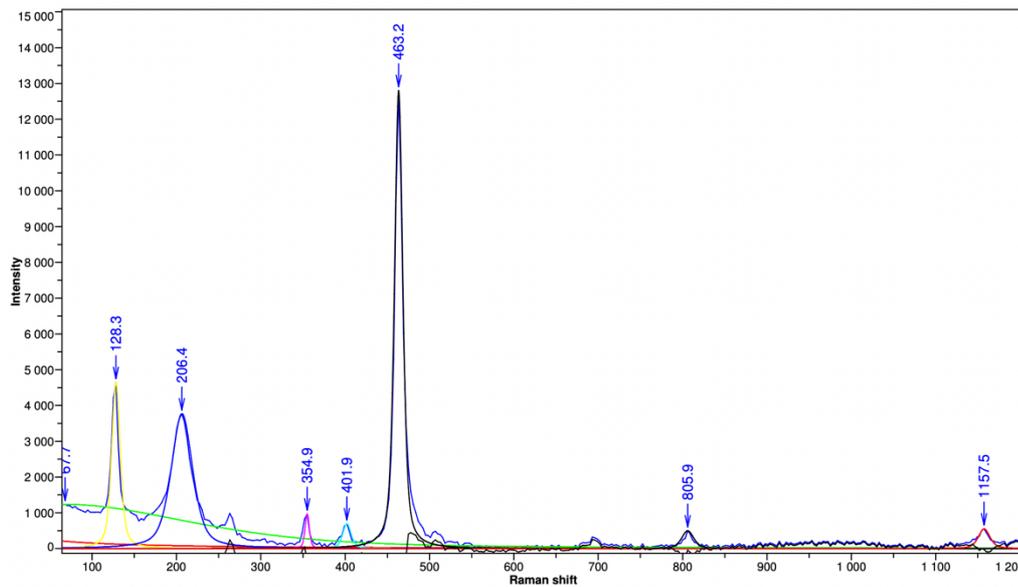


Figura 4.15: Spettro Raman del quarzo dove sono indicati i picchi (cm^{-1}) caratteristici.

L'analisi del fuso silicatico in un'inclusione della Formazione Monte Luco ha evidenziato la presenza di una banda asimmetrica tra $3500\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ (**Figura 4.16**). Tale banda indica la presenza di molecole OH^- nel fuso, pertanto, si tratta di un fuso idrato.

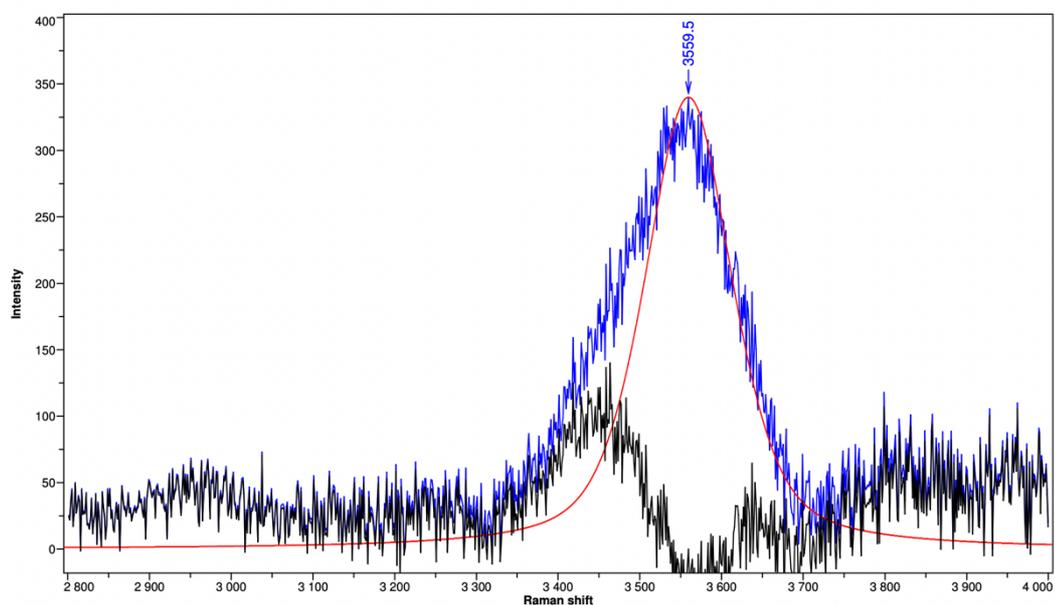


Figura 4.16: Spettro Raman con banda asimmetrica (a 3559 cm^{-1}) indicativa della presenza di acqua nel fuso silicatico.

Analizzando i cristalli all'interno delle inclusioni e le loro bolle si sono individuate diverse fasi: actinolite, magnetite, calcite, diopside, ilmenite e apatite. Inoltre, per alcune inclusioni, si è osservata la presenza di CO₂ nelle bolle. Di seguito vengono fornite informazioni dettagliate.

Dallo studio delle inclusioni relative alla Formazione Monte Luco si sono potuti osservare anche i picchi della CO₂ che si trovano in prossimità dei valori 1285 e 1388 (**Figura 4.17**). Questi valori non sono fissi come si osserva nelle altre fasi bensì la loro distanza relativa varia in base alla densità della CO₂ stessa (Frezzotti et al., 2011).

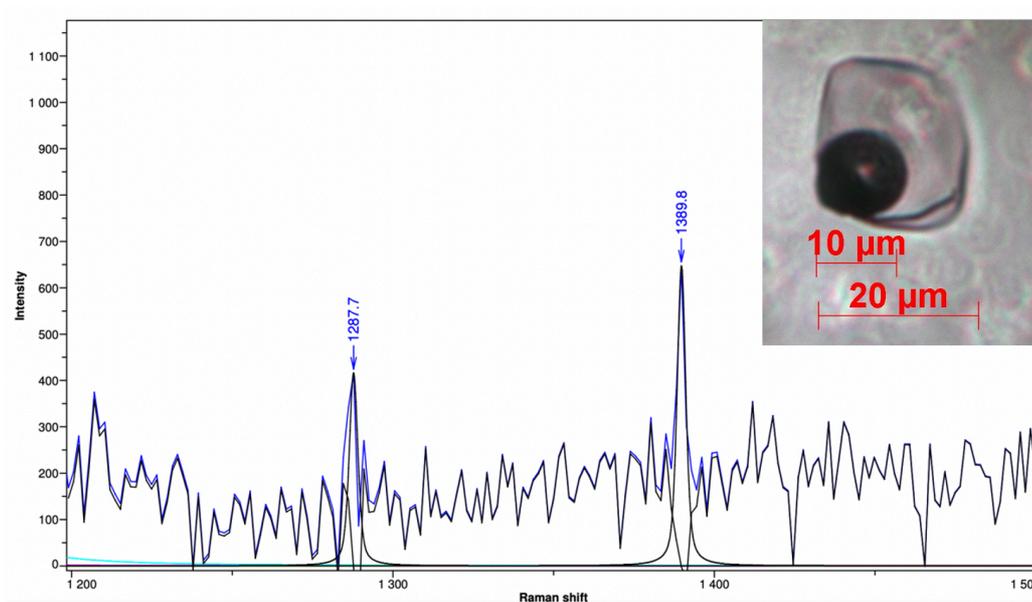


Figura 4.17: Spettro Raman raffigurante i due picchi caratteristici della CO₂ ottenuto dall'analisi della bolla presente nell'inclusione riportata.

Lo spettro ottenuto dall'analisi della bolla in un'inclusione della sezione AV6, relativa alla Formazione Gargazzone, è riportato in **Figura 4.18**. Oltre al picco a 463 cm⁻¹ tipico del quarzo, emerge un picco intenso a circa 1087 cm⁻¹. Osservando anche i picchi più deboli e consultando i diversi database Raman è stato possibile individuare la fase corrispondente. Si tratta di calcite: il picco più intenso si osserva a circa 1087 cm⁻¹, seguito da picchi minori a 156, 284 e 711 cm⁻¹ (evidenziati dalle stelle azzurre, **Figura 4.18**).

