

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE FIUMARE ALLARO E AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

WEATHERING OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCKS IN THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY): GENERAL ASPECTS AND EFFECTS OF THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS

EUGENIO BARRESE^(*), ANNA PELLEGRINO^(**) & ALBERTO PRESTININZI^(***)

^(*) Università degli Studi di Calabria - Dipartimento Scienze della Terra, Rende (CS) (Italy)

^(**) Autorità di Bacino, Regione Calabria - Via F. Crispi 33, Catanzaro (Italy)

^(***) Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Scienze della Terra, P.le A. Moro 5, Roma (Italy) - alberto.prestininzi@uniroma1.it

RIASSUNTO

Lo studio della morfodinamica dei versanti naturali costituisce un argomento di enorme complessità soprattutto per i differenti aspetti coinvolti, che vanno dall'assetto litologico-strutturale allo stato e tipo di attività di forme e processi, dalla circolazione d'acqua superficiale e profonda, in attinenza alle condizioni climatiche, al comportamento dell'ammasso roccioso e/o dei terreni coinvolti anche in relazione ai processi di alterazione. L'avvio di numerosi studi, in particolare sul massiccio dell'arco Calabro, inerenti le interazioni tra i processi di alterazione e gli effetti a scala di ammasso e di versante è stato finalizzato fondamentalmente alla comprensione dei fattori predisponenti e dei meccanismi d'innescio dei movimenti in massa.

I risultati riportati nel presente lavoro riguardano un'area ricadente nelle Serre ioniche calabresi all'interno del Bacino delle Fiumare Allaro ed Amusa (RC). Sull'intero territorio in esame è stata riconosciuta una franosità diffusa, legata all'interazione di diversi fattori al contorno e soprattutto agli intensi e profondi processi di alterazione del substrato cristallino-metamorfico.

Dopo una dettagliata ricostruzione del contesto geoambientale del territorio in esame, sono riportati i risultati ottenuti da una serie di analisi a carattere minero-petrografico e chimico, indirizzate a stabilire la diversa risposta al weathering dei diversi litotipi, nonché una scala di suscettibilità e le relazioni tra le relative Classi di alterazione dell'ammasso roccioso. Alcune analisi di dettaglio sono state, inoltre, condotte nell'areale di M.te Granieri-Salincriti rappresentativo di un particolare contesto geologico tipicamente diffuso lungo le porzioni perimetrali del massiccio della Sila e delle Serre calabresi. Il versante è caratterizzato dalla presenza di un importante fenomeno deformativo profondo e di una fascia di Aureola metamorfica, a cui sono fondamentalmente legati intensi processi geochimici. Le evidenze geomorfologiche, gli aspetti macroscopici e microscopici attribuibili alla presenza di un contatto termometamorfico portano a ritenere che le relazioni tra i fenomeni di alterazione chimica profonda e le conseguenze sul comportamento geomeccanico e reologico dei materiali (fasce di debolezza) costituiscano un fattore determinante nell'evoluzione del fenomeno deformativo profondo considerato. Pertanto, lo studio del caso specifico è stato sostanzialmente finalizzato alla comprensione dei processi geochimici realizzati e alla stima degli effetti a scala di

ABSTRACT

The study of natural slope morphodynamics is an extremely complex subject. Aspects to be investigated range from lithological-structural setting, state and type of activity of landforms and processes, climate and related runoff water and groundwater circulation, to behaviour of the rock mass and/or soils involved, also in response to weathering processes. Numerous studies have been conducted on the interactions between weathering processes and their effects at rock mass and slope scales, in particular on the Calabrian arc massif. These studies were basically aimed at understanding predisposing factors and triggering mechanisms of mass movements. The results reported in the paper are focused on the Allaro and Amusa river basin (Reggio Calabria, South Italy), which is located on the Ionian side of the Serre massif. Diffuse landsliding in the study area arises from the combination of multiple factors and, above all, from intense and deep weathering of the crystalline-metamorphic bedrock.

After giving a detailed account of the geoenviromental context of the area under review, the paper discusses the findings from a number of minero-petrographical and chemical analyses. These analyses were expected to: i) assess the different susceptibility of the various lithotypes to weathering; ii) develop a weathering susceptibility scale and iii) elucidate relations between the resulting weathering classes of the rock mass. Detailed analyses were also carried out in the Mt. Granieri-Salincriti slope area, typifying a geological setting which is common at the boundaries of the Sila and Serre massifs of Calabria. The slope, experiencing a deep-seated gravitational deformational process, has a metamorphic aureole which is thought to be responsible for intense geochemical decomposition processes.

Geomorphological evidence as well as macroscopic and microscopic aspects ascribable to a thermal-metamorphic contact suggest that relations between deep chemical weathering and its effects on the geomechanical and rheological behaviour of local materials (characterised by weak belts) are among the determinants of the observed deep deformations. Hence, the case study was intended to gain further insight into the geochemical processes at play and to estimate their effects at rock mass scale, with a

ammasso, nell'ottica di fornire un primo approccio nella determinazione dei volumi di ammasso esposti all'intensa alterazione chimica.

Nel loro complesso tali analisi, corredate in ogni modo da un complesso più ampio di studi e da un approccio multidisciplinare, rappresentano un significativo contributo sperimentale nell'acquisizione di dati quantitativi ai fini della costruzione di un corretto modello geologico-evolutivo di versante.

TERMINI CHIAVE: *alterazione chimico-fisica, alterazione chimica, granito, stabilità dei versanti,, Calabria, Italy*

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni l'avvio di numerosi studi, inerenti i processi morfoevolutivi dei versanti, è stato finalizzato principalmente alla comprensione dei fattori predisponenti, dei meccanismi d'innescio dei movimenti in massa e alla riduzione dei rischi a questi strettamente relazionati. In particolare, nel caso di movimenti che interessano sistemi di versante costituiti da rocce cristallino-metamorfiche esposte ad intensi processi di alterazione, l'applicazione di metodologie multidisciplinari, finalizzate alla valutazione e alla comprensione di tali processi (PRESTININZI, 1984; CALCATERRA *et alii* 1996; CRITELLI *et alii*, 1991), rappresenta una fase sostanziale nell'analisi e nella comprensione dei movimenti in massa.

I risultati della ricerca riportati nel presente lavoro riguardano un'area del Bacino delle F. Allaro ed Amusa, ricadente sulle Serre calabresi, scelta per la rappresentatività delle evidenze geologico-strutturali e geomorfologiche. Già da tempo, sull'intero territorio in esame, è stata riconosciuta, infatti, una franosità diffusa (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b; PELLEGRINO, 2000), a luoghi caratterizzata da movimenti profondi di versante (DGPV), legata all'interazione di diversi fattori al contorno e soprattutto agli intensi e profondi processi di alterazione chimico-fisica e chimica del substrato cristallino-metamorfico. Tali processi, in particolare, sono concentrati lungo e al di sopra le fasce di Aureola Metamorfica (contatti termometamorfici) e sono fondamentalmente legati all'interazione tra l'acqua di falda (secondariamente a quella d'infiltrazione) ed i solfuri presenti nelle intrusioni che si individuano lungo ed al di sopra l'aureola metamorfica (PRESTININZI, 1984).

Ricostruito dettagliatamente il contesto geoambientale del territorio in esame, sono state avviate una serie di analisi a carattere minero-petrografico e chimico, indirizzate a stabilire la suscettibilità dei diversi litotipi affioranti rispetto ai processi di alterazione (GSEGWPR, 1995; PRICE, 1995). Nel loro complesso tali analisi, corredate da un approccio multidisciplinare, assumono notevole importanza ai fini della comprensione sia dei processi di alterazione sia degli effetti sul comportamento geomeccanico e reologico dei materiali. E' in tale ottica che sono state condotte alcune analisi di dettaglio intorno all'area di M.te Granieri-Salincriti, caratterizzata da un importante fenomeno di DGPV. Le analisi sono state finalizzate alla stima degli effetti, a scala d'ammasso, cioè dei volumi affetti dagli intensi processi di alterazione chimica, connessi

view to identifying the rock volumes exposed to intense chemical alteration.

These analyses hinged on wide-ranging studies and on a multi-disciplinary approaches. Their results are expected to provide a significant experimental contribution to the acquisition of quantitative data for building a correct geological-evolutionary model of the slope.

KEY WORDS: *weathering, chemical alteration, granite, slope stability, Calabria, Italy*

INTRODUCTION

In the past few decades, multiple studies have been focused on morpho-evolutionary processes of slopes, with a view to understanding predisposing factors and triggering mechanisms of mass movements and mitigating their risks. The adoption of multi-disciplinary approaches to investigate unstable slopes consisting of crystalline-metamorphic rocks exposed to intense weathering processes has proved to be crucial to shedding light on these processes and on associated mass movements (PRESTININZI, 1984; CALCATERRA *et alii* 1996; CRITELLI *et alii*, 1991).

The findings described in the paper refer to the area of the Allaro and Amusa river basin, in the Serre massif of Calabria. The area was selected for its representativeness of geological-structural and geomorphological evidence. Diffuse landsliding with occasional deep-seated gravitational slope deformations has long been recognised in the area (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b; PELLEGRINO, 2000). These movements depend on the combination of multiple factors and, above all, on intense and deep physico-chemical and chemical weathering of the crystalline-metamorphic bedrock. These processes are concentrated along and above thermal-metamorphic contact belts. They originate, among others, from the interaction of seepage water and groundwater with the sulphides contained in the intrusions lying along and above the metamorphic aureole (PRESTININZI, 1984).

After reconstructing the geoenvironmental setting of the study area in detail, a number of minero-petrographical and chemical analyses were initiated. These analyses had the purpose of determining the weathering susceptibility of the outcropping lithotypes (GSEGWPR, 1995; PRICE, 1995). The findings from these studies, supported by a multi-disciplinary approach, play a key role in understanding both weathering and the effects of intense geochemical processes on the geomechanical and rheological properties of the materials involved. With this purpose in mind, detailed analyses were conducted around the Mt. Granieri-Salincriti area, which is experiencing a major deep-seated gravitational slope deformation. These analyses were expected to estimate the impact of a thermal-metamorphic contact on the rock mass, i.e. on the rock volumes exposed to intense chemical weathering.

These weathering-exposed rock volumes are thought to be

si alla presenza di un contatto termometamorfico.

Tali processi influenzando sul comportamento geomeccanico e reologico dell'ammasso roccioso, inducono fenomeni deformativi di creep profondo che, nella loro evoluzione parossistica possono comportare elevate condizioni di rischio (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2003; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

INQUADRAMENTO GENERALE

L'Arco Calabro-Peloritano rappresenta l'attuale stato di massima distorsione della catena Appennino-Maghrebide e raccorda gli assi NW-SE dell'Appennino meridionale con quelli E-W delle Maghrebidi. Tale torsione, con velocità ed entità di espansione massime nella parte meridionale, è legata all'attività geodinamica profonda (convergenza tra il blocco euro-asiatico e quello africano), che comporta una forte attività tettonica, con l'insorgere di terremoti e un generale sollevamento con la genesi di forti energie di rilievo. In tale contesto, l'edificio tirrenico dell'Arco Calabro risulta formato da una serie di falde sovrapposte che iniziano con un basamento cristallino pre-Mesozoico (avente marcate analogie con la struttura Austro-sudalpina; BONARDI *et alii*, 1982; VAI, 1992), coperto da una fascia meso-cenozoica con caratteristiche simili a quella delle Alpi. Si tratta di falde derivanti da tale margine alpino impilatesi inizialmente con "direzione europea". Successivamente, la struttura di rocce molto antiche, è stata trasportata in blocco con "direzione" africana ed incorporata alla catena Appenninico-Maghrebide, in fase di costruzione. Questa tendenza evolutiva, fortemente attiva nel Paleocene e Miocene, ha avuto forti impulsi nel Quaternario ed è ancora attiva. E' a questa evoluzione che deve essere attribuita la genesi di importanti discontinuità (faglie e fratture), successivamente ereditate dalle masse rocciose, e la formazione horst (alti) e graben (ampie depressioni, Graben del Crati, di Paola, di Catanzaro, del Mesima ecc.), con la deposizione all'interno di questi ultimi di terreni sedimentari continentali e marini per lo più sabbioso-argillosi e conglomeratici (TORTORICI, 1982). Sulla base dei dati ad oggi disponibili, l'Arco Calabro può essere suddiviso in macrozone, separate dalle grandi strutture depressionarie trasversali originatesi a partire dal Plio-Pleistocene: Catena Costiera-Sila; Serre-Aspromonte.

In particolare, la struttura «Serre» (Figura 1), porzione centrale dell'Arco Calabro, viene suddiviso in due unità tettoniche principali: l'Unità di Polia-Copanello (in facies granulitica; Unità dioritico-kinzigitica) e l'Unità di Stilo (metamorfite di medio e basso grado, granitoidi ercinici; AMODIO-MORELLI *et alii*, 1976), le quali sono divise dalla subunità tonalitica di Cardinale. Le rocce acide tipo granitoidi (Unità di Stilo, Unità di Cardinale; HEIKE MERLIN & LORENZONI, 1972) vengono a contatto a sud-est con le epimetamorfite erciniche e a nord-ovest con i litotipi gneissici appartenenti alla formazione dioritico-Kinzigitica *auct.* (BONARDI *et alii*, 1992). I rapporti tra i «graniti» e le metamorfite di basso grado sono tipicamente intrusivi e danno luogo a Scisti macchiettati, cornubianiti, a filoni e a vene aplitiche nelle zone di contatto. I rapporti, invece, tra le rocce granitoidi

related to the occurrence of geomechanically and rheologically weak belts. They thus play a critical role in the morphological evolution of the slope (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2003; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2005).

GENERAL SETTING

The Calabrian-Peloritan arc represents the current maximum deformation of the Apennine-Maghrebid mountain and connects the NW-SE axes of the southern Apennines to the E-W ones of the Maghrebids. This deformation with maximum velocity and magnitude of expansion in the southern part, arises from deep geodynamic activity (convergence of Euroasiatic and African plates). This activity generates strong tectonic movements, inducing earthquakes, general uplift and strong relief. In this setting, the Tyrrhenian edifice of the Calabrian arc consists of a number of multiple superimposed layers, which start with a pre-Mesozoic crystalline basement (with marked analogies with the Austrian-Southern Alpine structure; BONARDI *et alii*, 1982; VAI, 1992). This basement is covered by a Meso-Cenozoic belt whose features are similar to those of the Alps. The layers deriving from this Alpine margin were initially stacked in a "European direction". Subsequently, the very ancient rock structure was en bloc transported in an "African direction" and incorporated into the Apennine-Maghrebid chain, which was being emplaced. This evolutionary style, very active in Palaeocene and Miocene times, received strong impetus in the Quaternary and is still active. It is this evolution that is responsible for the development of major unconformities (faults and joints, subsequently inherited by rock masses), horsts (highs) and grabens (wide depressions, such as the Crati, Paola, Catanzaro and Mesima grabens, etc.). The grabens were filled by mostly sandy-clayey and conglomeratic continental and marine sediments (TORTORICI, 1982).

Based on data available so far, the Calabrian arc may be divided into macrozones, separated by large transversal depressions, whose emplacement began in Plio-Pleistocene times: Coastal Chain-Sila; Serre and Aspromonte.