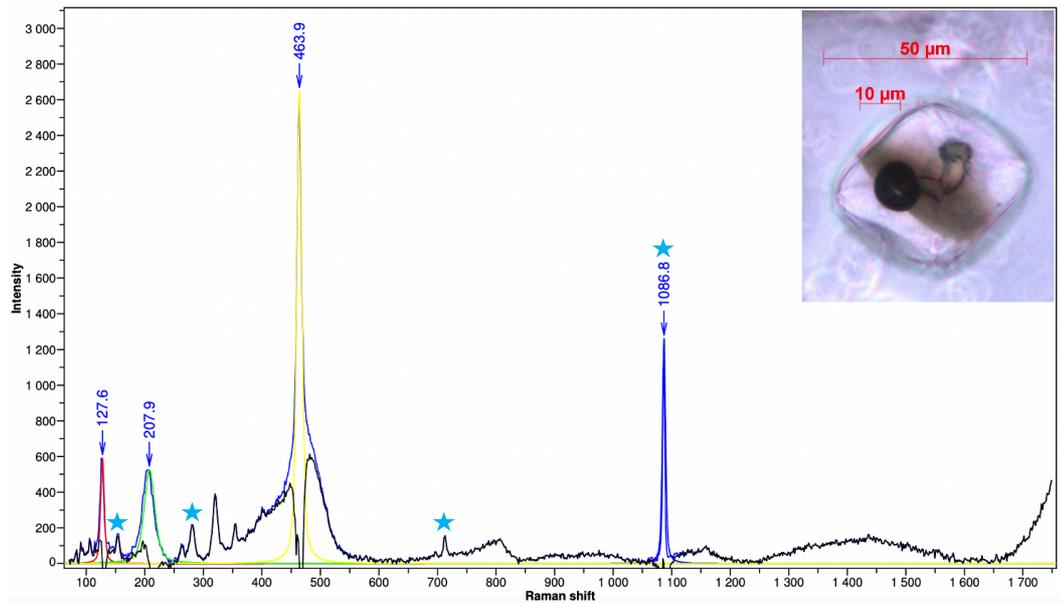


Figura 4.18: Spettro Raman ottenuto da analisi su un'inclusione di fusso appartenente al campione AV6 (Formazione Gargazzone). Sono evidenziati con delle stelle azzurre i picchi della calcite utili al suo riconoscimento. Gli altri picchi sono del quarzo.

Analisi condotte su inclusioni (in particolare all'interno delle bolle e nell'interfaccia tra bolle e fusso) trovate in rocce della Formazione Gargazzone hanno portato al riconoscimento di ulteriori fasi. Lo spettro riportato in **Figura 4.19** porta a ulteriori considerazioni. Per facilitare il riconoscimento della fase mineralogica si è sovrapposto lo spettro della magnetite (di colore verde nella **Figura 4.19**; picchi Raman a 310, 555 e 670 cm^{-1}) e si è osservata la corrispondenza dei picchi con quelli dello spettro ottenuto. Si osserva che il picco più intenso, esclusi quelli imputabili al quarzo, si trova in prossimità del valore 668cm^{-1} e si riscontra un picco analogo nello spettro della magnetite (670cm^{-1}). I picchi meno intensi della magnetite potrebbero essere mascherati dal rumore di fondo dell'analisi e pertanto non essere facilmente riconoscibili.

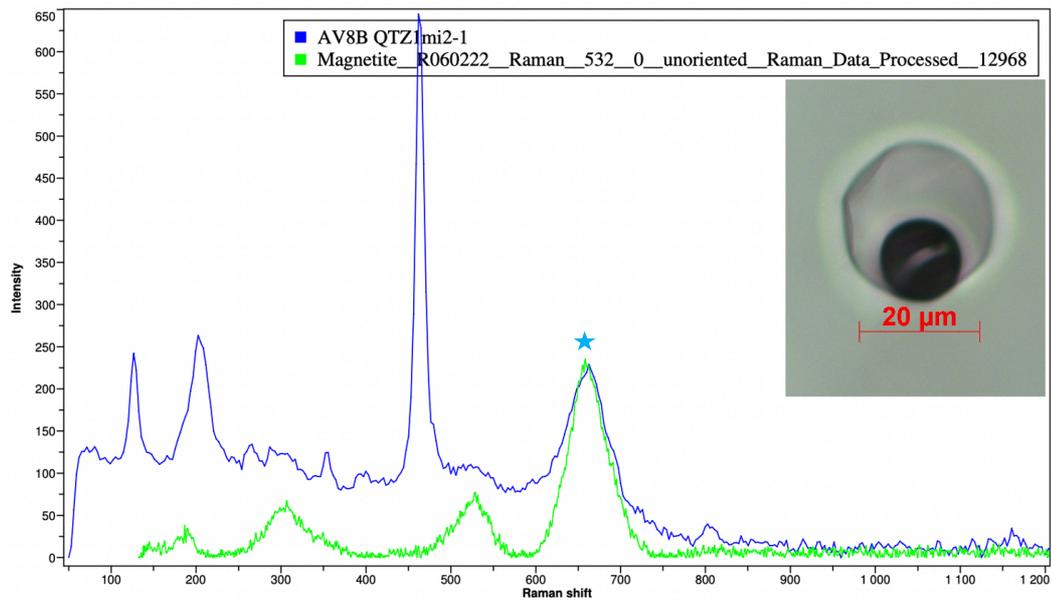


Figura 4.19: Spettro Raman relativo a un'inclusione del campione AV8 (Formazione Gargazzone). Lo spettro di colore blu è quello ottenuto dall'analisi mentre quello verde è lo spettro della magnetite presente in una Libreria Raman. È evidenziato con una stella azzurra l'unico picco disponibile per il riconoscimento.

Lo spettro in **Figura 4.20** mostra due picchi di intensità simile in prossimità dei valori 662 e 1009 cm^{-1} . Questi indicano la presenza di diopside che mostra picchi in corrispondenza di queste lunghezze d'onda (evidenziati dalle stelle azzurre).

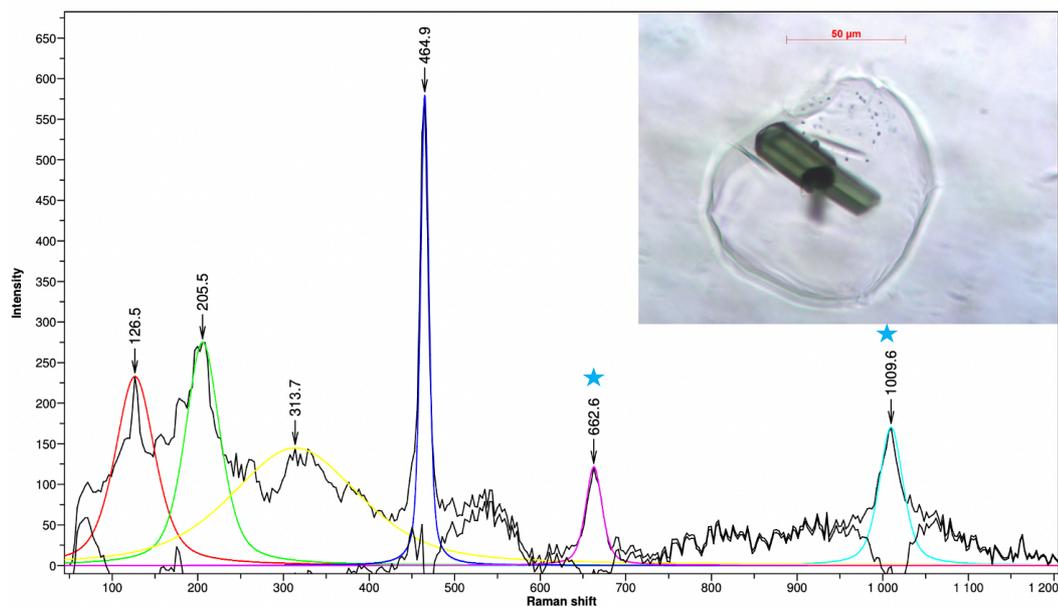


Figura 4.20: Spettro Raman di un'inclusione appartenente al campione AV9 (Formazione Gargazzone) con evidenza dei picchi utili all'individuazione del diopside. Il grosso cristallo di diopside presenta colore verde.

Dallo spettro riportato in **Figura 4.21** emerge un picco piuttosto intenso in corrispondenza del valore 682 e uno più debole a 373 cm^{-1} , coincidenti con quelli dell'ilmenite (che ha un picco intenso a 685 e due minori a 232 e 373 cm^{-1}). Il picco meno intenso dell'ilmenite a 232 cm^{-1} non è riconoscibile nello spettro prodotto dall'analisi.