In particular, the Serre massif (Figure 1), i.e. the central portion of the Calabrian arc, is divided into two main tectonic units: Polia-Copanello Unit (granulitic facies; dioritico-Kinzigitica Unit) and Stilo Unit (medium- and low-grade metamorphites, Hercynian granitoids; AMODIO-MORELLI *et alii*, 1976). These units are separated by the tonalitic Cardinale subunit. Granitoid-like acidic rocks (Stilo unit and Cardinale unit; HEIKE MERLIN & LORENZONI, 1972) come into contact with Hercynian epimetamorphites in the south-east and with gneissic lithotypes belonging to the dioritico-Kinzigitica *auct.* formation (BONARDI *et alii*, 1992) in the north-west. Relations between "granites" and low-grade metamorphites are typically intrusive and give rise to mottled schists, cornubianites, dykes and aplitic veins in contact zones. In contrast, relations

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

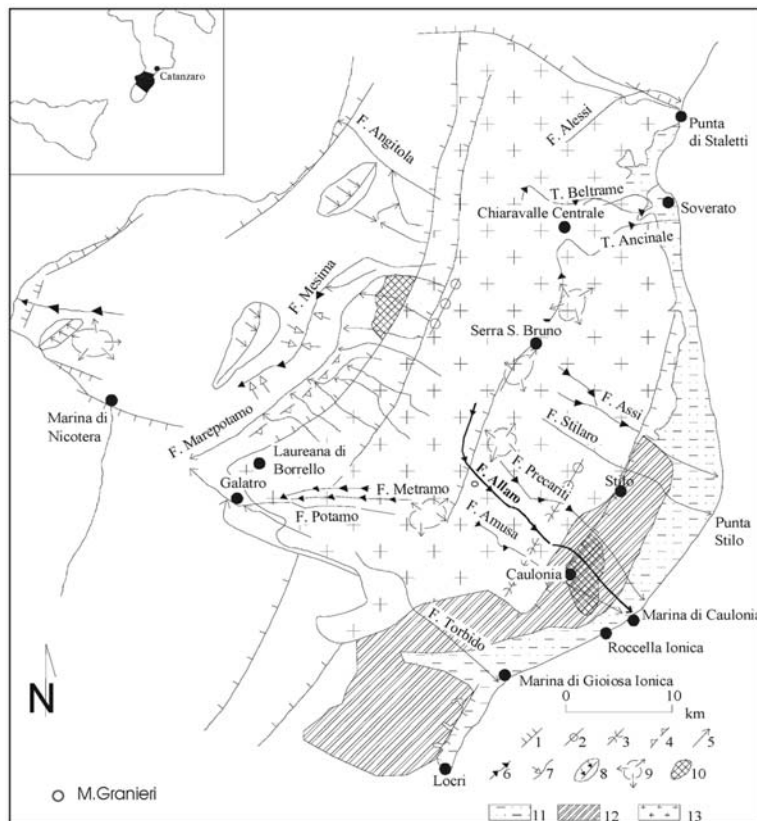


Fig. 1 - Localizzazione del Bacino delle Fiumare Allaro ed Amusa. 1) scarpate rettilinee; 2) cime allineate; 3) Selle allineate; 4) controtendenze allineate; 5) corsi d'acqua a sviluppo rettificato; 6) incisioni vallive profonde e gole; 7) confluenze controcorrente; 8) reticolati idrografici a sviluppo asimmetrico; 10) area ad erosione accelerata; 11) fascia costiera; 12) fascia intermedia; 13) fascia montana. Da FLORIS *et al.*, 2001

- Serre Massif: location of Allaro and Amusa Basin. 1) rectilinear scarps; 2) aligned peaks; 3) aligned saddles; 4) aligned counterslopes; 5) straightened rivers; 6) deep valleys and gorges; 7) counter-current confluence area; 8) asymmetrical hydrographic networks; 9) centrifugal hydrographic networks; 10) accelerated erosion area; 11) coastal belt; 12) intermediate zone; 13) mountain zone. Modified after FLORIS *et al.*, 2001

e la formazione dioritico-Kinzigitica sono caratterizzati da passaggi graduali dalle metamorfite di alto grado verso rocce con struttura granitoida attraverso zone di transizione.

QUADRO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Il versante ionico delle Serre calabre (Figura 1), in cui ricade l'area in esame, può essere suddiviso in tre fasce principali, costiera, intermedia e montana, caratterizzate da diversi e ben definiti assetti geologico-strutturali e morfologici; in tali settori affiorano, rispettivamente, terreni plio-quadernari (depositi calabrianici e pleistocenici), rocce dei cicli sedimentari che vanno dal Miocene medio al Messiniano (formazione di Stilo-Capo d'Orlando, Argille varicolori; BONARDI *et alii*, 1980) e rocce del basamento cristallino-metamorfico (Paleozoico). Sono inoltre presenti, in trasgressione sul basamento metamorfico, lembi di rocce carbonatiche (Mesozoico?).

L'area oggetto di studio è ubicata in particolare nel medio-alto Bacino delle F.re Allaro ed Amusa. Essa è caratterizzata dalla presenza di graniti e scisti biotitici, localmente con muscovite e associate granodioriti di età tardo-ercinica (circa 250 Ma), di Scisti quarzoso-biotitici e biotitico-granatiferi e di Scisti filladici e/o filladi, con spessore intorno ai 1000 m (Unità di Stilo, Paleozoico; AMODIO-MORELLI *et alii*, 1976). Il contatto tra i termini intrusivi e le rocce metamorfiche è di natura termometamorfica ed avviene tramite

between granitoid rocks and the dioritico-Kinzigitica formation are marked by zones of gradual transition from high-grade metamorphites towards granitoid-texture rocks.

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The Ionian side of the Serre massif of Calabria (Figure 1), which embodies the study area, may be distinguished into three main belts: coastal, intermediate and mountainous, with different and well-defined geological-structural and morphological settings. These belts have outcrops of Plio-Quaternary terrains (Calabrian and Pleistocene deposits), rocks of sedimentary cycles from the middle Miocene to the Messinian (Stilo-Capo d'Orlando formation, Argille varicolori formation; BONARDI *et alii*, 1980) and rocks of the crystalline-metamorphic basement (Palaeozoic), respectively. Limbs of carbonate rocks (Mesozoic?) lie transgressively over the metamorphic basement.

The study area is located in the intermediate-upper basin of the Allaro and Amusa fiumare. The area presents granites and biotitic schists, locally with muscovite and associated granodiorites of late Hercynian age (about 250 my), quartzose-biotitic and biotitic-garnetiferous, as well as phyllitic schists and/or phyllites with a thickness of approximately 1000 m (Stilo Unit, Palaeozoic; AMODIO-

un'aureola di Scisti biotitici e filladici termometamorfosati con trend NE-SW (cornubianiti o Aureola metamorfica), che insieme agli stessi termini intrusivi costituiscono la fascia di Aureola Metamorfica; il grado di termometamorfismo tende, comunque, a diminuire a poche decine di metri di distanza dal complesso intrusivo.

Gli scisti quarzoso-biotitici e biotitico-granatiferi, sono interessati da un'ondulazione anticlinale e sinclinale, talora mascherata dalle sovrastanti filladi che seguono, generalmente, le ondulazioni dei sottostanti termini metamorfici.

Il sollevamento che ha generato l'assetto dell'Arco calabro, tuttora attivo, è testimoniato dagli elevati gradienti di pendio e da un assetto morfologico giovanile. Le discontinuità per faglia, che regolano gran parte dei contatti tra i differenti litotipi, sono anche indicatori dell'elevato grado di fratturazione che caratterizza tutte le litologie a comportamento rigido. Le più importanti direttrici tettoniche presentano direzioni quasi ortogonali: NE-SW e NW-SE (PELLEGRINO *et alii*, 2006).

I caratteri geomorfologici dell'area risultano molto articolati e complessi a causa del generale assetto strutturale, della varietà dei litotipi presenti, nonché dagli intensi processi di alterazione del substrato cristallino-metamorfico. Il loro inserimento in un contesto climatico di tipo mediterraneo e geodinamico attivo, caratterizzato da elevata sismicità e forti tassi di sollevamento, e la conseguente azione erosiva delle Fiumare Allaro e Amusa generano una serie di processi, soprattutto di erosione e di frana, che rendono queste aree ad elevata pericolosità geologica (PELLEGRINO *et alii*, 2006).

ASPETTI LITOLOGICI E PETROGRAFICI

L'intensità della disgregazione fisica e della degradazione dipendono essenzialmente sia da fattori ambientali, quali le condizioni climatiche, idrogeologiche, biologiche e morfologiche, sia dalla natura della roccia madre, con il proprio assetto geostrutturale e le proprie caratteristiche fisico-meccaniche (GSEGWPR, 1995; PRICE, 1995; HILL & ROSENBAUM, 1998). Le litologie rilevate nell'area in studio sono state, pertanto, differenziate in un complesso intrusivo a composizione acida, in rocce metamorfiche di medio-alto grado, nonché in rocce metamorfiche di basso-medio grado, in funzione della relativa suscettibilità ai processi di alterazione sulla base principalmente di fattori intrinseci (petrogenesi, tessitura, struttura e composizione mineralogica).