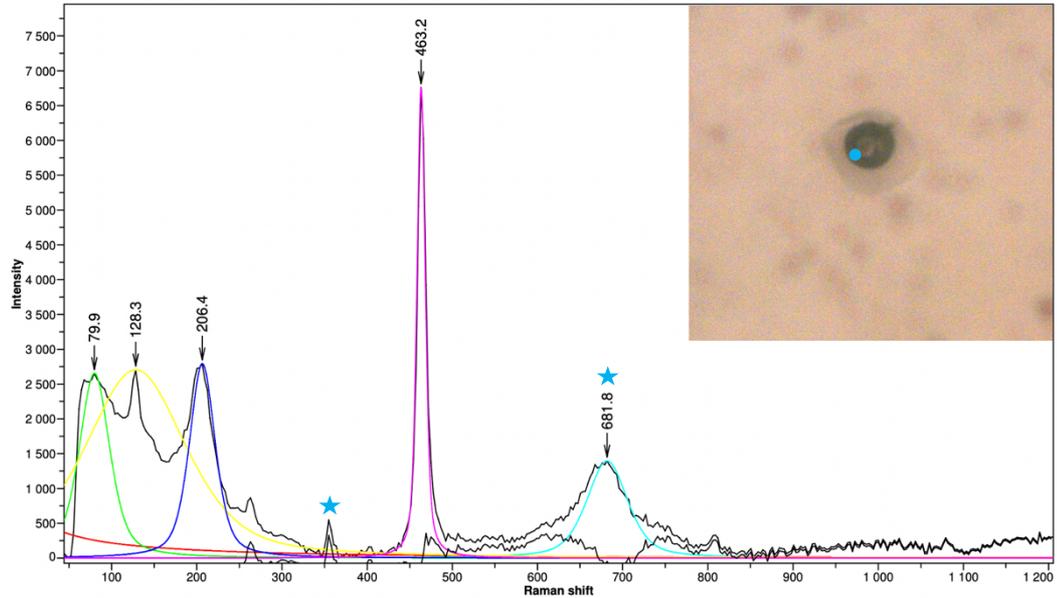


Figura 4.21: Spettro Raman ottenuto dall'analisi di un'inclusione di AV9. Sono evidenziati i picchi che consentono il riconoscimento dell'ilmenite quale fase presente nel campione. In alto a destra il punto indica dove è stata fatta l'analisi.

Per analizzare l'inclusione che segue, relativa alla Formazione Gargazzone, oltre allo spettro riportato in **Figura 4.22** si è acquisita una mappa Raman (**Figura 4.23**).

Allo spettro ottenuto (**Figura 4.22**) è stato sovrapposto lo spettro di un'apatite (in colore rosa) presente in una Libreria Raman per un migliore confronto dei picchi. Si può osservare il picco più intenso in corrispondenza del valore 960 cm^{-1} . Altri picchi caratteristici di questa fase si osservano a 428, 589, 1040 e 1051 cm^{-1} .

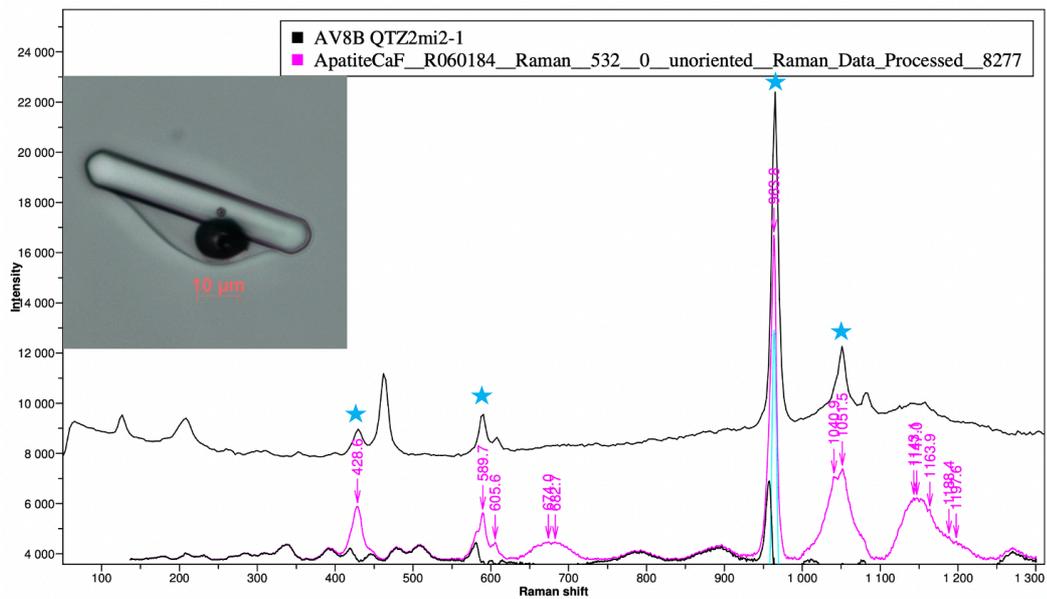


Figura 4.22: Spettro Raman ottenuto dall'analisi di un'inclusione della Formazione Gargazzone. Lo spettro nero è quello ottenuto dall'analisi mentre quello rosa è lo spettro dell'apatite, presente in una Libreria Raman. Sono evidenziati i picchi che consentono il riconoscimento dell'apatite.

La mappa Raman riportata in **Figura 4.23** aiuta a visualizzare la distribuzione delle fasi nell'immagine: a sinistra si osserva l'immagine dell'inclusione con il grande cristallo di apatite, al centro la posizione in cui si è rilevato il picco più intenso dell'apatite (960cm^{-1}) e a sinistra la posizione relativa al picco più intenso del quarzo (464 cm^{-1}). L'acquisizione di tale mappa, finalizzata a determinare la composizione della bolla, pur non essendo risultata efficace allo scopo si è rivelata utile per l'identificazione della fase del cristallo.

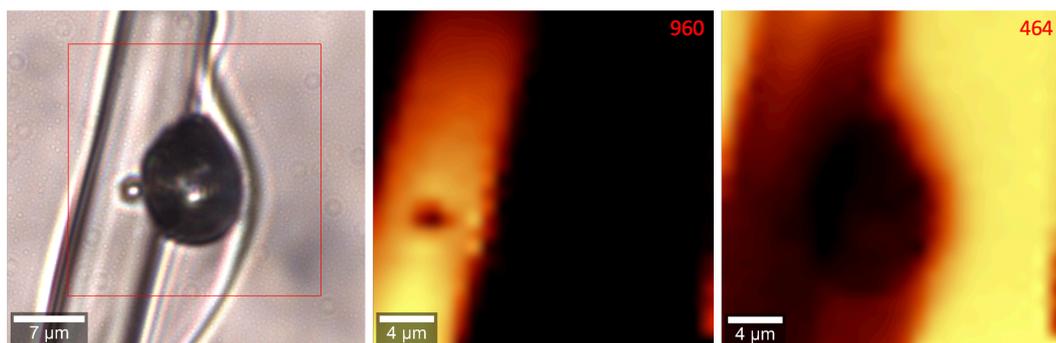


Figura 4.23: Mappa Raman acquisita su un'inclusione appartenente ad AV9 (Formazione Gargazzone).

Dall'analisi su AV3, campione appartenente alla Formazione Ora, si è ottenuto lo spettro in **Figura 4.24**. È presente molto rumore di fondo che non consente un facile riconoscimento di tutti i picchi utili alla determinazione della fase mineralogica. Tra i picchi più intensi, esclusi quelli imputabili al quarzo, emerge quello a circa 673 cm^{-1} , inoltre si osserva la presenza di un picco nella regione corrispondente alla molecola OH^- . I minerali del database che contengono picchi in prossimità di 673 cm^{-1} sono la magnetite (con picco più intenso a 668 e minori a 193 , 306 e 538 cm^{-1}) ma anche l'actinolite (picco più intenso a 673 e minori a 222 , 372 , 392 , 745 , 930 , 1030 e 1056 cm^{-1}). Considerata la posizione intorno a 3700 cm^{-1} , si può concludere che il minerale in esame è actinolite dato che la magnetite non è un minerale idrato.