Il complesso intrusivo (γ) è costituito da termini granitici biancastri (graniti-granodioriti tipo "le Serre"; HEIKE & LORENZONI, 1972), caratterizzati da una tessitura isotropa massiva (granulare e grossolana) e da una struttura olocristallina a grana grossa, con cristalli tra 2 e 5 mm. I costituenti principali sono quarzo, albite, k-feldspato (microclino) e biotite (Figura 3a). Quest'ultima, presente sotto forma di cristalli grossolani uniformemente distribuiti, assume ai luoghi le sembianze di lamelle riunite in pacchetti disposti irregolarmente, la cui quantità tende ad aumentare in corrispondenza del contatto termometamorfico. La muscovite e l'ornoblenite si trovano in piccole

MORELLI *et alii*, 1976). The contact between intrusive terms and metamorphic rocks is thermal-metamorphic, via an aureole of NE-SW-trending thermo-metamorphosed biotitic and phyllitic schists (cornubianites or metamorphic aureole), where the aureole and intrusive terms form the thermal-metamorphic contact belt. However, the grade of thermal metamorphism tends to decline a few tens of metres away from the intrusive body.

The quartzose-biotitic and biotitic-garnetiferous schists have an anticlinal and synclinal undulation, occasionally masked by overlying phyllites; these phyllites usually follow the undulations of underlying metamorphic terms.

Steep slopes and juvenile morphology give evidence of the uplift which gave rise to the current Calabrian arc structure and which has been operating from the Miocene to Present. Fault discontinuities, controlling most of the contacts between different lithotypes, are also indicators of the intense jointing of rocks with stiff behaviour. The most important tectonic lines have quasi-orthogonal directions: NE-SW and NW-SE (PELLEGRINO *et alii*, 2006).

The geomorphology of the area is highly diversified and complex owing to general structural setting, variety of occurring lithotypes, as well as intense weathering of the crystalline-metamorphic bedrock. This morphology, associated with Mediterranean climate, active geodynamics (high seismicity and uplift rates) and consequent erosion by the Allaro and Amusa fiumare, causes a number of processes (especially erosion and landsliding) which represent major geological hazards (PELLEGRINO *et alii*, 2006).

LITHOLOGY AND PETROGRAPHY

Grade of physical disintegration and decomposition of rocks (weathering susceptibility) is mainly dependent on environmental factors, such as climate (especially in Mediterranean areas), hydrogeology, biology and morphology, as well as on the nature of the parent rock and physico-mechanical and geomechanical properties (GSEGWPR, 1995; PRICE, 1995; HILL & ROSENBAUM, 1998). Local rocks were distinguished into an acid intrusive body, metamorphic rocks of medium-high grade and metamorphic rocks of low-medium grade, depending on their relative susceptibility to weathering and on intrinsic factors (petrogenesis, structure and mineralogical composition).

The intrusive body (γ) is made up of: i) whitish granitic terms (granites-granodiorites of "le Serre" type; HEIKE & LORENZONI, 1972) with (granular and coarse) massive isotropic texture, and ii) a coarse-grained holocrystalline structure, with crystals of 2 to 5 mm. Its main constituents are: quartz, albite, k-feldspar (microcline) and biotite (Figure 3a). Biotite occurs as evenly distributed coarse crystals, in places acquiring the appearance of lamellae; the lamellae are gathered into irregularly arranged packs, whose number tends to increase near the thermal-metamorphic contact. Muscovite and hornblende are found in small amounts, although their concentrations rise near the metamorphic aureole, where granitic terms are both migmatitic

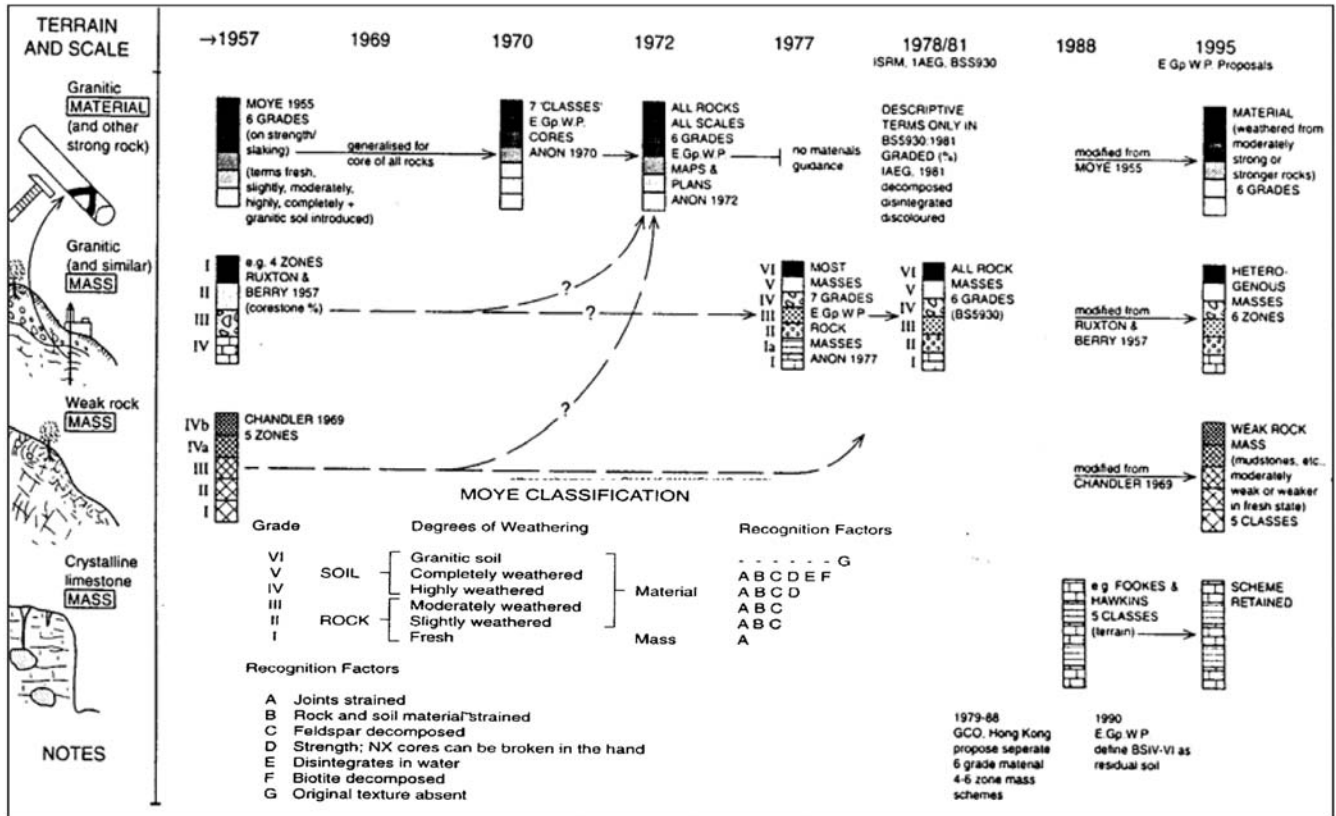


Fig. 2 - Schema evolutivo delle metodologie per la valutazione dei processi di weathering negli ammassi cristallino-metamorfici; nel caso in studio, a partire da quella di Moye, è stata effettuata una suddivisione dell'ammasso in Classi di alterazione a comportamento omogeneo (GCO, 1981) corrispondenti ad altrettante unità litotecniche. Modificata da Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995

- Evolutionary scheme of methodologies used for assessing weathering in crystalline-metamorphic rocks; in the case study, based on Moye's classification, the rock mass was distinguished into homogeneous weathering classes (GCO, 1981), corresponding to as many lithotechnical units. Modified after Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995

quantità, sebbene le concentrazioni aumentino in corrispondenza della fascia di Aureola Metamorfica, dove i termini granitici si presentano sia migmatitici che microcristallini ed intrusi all'interno delle metamorfite. Le migmatiti, con composizione tra la granodiorite e la monzonite quarzifera, conservano ancora relitti della zonatura caratteristica degli Scisti, sotto forma di un'orientazione dei minerali; l'unità perde gradualmente la tessitura orientata e passa ad un granito omogeneo. Lungo il contatto sono presenti, inoltre, filoni aplitici e pegmatitici contenenti solfuri (molibdenite, pirite, blenda, probabilmente calcopirite, greenockite e realgar; es. San Todaro, M.te Granieri-Salincriti; BONARDI *et alii*, 1982; BALDANZA & TRISCARDI, Nota preliminare), zeoliti ed epidoto (allanite, clinozoisite).