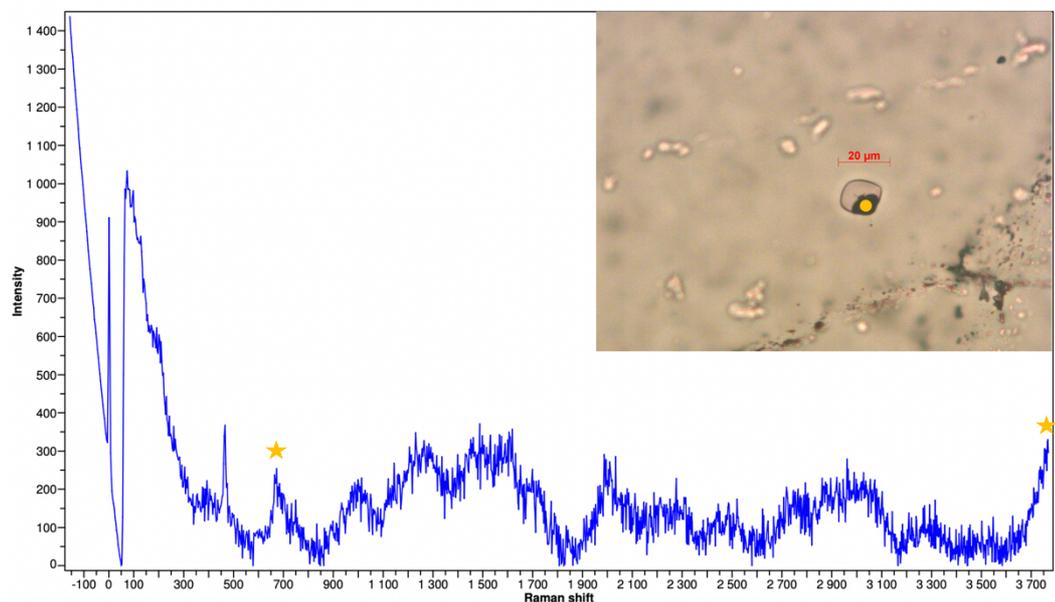


Figura 4.24: Spettro Raman relativo all'inclusione raffigurata in alto a destra. Il punto analizzato è indicato in arancione.

4.3 Composizione del fuso silicatico

Per determinare la composizione del fuso intrappolato nelle inclusioni considerate si è ricorso alla microsonda elettronica. Inoltre, questa analisi ha permesso il confronto tra le diverse Formazioni. I dati ottenuti sono riportati in **Tabella 3.2** e dopo essere stati normalizzati a 100% (i.e., le analisi sono considerate su base anidra) sono stati usati per costruire il diagramma di classificazione chimica TAS (Le Maitre et al., 1989). Esso considera SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ed è riportato in **Figura 4.25**. Si osserva che le inclusioni studiate per le Formazioni Monte Luco e Gargazzone sono classificate come rioliti mentre quelle della Formazione Ora hanno composizione intermedia tra trachiti e rioliti.

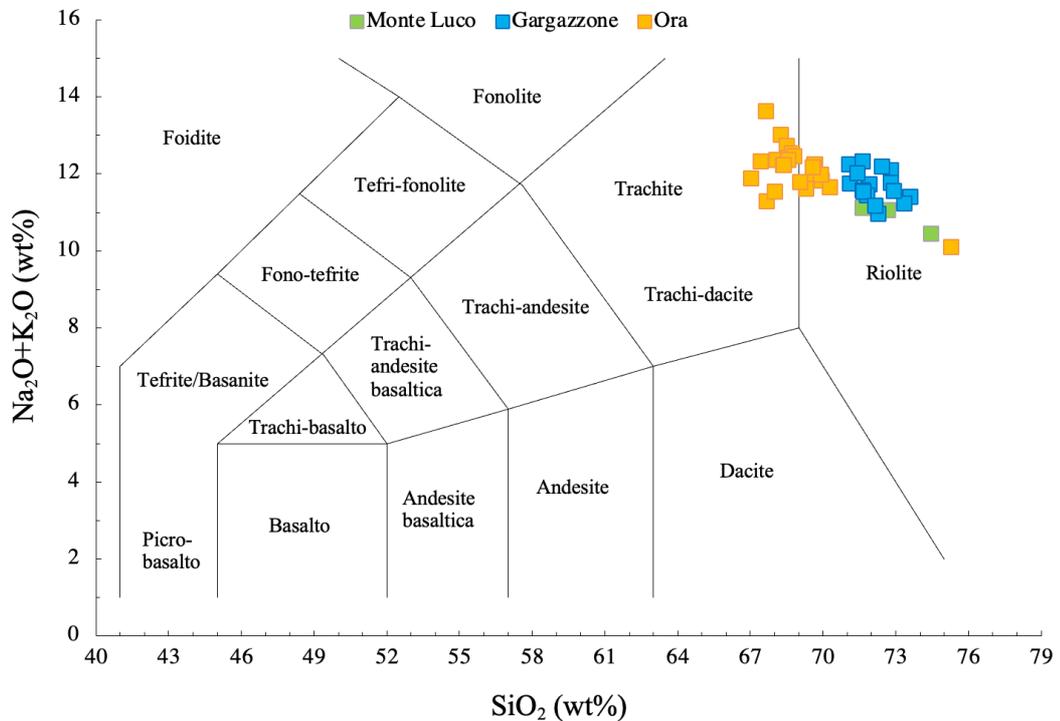


Figura 4.25: Diagramma TAS (Le Maitre et al., 1989) ottenuto da analisi di fuso silicatico tramite microsonda elettronica.

Partendo dagli stessi dati è stato possibile costruire dei diagrammi binari al fine di comparare i contenuti di SiO_2 e dei vari elementi presenti nelle diverse inclusioni.

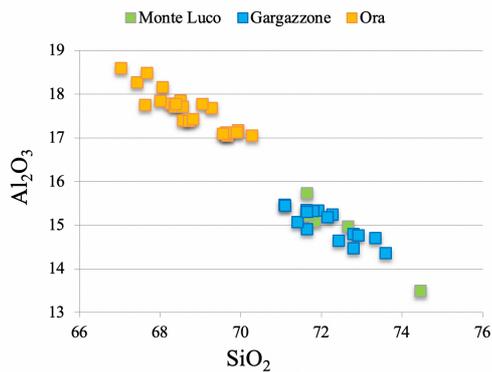


Figura 4.26: Diagramma binario SiO₂ versus Al₂O₃.

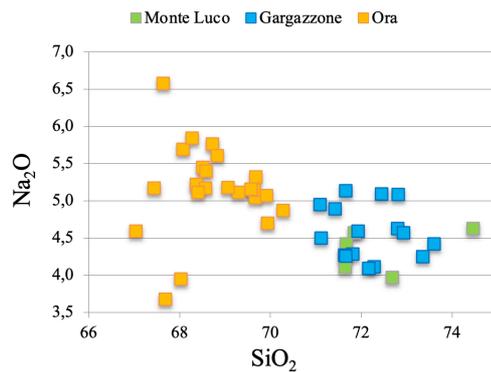


Figura 4.27: Diagramma binario SiO₂ versus Na₂O.

Si riscontrano nelle Formazioni considerate quantità di SiO₂ diverse: nella Formazione Monte Luco i valori variano da 71,64 a 74,46 wt.%, nella Formazione Gargazzone da 71,09 e 73,60 wt.% e nella Formazione Ora da 67,03 e 70,28 wt.%.

Come si può osservare in **Figura 4.26** i fusi delle Formazioni Monte Luco e Gargazzone presentano quantità di Al₂O₃ simili, ma minori rispetto alla Formazione Ora. In particolare, per la Formazione Monte Luco i valori di Al₂O₃ variano tra 13,49 e 15,73 wt.%, per la Formazione Gargazzone tra 14,35 e 15,47 wt.% e per la Formazione Ora tra 17,05 e 18,59 wt.%. Il diagramma costruito a partire da questi valori mostra una buona correlazione negativa dei dati (suggerita dalla direzione del loro allineamento) legata al fatto che all'aumentare della quantità di Al₂O₃ quella di SiO₂ diminuisce e viceversa.

La **Figura 4.27** mostra le quantità di Na₂O presenti nei fusi delle inclusioni appartenenti alle diverse Formazioni. Le inclusioni della Formazione Ora presentano quantità di Na₂O molto variabili (da 3,68 a 6,58 wt.%) rispetto alle Formazioni Monte Luco (con valori compresi tra 3,97 e 4,63 wt.%) e Gargazzone (tra 4,10 e 5,14 wt.%).

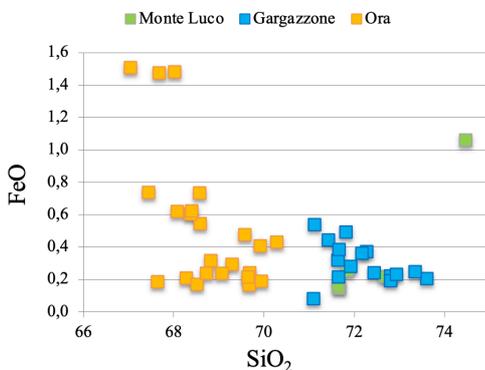


Figura 4.28: Diagramma binario SiO₂ versus FeO.

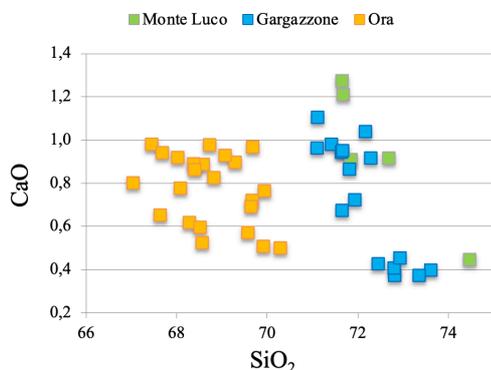


Figura 4.29: Diagramma binario SiO₂ versus CaO.

In **Figura 4.28** si possono osservare le differenze composizionali legate a FeO nei fusi delle tre Formazioni considerate. La variabilità di FeO è molto elevata nella Formazione Ora: la maggior parte dei valori varia da 0,17 e 0,74 wt.% ma sono presenti 3 fusi con valori compresi tra 1,48 e 1,51 wt.%. La variabilità è più contenuta per Gargazzone e Monte Luco. In quest'ultima si riscontra un valore anomalo (>1 wt. %) dato da un maggiore contenuto di FeO rispetto ai fusi della stessa Formazione (che presentano valori compresi tra 0,15 e 0,26 wt.%).

In **Figura 4.29** invece è riportato il diagramma binario che confronta il contenuto dei fusi in SiO₂ e CaO. A differenza degli elementi precedenti il calcio presenta composizioni simili in tutti i fusi delle Formazioni considerate: i valori per la Formazione Monte Luco variano da 0,45 a 1,28 wt.%, per la Formazione Gargazzone da 0,38 a 1,11 wt.% e per la Formazione Ora da 0,50 a 0,98 wt.%.

Considerando le chiusure delle analisi del fuso si può dedurre il contenuto di volatili dei fusi (riportato nella colonna 'Volatile per differenza' della **Tabella 3.2**). Se l'analisi chiude a 100 o a 101 wt%, il fuso è anidro e ciò indica l'assenza di componenti volatili al suo interno. Se invece l'analisi chiude a un valore minore di 100, sottraendo a 100 il totale si ottiene la stima del quantitativo di componenti volatili presenti (come H₂O e CO₂) che non vengono misurate dalla microsonda elettronica. Il contenuto di volatili del fuso nelle inclusioni studiate può variare da 0 a un valore massimo stimato di 4,99 wt.%.

5. Discussione

Lo studio delle rocce del Gruppo Vulcanico Atesino che ha portato all'individuazione delle inclusioni di fuso silicatico al loro interno, ha permesso la loro classificazione sulla base dei minerali che le costituiscono. La differenza principale riguarda le quantità relative di quarzo e plagioclasio presenti in ciascuna Formazione considerata. Le Formazioni Monte Luco e Gargazzone sono simili, entrambe classificate come ignimbriti dacitiche, e presentano abbondanti quantità di plagioclasio. Cristalli di quarzo sono presenti in maggiore quantità nella Formazione Gargazzone nonostante questo non sia abbondante come nella Formazione Ora. Quest'ultima è classificata come ignimbrite riolitica e si differenzia dalle altre per una maggiore presenza di fenocristalli di quarzo, che risulta essere il minerale più abbondante, seguito dal sanidino.

Le analisi delle inclusioni di fuso contenute nelle rocce hanno portato a osservarne la disposizione all'interno dei cristalli: la presenza di inclusioni in *cluster* distribuiti in modo più o meno casuale suggerisce un intrappolamento primario, cioè la loro inclusione nel minerale è avvenuta durante la sua cristallizzazione.

Le analisi di immagine hanno permesso di stimare il volume relativo delle bolle dentro le inclusioni delle Formazioni Monte Luco, Gargazzone e Ora e i valori complessivamente ottenuti sono compresi tra 1% e 37,8%. Tali informazioni permettono di dedurre il processo di intrappolamento (omogeneo vs. eterogeneo). Secondo Frezzotti (2001) se l'inclusione ha subito intrappolamento omogeneo avrà una sola bolla e il rapporto tra il suo volume e quello dell'inclusione sarà pressoché costante mentre nel caso di intrappolamento eterogeneo potrà avere più di una bolla e rapporto molto variabile. Secondo quanto suggerito da Moore et. al (2015), nel caso in cui le bolle rappresentino più del 10% del volume totale dell'inclusione, probabilmente si è verificato un intrappolamento di tipo eterogeneo.

In base a queste considerazioni e in accordo con la rappresentazione grafica (**Figura 4.14**), nella Formazioni Monte Luco il valore della deviazione standard è relativamente alto (pari a 4,4) quindi lo è anche la variabilità, inoltre, il valore medio del volume delle bolle è 19%. Per la Formazione Ora, analogamente a quanto osservato nel caso precedente, la variabilità è elevata (infatti la deviazione standard è 6,3) e il volume medio è pari a 20%. Queste evidenze indicano che per le due Formazioni considerate l'intrappolamento è stato eterogeneo. Quindi, per questi campioni, il magma è stato intrappolato insieme ad un'altra fase fluida immiscibile che coesisteva con esso.

Per la Formazione Monte Luco sono state fatte 14 analisi totali di cui solo 4 riguardano il campione AV4, dato il numero limitato di inclusioni presenti nello stesso; maggiori analisi su questo campione sarebbero state utili per confermare il risultato ottenuto nonostante questo sia in linea con l'atteso.

Per la Formazione Gargazzone i campioni considerati evidenziano comportamenti differenti. Il campione AV6 presenta una deviazione standard bassa (pari a 1,7) e un rapporto medio percentuale del 4%, di molto inferiore a quello delle altre Formazioni. Questi valori indicano che le bolle sono molto piccole (<10% del volume totale) rispetto alle inclusioni corrispondenti e si ha una bassa variabilità dei dati; ciò suggerisce che probabilmente le inclusioni di questo campione si sono formate per intrappolamento omogeneo, cioè il magma è stato intrappolato come un'unica fase liquida e solo dopo l'intrappolamento è avvenuta la separazione delle fasi volatili (la fase vapore che si separa va a formare la bolla). A supporto di questa ipotesi si può osservare che in **Figura 4.14** gli indicatori corrispondenti appaiono pressoché allineati. I campioni AV8 e AV9 invece presentano un rapporto percentuale medio del 19% e una deviazione standard di 3,4, pertanto maggiore di quella di AV6, ma minore delle altre due Formazioni. La rappresentazione mostra un buon allineamento dei dati ottenuti e ciò porta all'ipotesi di intrappolamento omogeneo anche per questi campioni. In contrasto con il buon allineamento riscontrato, le bolle presentano dimensioni elevate (>10% del volume totale) rispetto all'inclusione e questo porterebbe a pensare che sia avvenuto intrappolamento eterogeneo. Visto il comportamento diverso nella Formazione Gargazzone, per chiarire quale dei due processi di intrappolamento abbia interessato le inclusioni, risulterebbe utile fare ulteriori analisi e quindi basare lo studio su un numero maggiore di dati. Ciò non è stato possibile in considerazione del numero ridotto di inclusioni presenti nei campioni considerati.

Le analisi Raman sulle inclusioni hanno permesso di individuare la presenza al loro interno di actinolite, magnetite, calcite, diopside, ilmenite e apatite. Le componenti volatili più importanti sono H₂O e CO₂. L'H₂O è stata individuata nel fuso (**Figura 4.16**), la CO₂ invece è stata individuata nelle bolle (**Figura 4.17**). La presenza di cristalli di calcite, actinolite, magnetite e ilmenite nelle bolle sono il risultato di processi post-intrappolamento: la loro cristallizzazione può essere avvenuta in seguito all'interazione del fuso silicatico con i volatili presenti nelle bolle. Invece minerali come apatite e diopside possono essere stati intrappolati accidentalmente durante la formazione dell'inclusione stessa.

Le analisi sulla composizione dei fusi silicatici hanno portato alla costruzione di un diagramma TAS (**Figura 4.25**) che permette di fare delle considerazioni importanti sulla

loro evoluzione. Osservando il diagramma si nota come i fusi appartenenti alle Formazioni Monte Luco e Gargazzone presentino composizione riolitica nonostante le rocce corrispondenti, dall'indagine al microscopio ottico, risultino ignimbriti dacitiche. Invece i fusi riferiti alla Formazione Ora presentano una composizione trachitica, nonostante le rocce siano delle ignimbriti riolitiche.