Le rocce metamorfiche di medio-alto grado sono rappresentate principalmente da Scisti biotitici (SB) e secondariamente dagli Scisti biotitico-granatiferi (SBG), assemblati in un unico litotipo ai fini della valutazione della suscettibilità. La tessitura è scistosa orientata e la struttura è cristalloblastica, con cristalli di dimensione medio-fine (0.06-0.5 mm). I costituenti fondamentali degli SB sono quarzo, albite, biotite, muscovite e sporadicamente sanidino di bassa termalità in

and microcrystalline and intruded into the metamorphites. Migmatites, whose composition ranges from granodiorite to quartziferous monzonite, preserve relics of the typical zoning of schists (mineral orientation); the unit gradually loses its oriented texture, evolving into homogeneous granite. Along the contact, also aplitic and pegmatitic dykes are encountered; these dykes contain sulphides (molybdenite, pyrite, blende, probably chalcopyrite, greenockite and realgar, e.g. San Todaro, Mt. Granieri-Salincriti; BONARDI *et alii*, 1982; BALDANZA & TRISCARDI, Preliminary Paper), zeolites and epidote (allanite, clinozoisite).

Metamorphic rocks of medium-high grade are chiefly represented by biotitic schists (BSS) and subordinate biotitic-garnetiferous schists (BGSS); these schists were assembled into a single lithotype for assessing their weathering susceptibility. Their texture is oriented and schistose and their structure is crystalloblastic (medium-fine crystals, 0.06-0.5 mm). The main constituents of BSS are quartz, albite, biotite, muscovite and sporadic sanidine of low thermalità near felsitic intrusions. In places, also hornblende, garnets and traces of zeolite are identified (Figure 3b). BSS extensive-

WEATHERING OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCKS IN THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY):
GENERAL ASPECTS AND EFFECTS OF THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS

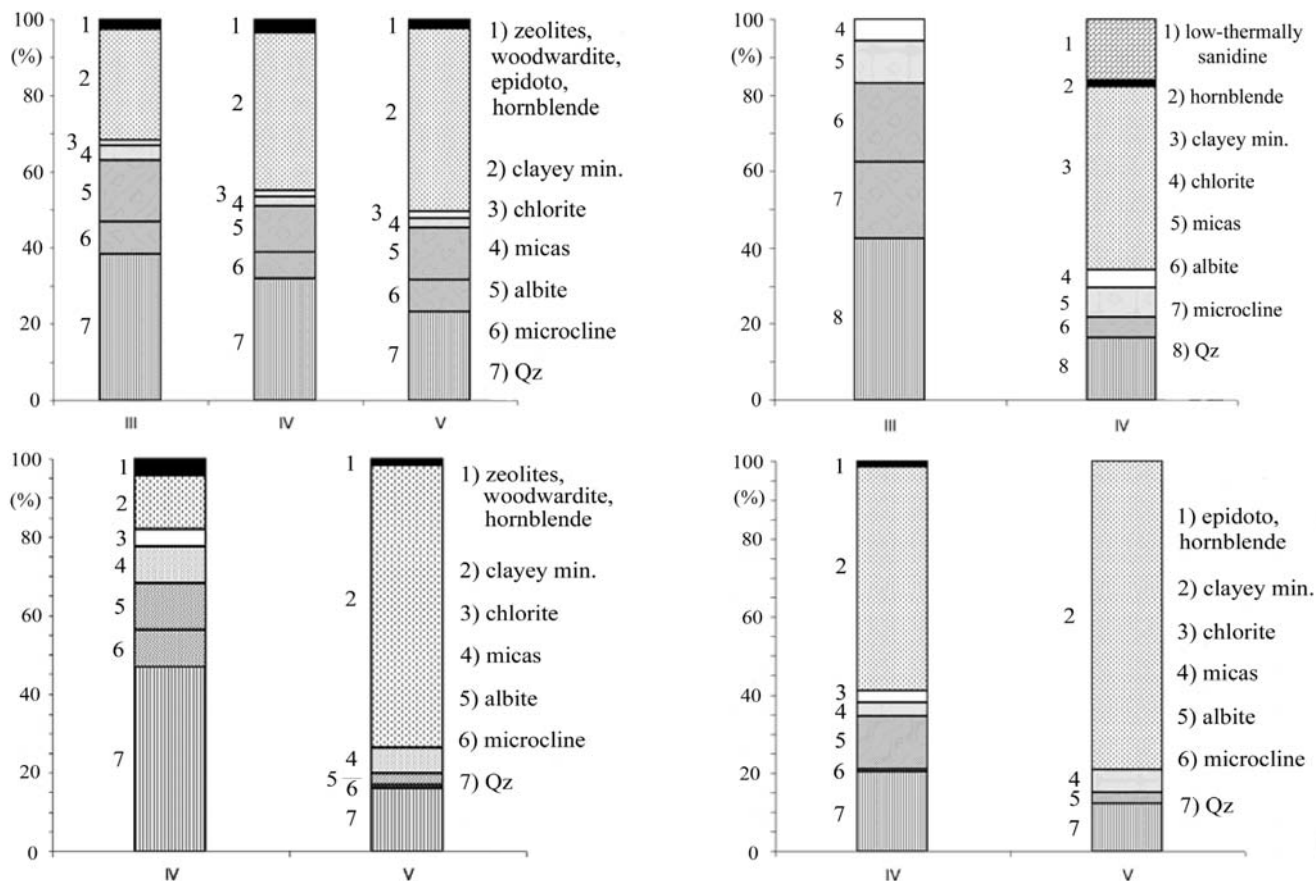


Fig. 3 - Variazione del contenuto in minerali principali (SCHULTZ, 1964) con il progredire dell'alterazione: a) Graniti (γ); b) Scisti biotitici (SB); c) Aureola Metamorfica (AM); d) Scisti filladici (SF)
- Contents of principal minerals (SCHULTZ, 1964) with advance of weathering: a) Granites (γ); b) Biotitic Schists (BSS); c) Metamorphic Aureole (MA); d) Phyllitic Schists (PSS)

corrispondenza delle intrusioni felsitiche; a luoghi si rinvencono, anche, orneblenda, granati e tracce di zeoliti (Figura 3b). Gli SB risultano ampiamente diffusi in tutta l'area in studio, mentre la seconda paragenesi metamorfica solo sporadicamente lungo la F.ra Amusa, dove si rinvencono spesso iniezioni di rocce basiche e di filoni basici ricchi di minerali ferriferi (es. M. San Blasio, BONARDI *et alii*, 1982). Gli SB, nei pressi del contatto termometamorfico (fascia di aureola Metamorfica), pur conservando la caratteristica scistosità, diventano più leucocrati per introduzione di materiale felsitico (feldspati, feldspatoidi e quarzo) fino ad avere un comportamento migmatitico e tendono a perdere la zonatura, tendenzialmente indefinita per l'incipiente omogeneizzazione. Un'altra facies delle rocce metamorfiche di medio-alto grado è rappresentata dagli Scisti termometamorfosati (hornfels, cornubianiti e/o Aureola metamorfica, AM), legati sia a processi isochimici che ad eventi metasomatici di contatto. L'aureola possiede una grana minuta tendenzialmente aphanitica, ha una composizione da pelitica a semipelitica ed una struttura granoblastica. L'associazione mineralogica è costituita prevalentemente da quarzo,

ly occur throughout the study area, while the second metamorphic paragenesis is rare along the Amusa river; here, injections of basic rocks and basic dykes rich in ferrous minerals are frequent (e.g. Mt. San Blasio, BONARDI *et alii*, 1982). In the proximity of the thermal-metamorphic contact belt, BSS retain their typical schistosity, but become more leucocratic owing to the input of felsitic material (feldspars, feldspathoids and quartz), until they acquire a migmatitic behaviour and tend to lose their zoning (already indefinite owing to incipient homogenisation). Another facies of metamorphic rocks of medium-high grade is represented by thermometamorphosed schists (hornfels, cornubianites and/or metamorphic aureole, MA), related to both isochemical processes and metasomatic contact events. The aureole has tendentially aphanitic, minute grain size, pelitic to semi-pelitic composition and granoblastic structure. The mineralogical assemblage dominantly consists of quartz, mica, albite, traces of microcline, hornblende and zeolites near pegmatic and/or hydrothermal dykes (Figure 3c). Transition from the MA to overlying BSS takes place gradually, via

miche, albite, tracce di microclino, orneblenda e zeoliti, presenti in corrispondenza dei filoni pegmatitici e/o idrotermali (Fig. 3c). Il passaggio tra AM ed i sovrastanti SB avviene in maniera graduale, attraverso termini con struttura granoblastica e tessitura scistosa. Il metamorfismo di contatto è generalmente di basso grado, anche se talvolta sono presenti piccoli ammassi di roccia di più elevato grado caratterizzati dalla presenza di granati. L'estensione dell'Aureola metamorfica è piuttosto variabile e, comunque, dell'ordine di alcune decine di metri; nell'aureola, inoltre, aumentano le iniezioni sia di filoni granitici microcristallini ed aplitici, sia di filoni pegmatitici e/o idrotermali con mineralizzazioni a solfuri prealpine (Cu, Mb, Fe, Zn etc.; BONARDI *et alii*, 1982; BALDANZA & TRISCARDI, Nota preliminare), che possono estendersi anche negli SB prossimi alla fascia di Aureola Metamorfica.

Gli Scisti filladici (SF) rappresentano, infine, le rocce metamorfiche di basso-medio grado. Essi sono costituiti da una serie di arenarie e di argilliti sabbiose dure, con fitte intercalazioni sia di lenti e noduli di quarzo (paralleli alla scistosità), sia di quarziti verdastre spesso irregolari. Risultano diffusi anche le lenti e sottili orizzonti carboniosi (carboni di basso tenore), nonché calcari cristallini arenacei non fossiliferi. Localmente affiorano anche argilliti nerastre laminate con un grado di metamorfismo piuttosto basso. Gli SF possiedono una tessitura con una intensa fissilità in superfici subparallele ed una struttura con grana fine/finissima. I minerali principali sono quarzo, biotite, albite e clorite, poca muscovite ed occasionali sericite e k-feldspato (Fig. 3d). Tali litotipi presentano una foliazione ed una scistosità collegate all'originaria stratificazione e risultano intensamente deformati ed intersecati da notevoli superfici di discontinuità.

VALUTAZIONE DEL GRADO DI ALTERAZIONE

La valutazione dei processi di weathering è stata condotta attraverso una serie di analisi chimiche e minero-petrografiche. Partendo dalle linee guida già tracciate da precedenti studi (LUMB, 1962; IRFAN & DEARMAN, 1978; LEE & DE FREITAS, 1989), la metodologia utilizzata si è basata principalmente sull'interpretazione ed interazione dei dati ottenuti da analisi su sezioni sottili, diffrattometriche e di fluorescenza, nonché dall'applicazione degli indici ritenuti più idonei per quantificare le situazioni riscontrate nel corso della ricerca. Tale approccio è stato, comunque, supportato da un dettagliato campionamento e rilievo geologico-tecnico e da prove geomeccaniche (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006; PELLEGRINO *et alii*, 2006). Tale approccio, in funzione della suscettibilità delle litologie investigate, ha consentito di definire per ciascuna litologia le relative Classi di alterazione (GCO, 1984): quattro stadi di alterazione (Figura 2; GCO, 1984) che, sia orizzontalmente sia verticalmente, presentano un trend non lineare dei profili di alterazione; ogni stadio è infatti caratterizzato dall'alternarsi di roccia sciolta nei livelli più alterati, da completamente alterata a suolo residuale (Classe V-VI), a roccia tenera e/o litoide da moderatamente ad altamente alterata (Classe III-IV).

terms with granoblastic structure and schistose texture. Thermal-metamorphism is generally of low grade, albeit with small, garnet-containing rock masses of higher grade. The extent of the metamorphic aureole is fairly variable and, anyway, in the range of some tens of metres. The aureole also displays increasing injections of microcrystalline, aplitic, granitic dykes and of pegmatitic and/or hydrothermal dykes with pre-Alpine sulphide mineralisations (Cu, Mb, Fe, Zn etc.; BONARDI *et alii*, 1982; BALDANZA & TRISCARDI, Preliminary Paper). These injections may also extend to the BSS near the thermal-metamorphic contact belt.

Finally, phyllitic schists (PSs) represent the metamorphic rocks of low-medium grade. They are composed of a series of: i) sandstones and hard sandy argillites, densely interbedded with quartz lenses and nodules (parallel to schistosity), and often irregular greenish quartzites. Low-carbon lenses and thin horizons, as well as non-fossiliferous, arenaceous, crystalline limestones are common. Locally, blackish laminated argillites with fairly low grade of metamorphism also outcrop. The PSs have highly fissile subparallel-surface texture and fine/very-fine grain size. The principal minerals are quartz, biotite, albite and chlorite, scarce muscovite and occasional sericite and k-feldspar (Figure 3d). These lithotypes have bedding-dependent foliation and schistosity and are intensely deformed and intersected by large discontinuity surfaces.

ASSESSMENT OF WEATHERING DEGREE

Chemical and minero-petrographical analyses assessed the microscopic aspects of weathering. Based on guidelines given in prior studies (LUMB, 1962; IRFAN & DEARMAN, 1978; LEE & DE FREITAS, 1989), the methodology of this study mostly relied on the interpretation and association of thin-section, diffractometry and fluorescence data, as well as on the application of the indexes most suitable for quantifying the collected data. This approach was supported by detailed sampling and geological-engineering surveys, as well as by geomechanical tests (PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006; PELLEGRINO *et alii*, 2006). Weathering classes (GCO, 1984) were thus defined for each of the investigated lithologies, depending on their weathering susceptibility. Four weathering stages were distinguished (Figure 2; GCO, 1984), whose profiles have a non-linear trend, both horizontally and vertically. Indeed, this trend identifies alternations of: i) loose rock in the most weathered levels, from completely weathered rock to residual soil (Classes V-VI) and ii) moderately to highly weathered soft and/or lithoid rock (Classes III-IV).

To get a fairly representative picture of the different weathering stages of the investigated lithotypes, detailed sampling was carried out on natural sections, taking into account field surveys, macro-

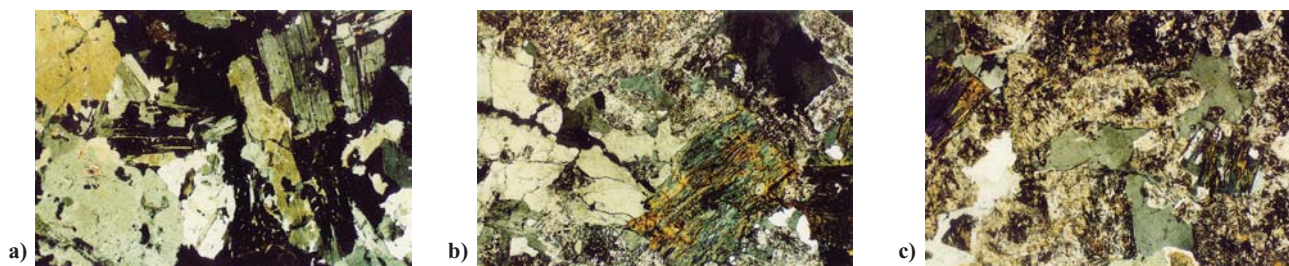


Fig. 4 - Sezione sottile su Graniti: a) moderatamente alterati; b) altamente alterati; c) completamente alterati
- Granite microscopy section: a) moderately weathered; b) highly weathered; c) completely weathered

Allo scopo di avere un quadro sufficientemente rappresentativo dei diversi stadi di alterazione è stata effettuata una campionatura di dettaglio su sezioni naturali, tenendo conto delle osservazioni emerse dal rilievo di campagna, delle caratteristiche macroscopiche e della presenza dei contatti termometamorfici (fasce di Aureola Metamorfica; PELLEGRINO *et alii*, 2006).

Alcuni controlli su sezione sottile al microscopio petrografico hanno condotto ad una prima valutazione qualitativa del grado di alterazione (LEE & DE FREITAS, 1989).