Siccome i processi post-intrappolamento possono cambiare la composizione del fuso, è possibile che le discrepanze osservate siano in parte da imputare alla cristallizzazione del quarzo sul bordo della cavità delle inclusioni. Per valutare tale ipotesi è stato fatto un bilancio di massa per reintegrare la perdita di SiO_2 nel fuso intrappolato. Si è cercato di compensare l'impovertimento in SiO_2 (dovuto alla cristallizzazione di quarzo sul bordo della cavità dell'inclusione) aggiungendo del quarzo alla composizione media dei fusi delle tre Formazioni, nella misura dell'1%, 5% e 10% della massa totale delle inclusioni.

Per le Formazioni Monte Luco e Gargazzone (i cui risultati sono riportati rispettivamente nei diagrammi TAS in **Figura 5.1** e in **Figura 5.2**) si osserva che l'aggiunta del quarzo ha portato a un arricchimento in SiO_2 della composizione dei fusi che pertanto si discostano ulteriormente dalla composizione dacitica attesa. L'aggiunta del quarzo non riporta i fusi a composizione dacitica o riololitica pertanto la sola cristallizzazione del quarzo non spiega l'evoluzione dei fusi. Un ulteriore processo che potrebbe spiegare la differenza tra le composizioni delle inclusioni e delle rocce potrebbe essere la cristallizzazione frazionata, in cui i cristalli che si formano durante il raffreddamento vengono man mano frazionati rispetto al liquido silicatico residuale. Nelle rocce studiate, la predominanza di fenocristalli di plagioclasio e biotite, rispetto al quarzo, suggerisce che essi si sono formati prima nella sequenza di cristallizzazione. Di conseguenza, il quarzo ha iniziato a formarsi quando il fuso era già più evoluto (i.e. più impoverito nei componenti compatibili con plagioclasio e biotite) verso una composizione riolitica e ha potuto intrappolare porzioni di questo fuso riolitico.

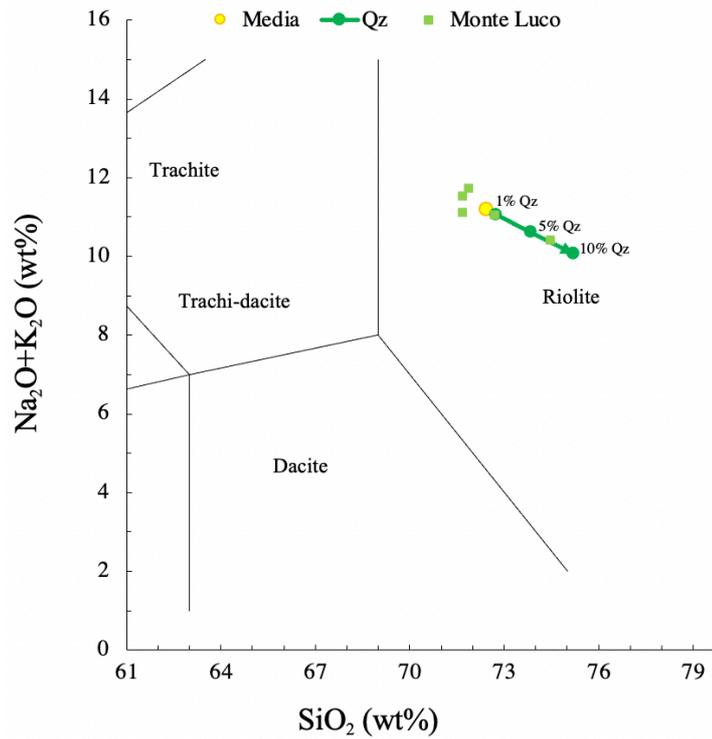


Figura 5.1: Porzione del diagramma TAS (Le Maitre et al., 1989) rappresentante le composizioni dei fusi della Formazione Monte Luco (verde chiaro), la composizione media (giallo) e la sua evoluzione dopo l'aggiunta di quarzo (verde scuro).

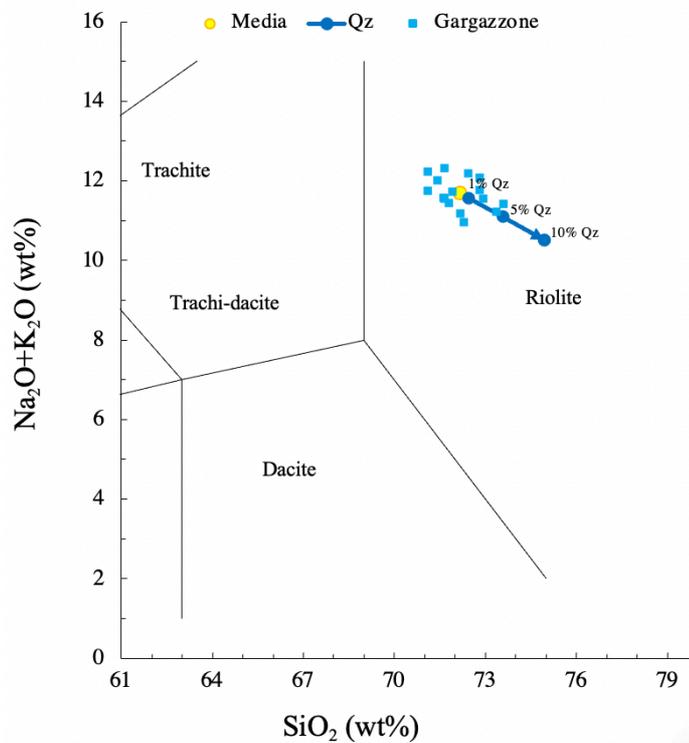


Figura 5.2: Porzione del diagramma TAS (Le Maitre et al., 1989) rappresentante le composizioni dei fusi della Formazione Gargazzone (azzurro), la composizione media (giallo) e la sua evoluzione dopo l'aggiunta di quarzo (blu).

Le composizioni ottenute per la Formazione Ora sono rappresentate nel diagramma TAS in **Figura 5.3**. In questo caso si osserva che l'aggiunta di quarzo porta la composizione da trachitica a riolitica, arricchendosi in SiO_2 . A differenza delle Formazioni Monte Luco e Gargazzone la composizione dei fusi con l'aggiunta di quarzo raggiunge quella attesa, pertanto, la cristallizzazione successiva all'intrappolamento del fuso sembra essere responsabile del suo impoverimento in SiO_2 . Questa osservazione è coerente con il fatto che i fenocristalli più abbondanti in queste rocce sono di quarzo, di conseguenza esso è in grado di registrare (i.e. intrappolare) le composizioni del magma sin dall'inizio dell'evoluzione.

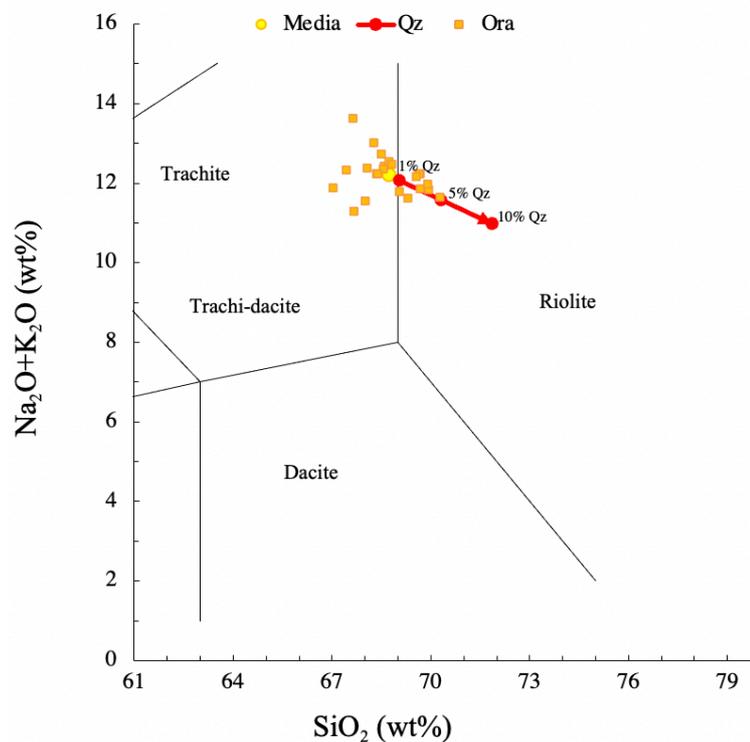


Figura 5.3: Porzione del diagramma TAS (Le Maitre et al., 1989) rappresentante le composizioni dei fusi della Formazione Ora (arancione), la composizione media (giallo) e la sua evoluzione dopo l'aggiunta di quarzo (rosso).

6. Conclusioni

Lo studio delle inclusioni di fuso silicatico contenute nel quarzo delle vulcaniti del Gruppo Vulcanico Atesino ha portato a definire le condizioni e i processi che le hanno generate.

Con le analisi di immagine si è giunti a determinare il tipo di processo di intrappolamento che le ha formate definendo, per le inclusioni di Formazione Monte Luco e Ora, un intrappolamento di tipo eterogeneo. Questo risultato indica che il sistema magmatico che ha generato i prodotti di queste due Formazioni è stato per un certo momento della sua storia saturo in una fase fluida. Per le inclusioni della Formazione Gargazzone non si è giunti a un risultato preciso dato che gli esiti delle analisi effettuate sui campioni AV8 e AV9 sono contrastanti. Infatti, il buon allineamento dei dati suggerirebbe un intrappolamento omogeneo, mentre le elevate dimensioni delle bolle suggerirebbero un intrappolamento eterogeneo. Analisi sul campione AV6 della medesima Formazione suggeriscono invece un intrappolamento di tipo omogeneo.

Con le analisi di micro-spettroscopia Raman è stato possibile riconoscere all'interno delle inclusioni delle componenti volatili (H_2O e CO_2) oltre a cristalli di actinolite, magnetite, calcite, diopside, ilmenite e apatite. Calcite, actinolite, magnetite e ilmenite sono cristalli formati per processi post-intrappolamento, dall'interazione tra fuso silicatico e componenti volatili interni alle bolle. I cristalli di apatite e diopside sono stati invece intrappolati accidentalmente insieme al fuso al momento della formazione delle inclusioni stesse. Il ritrovamento di carbonati e silicati idrati nelle inclusioni impone cautela nell'utilizzo dei dati dei contenuti di H_2O e CO_2 di inclusioni vetrose riportati in letteratura. Infatti, una ricostruzione corretta del budget di H_2O e CO_2 di sistemi vulcanici deve tener conto anche che parte dei volatili è stata sottratta dal fuso intrappolato per formare queste fasi mineralogiche.

Con la microsonda elettronica si è determinata la composizione dei fusi delle diverse Formazioni ed è emerso che queste divergono da quella della roccia identificata mediante microscopia ottica. Ciò ha permesso di fare delle considerazioni importanti sulla loro evoluzione. Nello specifico, le rocce delle Formazioni Monte Luco e Gargazzone sono daciti mentre la composizione dei loro fusi nelle inclusioni è riolitica. Nel modello geochimico fatto, l'aggiunta di quarzo, volta a compensare la quantità di SiO_2 persa per cristallizzazione sul bordo della cavità, non è sufficiente a spiegarne l'evoluzione. Tuttavia, l'abbondanza di cristalli di biotite e plagioclasio rispetto a quelli di quarzo suggerisce che quest'ultimo si è formato quando il fuso era impoverito in componenti compatibili con biotite e plagioclasio (quindi più ricco in SiO_2). Ciò è coerente con la composizione riolitica ottenuta da analisi sul fuso.

Le rocce della Formazione Ora invece sono rioliti ma le analisi sul fuso silicatico restituiscono una composizione trachitica; l'aggiunta di quarzo sposta la composizione ottenuta verso le rioliti quindi ciò suggerisce che l'impoverimento in SiO_2 è da imputare a cristallizzazione di quarzo post-intrappolamento sul bordo della cavità dell'inclusione.

Ulteriori sviluppi di questo lavoro potrebbero consistere nella riomogenizzazione sperimentale delle inclusioni riportandole alle temperature di intrappolamento, in modo tale da rifondere tutte le fasi mineralogiche formatesi nel post-intrappolamento e dissolvere le componenti volatili nel fuso. Il fuso verrebbe poi raffreddato molto rapidamente per formare un vetro omogeneo che, con apposite tecniche analitiche (e.g. SIMS) potrebbe essere analizzato per ottenere il contenuto originario di volatili.

Bibliografia

Cannatelli, C., Doherty, A. L., Esposito, R., Lima, A., & De Vivo, B. (2016). Understanding a volcano through a droplet: A melt inclusion approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 171, 4-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.003>

Capriolo, M., Marzoli, A., Aradi, L. E., Callegaro, S., Dal Corso, J., Newton, R. J., Mills, B.J.W., Wignall, P.B., Bartoli, O., Baker, D.R., Youbi, N., Remusat, L., Spiess, R., Szabó, C. (2020). Deep CO₂ in the end-Triassic Central Atlantic Magmatic Province. *Nature communications*, 11(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15325-6>

Cesare, B., Acosta-Vigil, A., Bartoli, O., & Ferrero, S. (2015). What can we learn from melt inclusions in migmatites and granulites?. *Lithos*, 239, 186-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.09.028>

Esposito, R., Bodnar, R. J., Danyushevsky, L. V., De Vivo, B., Fedele, L., Hunter, J., Lima, A., & Shimizu, N. (2011). Volatile evolution of magma associated with the Solchiaro eruption in the Phlegrean Volcanic District (Italy). *Journal of Petrology*, 52(12), 2431-2460. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/egr051>

Ferrari, F. (2014). Stratigrafia e geochimica delle rioliti Permiane in Trentino. Tesi di Laurea triennale, Università degli Studi di Padova. <http://hdl.handle.net/20.500.12608/19011>

Frezzotti, M. L. (2001). Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. *Lithos*, 55 (1-4), 273-299. doi: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00048-7)

Frezzotti, M. L., Tecce, F., & Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>

Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R., Zanettin, B. (1989): A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Blackwell Scientific*, Oxford.

Marocchi, M., Morelli, C., Mair, V., Klötzli, U., & Bargossi, G. M. (2008). Evolution of large silicic magma systems: new U-Pb zircon data on the NW Permian Athesian Volcanic Group (Southern Alps, Italy). *The Journal of Geology*, *116*(5), 480-498.

doi: <https://doi.org/10.1086/590135>

Moore, L. R., Gazel, E., Tuohy, R., Lloyd, A. S., Esposito, R., Steele-MacInnis, M., Hauri, E.H., Wallace, P.J., Plank, T., Bodnar, R. J. (2015). Bubbles matter: An assessment of the contribution of vapor bubbles to melt inclusion volatile budgets. *American Mineralogist*, *100* (4), 806-823. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2015-5036>

Morelli, C., Bargossi, G. M., Mair, V., Marocchi, M., & Moretti, A. (2007). The lower Permian volcanics along the Etsch valley from Meran to Auer (Bozen). *Mitt. Oesterr. Min. Ges*, *153*, 195-218.

Roedder, E. (1979). Origin and significance of magmatic inclusions. *Bulletin de Mineralogie*, *102* (5), 487-510. doi: <https://doi.org/10.3406/bulmi.1979.7299>

Rottura, A., Bargossi, G. M., Caggianelli, A., Del Moro, A., Visona, D., & Tranne, C. A. (1998). Origin and significance of the Permian high-K calc-alkaline magmatism in the central-eastern Southern Alps, Italy. *Lithos*, *45*(1-4), 329-348.

doi: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00038-3)

Steele-Macinnis, M., Esposito, R., & Bodnar, R. J. (2011). Thermodynamic model for the effect of post-entrapment crystallization on the H₂O–CO₂ systematics of vapor-saturated, silicate melt inclusions. *Journal of Petrology*, *52* (12), 2461-2482.

doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/egr052>

Tacchetto, T., Reddy, S. M., Bartoli, O., Rickard, W. D., Fougereuse, D., Saxey, D. W., Quadir, Z., & Clark, C. (2021). Pre-nucleation geochemical heterogeneity within glassy anatectic inclusions and the role of water in glass preservation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *176* (9), 1-19.

doi: <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01826-0>

Allegati

Allegato 1 - Tabella supplementare 1: Composizione chimica della biotite.