Relativamente alle analisi diffrattometriche, i dati ottenuti sono stati trattati attraverso due fasi distinte. Nella prima fase i dati, derivati dall'interpretazione dei diffrattogrammi e relativi al conteggio di ciascun minerale individuato (numero di colpi, N_i), sono stati trasformati in percentuale (%). Nella successiva fase di sintesi i dati sono stati gestiti nel seguente modo: suddivisione in funzione dei vari stadi di alterazione, desunti dall'analisi macroscopiche e da una prima valutazione attraverso il controllo su sezione sottile; valutazione del contenuto in minerali per ciascun litotipo; confronto tra le medie dei valori per stadi diversi di alterazione; individuazione del trend del contenuto in minerali con l'alterazione.

Sulla base del contenuto in minerali più vulnerabili, è stata effettuata una valutazione semiquantitativa del trend dell'alterazione attraverso l'indice mineralogico IAdiff (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a).

$$IAdiff = \frac{\% \text{ minerali argillosi}}{\% (\text{feldspati} + \text{miche})}$$

Nel Complesso intrusivo acido una prima valutazione qualitativa del grado di alterazione, attraverso il controllo su sezione sottile, ha messo in luce che i termini moderatamente alterati (Classe III; Figura 4a) sono caratterizzati da scarsa clorite, sericite ed ossidi a spese dell'ornblenda, dell'albite, dei k-feldspati e delle biotiti; i minerali primari sono moderatamente decomposti e presentano una microfratturazione. I litotipi più alterati (Classe IV; Figura 4b) mostrano un incremento della concentrazione in clorite; pressoché tutti i plagioclasti, le biotiti, l'ornblenda e molti k-feldspati sono altamente trasformati e fratturati, in dipendenza all'apertura delle

scopiche features and occurrence of thermal-metamorphic contact belts (PELLEGRINO *et alii*, 2006).

A preliminary qualitative assessment of weathering degree was made by thin-section petrographical microscopy (LEE & DE FREITAS, 1989).

Diffractometric data were processed in two steps. In the first step (analysis), diffractogram data and counts (number of blows, N_i) for each of the identified minerals were converted to percentages (%). In the second step (synthesis), data were handled as follows: i) grouping according to the various weathering stages (inferred from macroscopic analyses; ii) preliminary assessment via thin-section analysis; iii) determination of mineral content of each lithotype; iv) comparison between averages of values for different weathering stages, and v) identification of mineral content trend with the advance of weathering.

Based on the content of the most vulnerable minerals, the weathering trend was evaluated semi-quantitatively via the IAdiff mineralogical index (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a).

$$IAdiff = \frac{\% \text{ clayey minerals}}{\% (\text{feldspars} + \text{micas})}$$

In the acid intrusive body, a preliminary qualitative assessment of weathering degree via thin-section microscopy indicated that moderately weathered terms (Class III; Figure 4a) have scarce chlorite, sericite and oxides at the expense of hornblende, albite, k-feldspars and biotites. Primary minerals are moderately decomposed and microcracked. The highly weathered rocks (Class IV; Figure 4b) show increased chlorite concentrations. Almost all plagioclases, biotites, hornblende and many k-feldspars are highly altered and fractured owing to opening of microcracks. The most advanced alteration stage (Class V; Figure 4c) is signalled by a further increase in chlorite, appearance of clayey minerals (detected by diffractometry) and complete weathering of feldspars and biotites. At the same time, significant aperture of microcracks and of contacts between minerals, with the tendency to lose their original crystalline habit, was observed. Interpretation and processing of diffractograms also evi-

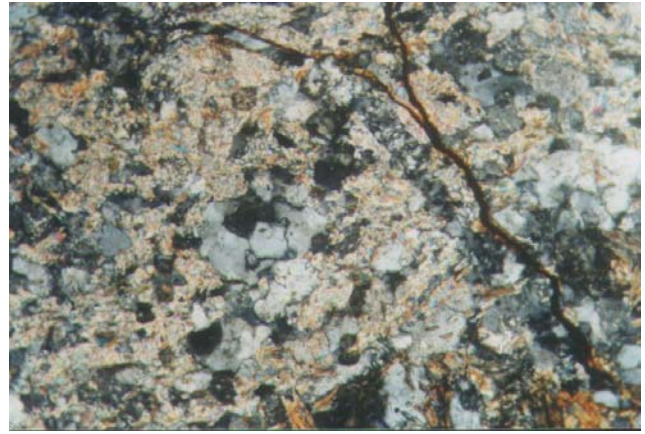


Fig. 5 - Sezione sottile su Aureola metamorfica: a) altamente alterata (a sinistra); b) completamente alterata (a destra)
- *Metamorphic aureole microscopy section: a) highly weathered (left); b) completely weathered (right)*

microfratture. Lo stadio più avanzato delle trasformazioni (Classe V; Figura 4c) è indicato da un ulteriore incremento della clorite, dalla comparsa di minerali argillosi (evidenziati dalle analisi diffrattometriche) e dalla completa alterazione dei feldspati e delle biotiti. Contemporaneamente è stata osservata una notevole apertura delle microfratture e dei contatti fra i minerali, con tendenza alla cancellazione dell'originario abito cristallino. L'interpretazione e l'elaborazione dei diffrattogrammi hanno, inoltre, evidenziato che i contenuti di albite, microclino e miche subiscono un generale decremento dai termini moderatamente (Classe III) a quelli completamente alterati (Classe V) e che i minerali argillosi presentano una crescita quantitativa col procedere dell'alterazione (Figura 3a); tra i minerali di neo-formazione vi sono clorite, caolinite, smectiti e tracce di halloysite e woodwardite.

Il controllo su sezione sottile di campioni prelevati in corrispondenza dell'AM e degli SB ha evidenziato che i termini moderatamente alterati (Classe III) contengono ossidi di ferro e sericite, derivanti rispettivamente dall'incipiente alterazione delle miche e dell'albite, talvolta anche del k-feldspato quando presente. Il passaggio allo stadio altamente alterato (Classe IV, Figura 5a) è segnato da un incremento del contenuto di clorite e di ossidi a spese dei feldspati, delle biotiti e dell'anfibolo (molto scarso o sporadico), i quali sono altamente decomposti e microfratturati. Nei termini saprolitici, infine, si nota un ulteriore incremento della clorite, la presenza di altri minerali argillosi, nonché un notevole decremento del contenuto di albite che, come le biotiti, è quasi completamente destrutturata e fratturata (Figura 5b). Le analisi diffrattometriche relative alle cornubianiti hanno confermato un trend decrescente, da moderatamente a completamente alterati (albite e miche) (Figura 3c) e crescente per i prodotti di alterazione (clorite, caolinite e tracce di smectiti).

L'elaborazione dei dati diffrattometrici relativi agli SB ha confermato un trend del contenuto in albite e miche rispettivamente decrescente e moderatamente decrescente, nonché crescente per i prodotti di alterazione (caolinite e smectiti; Figura 3b); il fondo alto dei dif-

dendati che albite, microclino e mica generalmente decrease when passing from moderately weathered terms (Class III) to completely weathered ones (Class V) and that clayey minerals increase with the advance of weathering (Figure 3a); among newly-formed minerals: chlorite, kaolinite, smectites and traces of halloysite and woodwardite.

Thin-section inspection of samples collected from the MA and BSs showed that moderately weathered terms (Class III) contain iron oxides and sericite, which derive from incipient alteration of micas and albite (at times also of k-feldspar, where present), respectively. Transition to the highly weathered class (Class IV, Figure 5a) is recorded by growing contents of chlorite and oxides to the detriment of feldspars, biotites and amphibole (very scarce or sporadic), which are highly decomposed and microcracked. Finally, saprolitic terms display a further rise in chlorite, occurrence of other clayey minerals and a sharp drop in albite, which is almost totally decomposed and fractured, like biotites (Figure 5b). Diffractometry on cornubianites confirmed a downward trend of albite and micas when passing from moderately to completely weathered terms (Figure 3c) and an upward trend of weathering products (chlorite, kaolinite and traces of smectites).

Processing of diffractometric data for BSs corroborated a downward trend and a moderately upward trend of albite and micas, respectively, as well as an upward trend of weathering products (kaolinite and smectites; Figure 3b); the high bottom part of diffractograms is due to the occurrence of metal elements.

Finally, with the advance of exogenous alteration (highly and/or completely weathered terms, Class V), PSs exhibited a general increase in chlorite, the appearance of kaolinite and traces of smectites. At the same time, a declining concentration of albite, almost totally altered, and the disappearance of the already sporadic k-feldspars and amphibole, were observed. The high values of the bottom part of the diffractogram are likely to be due to carbonaceous terms. Diffractometric analyses revealed a declining

frattogrammi è legato all'esistenza di elementi metallici.