Campione Formazione	AV6C-C1-14		AV6C-C2-26		AV6C-C4-36		AV2B-C5-1		AV2B-C5-2		AV2B-C4-7		AV2B-C3-10		AV2B-C2-11		AV2B-C2-12		AV2B-C2-13		AV3B-C1-39		AV3B-C1-40	
	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA
Analisi	14	26	36	36	1	2	7	10	11	12	13	39	40											
Minerale	Bt	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Centro	Bt	Bt	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Centro	Bt Bordo	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Bordo	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Bordo	Bt Bordo	Bt Centro	Bt Centro	Bt Centro	Bt Bordo	Bt Bordo
SiO ₂	35,21	34,85	36,27	36,27	35,58	35,91	36,41	36,07	35,91	36,25	35,67	35,91	36,25	35,91	36,25	35,67	35,91	36,25	35,67	35,91	35,95	35,70	35,70	35,70
TiO ₂	2,95	3,37	4,01	4,01	5,26	5,10	5,22	5,48	4,44	5,17	4,63	4,44	5,17	4,44	5,17	4,63	4,44	5,17	4,63	4,44	4,58	4,60	4,60	4,60
Al ₂ O ₃	15,49	15,07	14,71	14,71	14,29	14,11	14,56	14,40	14,48	14,49	14,17	14,48	14,49	14,48	14,49	14,17	14,48	14,49	14,17	14,48	14,49	14,49	15,08	15,08
FeO	26,27	23,67	24,29	24,29	24,03	23,66	24,67	24,41	24,93	24,54	25,40	24,93	24,54	24,93	24,54	25,40	24,93	24,54	25,40	24,93	24,81	24,69	24,69	24,69
MnO	0,30	0,46	0,26	0,26	0,19	0,16	0,22	0,28	0,16	0,20	0,21	0,16	0,20	0,16	0,20	0,21	0,16	0,20	0,21	0,21	0,21	0,23	0,23	0,23
MgO	7,17	10,44	8,95	8,95	8,56	8,98	8,20	8,16	8,51	8,14	7,53	8,51	8,14	8,51	8,14	7,53	8,51	8,14	7,53	8,67	8,67	8,32	8,32	8,32
CaO	0,02	0,15	0,06	0,06	0,01	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,39	0,44	0,44	0,44	0,53	0,48	0,54	0,40	0,46	0,41	0,42	0,46	0,41	0,46	0,41	0,42	0,46	0,41	0,42	0,46	0,46	0,44	0,44	0,44
K ₂ O	8,70	6,50	8,84	8,84	8,86	9,01	8,92	8,91	9,03	8,87	8,81	9,03	8,87	9,03	8,87	8,81	9,03	8,87	8,81	8,96	8,96	9,02	9,02	9,02
Cl	0,14	0,16	0,21	0,21	0,33	0,45	0,24	0,28	0,75	0,36	0,78	0,75	0,36	0,75	0,36	0,78	0,75	0,36	0,78	0,59	0,59	0,43	0,43	0,43
Totale	96,65	95,12	98,03	98,03	97,64	97,88	98,98	98,42	98,69	98,44	97,64	98,73	98,44	98,69	98,44	97,64	98,73	98,44	97,64	98,73	98,73	98,51	98,51	98,51
Si	5,49	5,40	5,51	5,51	5,44	5,47	5,49	5,47	5,46	5,50	5,50	5,46	5,50	5,46	5,50	5,50	5,46	5,50	5,50	5,46	5,46	5,43	5,43	5,43
Alr	2,51	2,60	2,49	2,49	2,56	2,53	2,51	2,53	2,54	2,50	2,50	2,54	2,50	2,54	2,50	2,50	2,54	2,50	2,50	2,54	2,54	2,57	2,57	2,57
Aliv	0,33	0,15	0,15	0,15	0,02	0,01	0,08	0,05	0,06	0,09	0,07	0,06	0,09	0,06	0,09	0,07	0,06	0,09	0,07	0,05	0,05	0,13	0,13	0,13
Ti	0,35	0,39	0,46	0,46	0,61	0,58	0,59	0,63	0,51	0,59	0,54	0,51	0,59	0,51	0,59	0,54	0,51	0,59	0,54	0,52	0,52	0,53	0,53	0,53
Fe(II)	3,42	3,07	3,09	3,09	3,07	3,02	3,11	3,10	3,17	3,11	3,27	3,17	3,11	3,17	3,11	3,27	3,17	3,11	3,27	3,15	3,15	3,14	3,14	3,14
Mn	0,04	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Mg	1,67	2,41	2,03	2,03	1,95	2,04	1,84	1,85	1,93	1,84	1,73	1,93	1,84	1,93	1,84	1,73	1,93	1,84	1,73	1,96	1,96	1,89	1,89	1,89
Ca	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,12	0,13	0,13	0,13	0,16	0,14	0,16	0,12	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
K	1,73	1,28	1,71	1,71	1,73	1,75	1,72	1,72	1,75	1,72	1,73	1,75	1,72	1,75	1,72	1,73	1,75	1,72	1,73	1,74	1,74	1,75	1,75	1,75
Cl	0,04	0,04	0,05	0,05	0,08	0,12	0,06	0,07	0,19	0,09	0,20	0,19	0,09	0,19	0,09	0,20	0,19	0,09	0,20	0,15	0,15	0,11	0,11	0,11
Totale	15,65	15,52	15,61	15,61	15,56	15,56	15,53	15,50	15,58	15,49	15,50	15,58	15,49	15,58	15,49	15,50	15,58	15,49	15,50	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58
X _{Mg}	0,33	0,44	0,40	0,40	0,39	0,40	0,37	0,37	0,38	0,37	0,35	0,38	0,37	0,38	0,37	0,35	0,38	0,37	0,35	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

Allegato 2 - Tabella supplementare 2: Composizione chimica dei feldspati (An = anortite; Ab = albite; Or = ortoclasio).

Campione	AV6C-C1-19		AV6C-C1-20		AV6C-C1-21		AV6C-C1-22		AV6C-C2-29		AV6C-C2-31		AV6C-C4-32		AV6C-C4-33		AV6C-C4-35		AV6C-C4-37		AV2B-C5-3		AV2B-C5-4		AV2B-C4-5		AV2B-C4-6		AV2B-C3-9		AV3B-C1-41		AV3B-C1-42		AV3B-C1-43					
	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	IGG	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA	ORA												
Formazione	19	20	21	22	29	31	32	33	35	37	3	4	5	6	9	41	42	43																						
Minerale	Pl(Ab) Centro	Pl(Ab) Centro	Pl(Ab) Bordo	Pl(Ab) Centro	Pl(Ab) Centro	Pl(Ab) Bordo	Pl(Ab) Bordo	Pl(Ab) Centro	Pl(Ab) Bordo	Pl(Ab) Centro	K-flds (Sa)	Pl(Ab)	K-flds Centro	K-flds Bordo	Pl(Ab) Bordo	K-flds Centro	K-flds Centro	K-flds (Sa)																						
SiO ₂	69,71	69,49	69,05	69,66	69,74	69,56	69,76	69,29	69,83	70,36	66,80	69,01	65,66	65,56	69,27	66,05	65,29	69,39																						
TiO ₂	0,01	0	0,04	0,05	0	0	0,02	0	0	0,00	0	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	0,03	0																						
Al ₂ O ₃	19,7	19,59	19,51	19,41	19,4	19,53	19,66	19,54	19,35	19,48	18,81	19,83	18,25	18,45	19,65	18,60	17,97	19,85																						
FeO	0,04	0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	0,04	0,06	0,03	0	0,06	0,04	0	0,04	0,02	0,06																						
MnO	0,06	0	0	0,04	0,04	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01	0	0,02	0	0,03	0	0,04	0,01	0,02																						
MgO	0	0	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0	0,02	0	0	0,02	0																						
CaO	0,11	0,08	0,07	0,09	0,03	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,21	0,09	0,20	0,16	0,05	0,22	0,16	0,13																						
Na ₂ O	11,88	11,95	11,98	11,76	11,91	12,00	11,99	11,96	11,75	11,31	3,93	11,83	1,80	1,86	12,09	2,91	0,92	11,78																						
K ₂ O	0,04	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,01	0,04	0,02	0,05	11,09	0,07	13,80	13,72	0,07	12,16	14,31	0,04																						
Totale	101,54	101,13	100,69	101,10	101,21	101,30	101,63	100,99	101,08	101,35	100,88	100,85	99,78	99,85	101,17	100,08	98,73	101,26																						
wt%																																								
a.p.f.u.																																								
Si	3,00	3,00	2,99	3,01	3,01	3,00	3,00	2,99	3,02	3,05	3,01	2,99	3,02	3,02	2,98	3,02	3,06	2,99																						
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
Al	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,01																						
Fe (III)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01																						
Na	0,99	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,34	0,99	0,16	0,17	1,01	0,26	0,08	0,99																						
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64	0	0,81	0,81	0	0,71	0,85	0																						
Totale	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5																						
An	0,50	0,37	0,32	0,44	0,14	0,46	0,41	0,43	0,38	0,38	1,00	0,42	1,01	0,81	0,24	1,11	0,83	0,59																						
Ab	99,30	99,52	99,55	99,39	99,60	99,27	99,52	99,35	99,50	99,33	34,65	99,20	16,38	16,95	99,38	26,37	8,85	99,17																						
Or	0,20	0,10	0,13	0,17	0,26	0,27	0,07	0,22	0,12	0,28	64,34	0,38	82,62	82,24	0,38	72,51	90,31	0,23																						