Per gli scisti filladici (SF) sono stati osservati, infine, con il progredire dell'alterazione esogena (termini altamente e/o completamente alterati, Classe V), un incremento generale della concentrazione della clorite, la comparsa della caolinite e tracce di smectiti a cui corrisponde un conseguente decremento della concentrazione dell'albite, pressoché totalmente trasformata, ed un completo annullamento degli sporadici k-feldspati ed anfibolo; i valori elevati del fondo del diffrattogramma sono connessi molto probabilmente alla presenza di termini carboniosi. Le analisi diffrattometriche hanno evidenziato con il progredire dell'alterazione un trend decrescente del contenuto in albite, un debolissimo decremento delle miche ed un notevole aumento dei prodotti di alterazione (Figura 3d).

Relativamente a tutti i litotipi analizzati, l'approccio semiquantitativo riguardante l'applicazione dell'indice mineralogico, ha comunque confermato un trend crescente col procedere del grado di alterazione (Figura 6).

Le analisi di fluorescenza sono state eseguite sia per una verifica dei risultati ottenuti dalle analisi mineralogiche sia per analizzare e quantificare i processi di alterazione chimica profonda lungo le fasce di Aureola Metamorfica. I campioni sottoposti alle analisi chimiche sono stati scelti per la loro rappresentatività, soprattutto delle condizioni di alterazione ampiamente diffuse in corrispondenza dei contatti termometamorfici (es M. Granieri-Salincriti, loc. San Todaro). I risultati sono stati minuziosamente confrontati con quanto emerso dagli esami macroscopici e diffrattometrici dei campioni. I confronti hanno avuto lo scopo di: i) definire il trend del contenuto degli elementi maggiori; ii) elaborare un indice chimico sulla base della variazione degli elementi ritenuti più rappresentativi dell'andamento dell'alterazione; iii) confrontare i dati mineralogici e chimici, per una

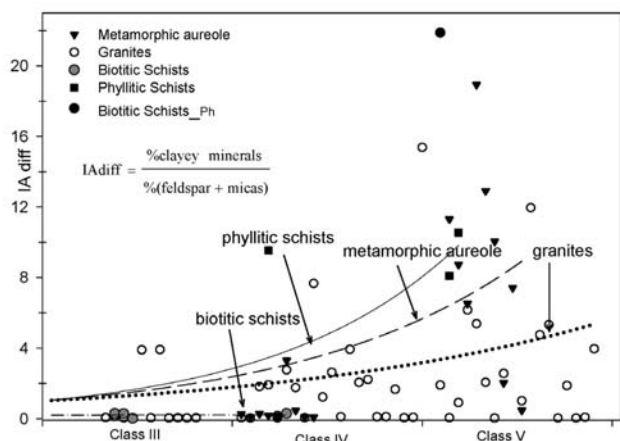


Fig. 6 - Trend dell'indice mineralogico con il progredire dell'alterazione; negli scisti biotitici termometamorfosati e negli scisti biotitici, in corrispondenza delle intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali, è evidente la maggiore vulnerabilità per gli effetti dei processi geochimici
- Mineralogical index with advance of weathering; on metamorphic aureole and biotitic schists, close to pegmatites, the index shows significant susceptibility due to effects of geochemical processes

trend of albite concentration, a slight decrease in micas and a sharp increase in weathering products with the advance of weathering (Figure 3d).

The semi-quantitative approach with application of the mineralogical index to all the investigated lithotypes confirmed an upward trend with the advance of weathering (Figure 6).

Fluorescence analyses had the purpose of validating the results of mineralogical analyses, as well as of investigating and quantifying deep chemical decomposition processes along thermal-metamorphic contact belts. Samples for chemical analyses were selected on the basis of their representativeness, especially of the most common conditions of weathering near thermal-metamorphic contacts (e.g. Mt. Granieri-Salincriti, San Todaro site). Results were meticulously compared with findings from macroscopic and diffractometric examination of samples. These comparisons were intended to: i) define the trend of the content of major elements; ii) develop a chemical index based on variations of the most representative elements of the trend of weathering; iii) compare mineralogical and chemical data for a more thorough characterisation of the processes under study.

Generally, chemical analyses on samples collected from the intrusive body and from the MA showed an upward trend of Al_2O_3 , MgO , FeO , Fe_2O_3 , TiO_2 and MnO and a downward trend of alkalis (Na_2O+K_2O), CaO and SiO_2 . Processing of these data yielded a alteration chemical index.

$$IAch = \frac{Al_2O_3 + MnO + MgO + FeO + Fe_2O_3 + TiO_2}{Na_2O + K_2O + CaO + SiO_2}$$

The IAch index tends to increase with weathering and with respect to the IA diff mineralogical index (Figures 7, 8). The results

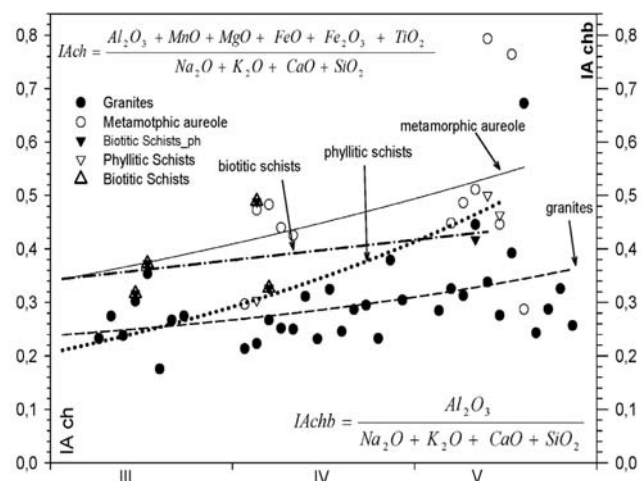


Fig. 7 - Trend degli indici chimici, IAch e IAchb, con il progredire dell'alterazione
- Chemical indexes, IAch and IAchb, with the advance of weathering

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

caratterizzazione più approfondita dei processi realizzati.

In generale, le analisi chimiche su campioni prelevati nel complesso intrusivo e nell'AM hanno evidenziato un trend crescente del contenuto in Al_2O_3 , MgO , FeO , Fe_2O_3 , TiO_2 e MnO e decrescente per gli alcali (Na_2O+K_2O), CaO e SiO_2 , dalla cui elaborazione è stato così definito un indice chimico di alterazione.

$$IA_{ch} = \frac{Al_2O_3 + MnO + MgO + FeO + Fe_2O_3 + TiO_2}{Na_2O + K_2O + CaO + SiO_2}$$

L'indice IA_{diff} mostra, in ogni modo, una tendenza crescente sia all'aumentare dell'alterazione che rispetto all'indice di alterazione chimica (Figure 7 e 8). In corrispondenza degli SF e SB, benché il numero dei campioni sia stato esiguo, è stata osservata una congruenza con quanto ottenuto per gli altri litotipi. In particolare, nelle metamorfiti di medio-alto grado è stato misurato un aumento in FeO e MnO ed una diminuzione in Fe_2O_3 , TiO_2 e MgO . La maggiore mobilità di quest'ultimi elementi è dovuta al loro contenuto iniziale, in quantità superiori rispetto ai termini intrusivi e cornubianitici, alla composizione minera-

obtained for PSS and BSS (though the number of samples collected from them was very small) were consistent with those obtained for other lithotypes. In particular, in metamorphites of medium-high grade, FeO and MnO increased and Fe_2O_3 , TiO_2 and MgO decreased. The greater mobility of the latter elements is due to their initial content (higher than in intrusive and cornubianitic terms), to the mineralogical composition of the parent rock, to chemical processes during petrogenesis and to inter-molecular links. Consideration was thus given only to major elements whose interaction gave an increasing trend of the IA_{chb} index vs. weathering and mineralogical index.

Ultimately, thin-section analysis was carried out on intrusive terms, quantitatively assessing them and subsequently applying a petrographical weathering index ($IA\%$; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a).

The analysis was confined to intrusive terms because weathering processes are better discernible in them with this approach. Results showed an increase of the $IA\%$ index both with the advance

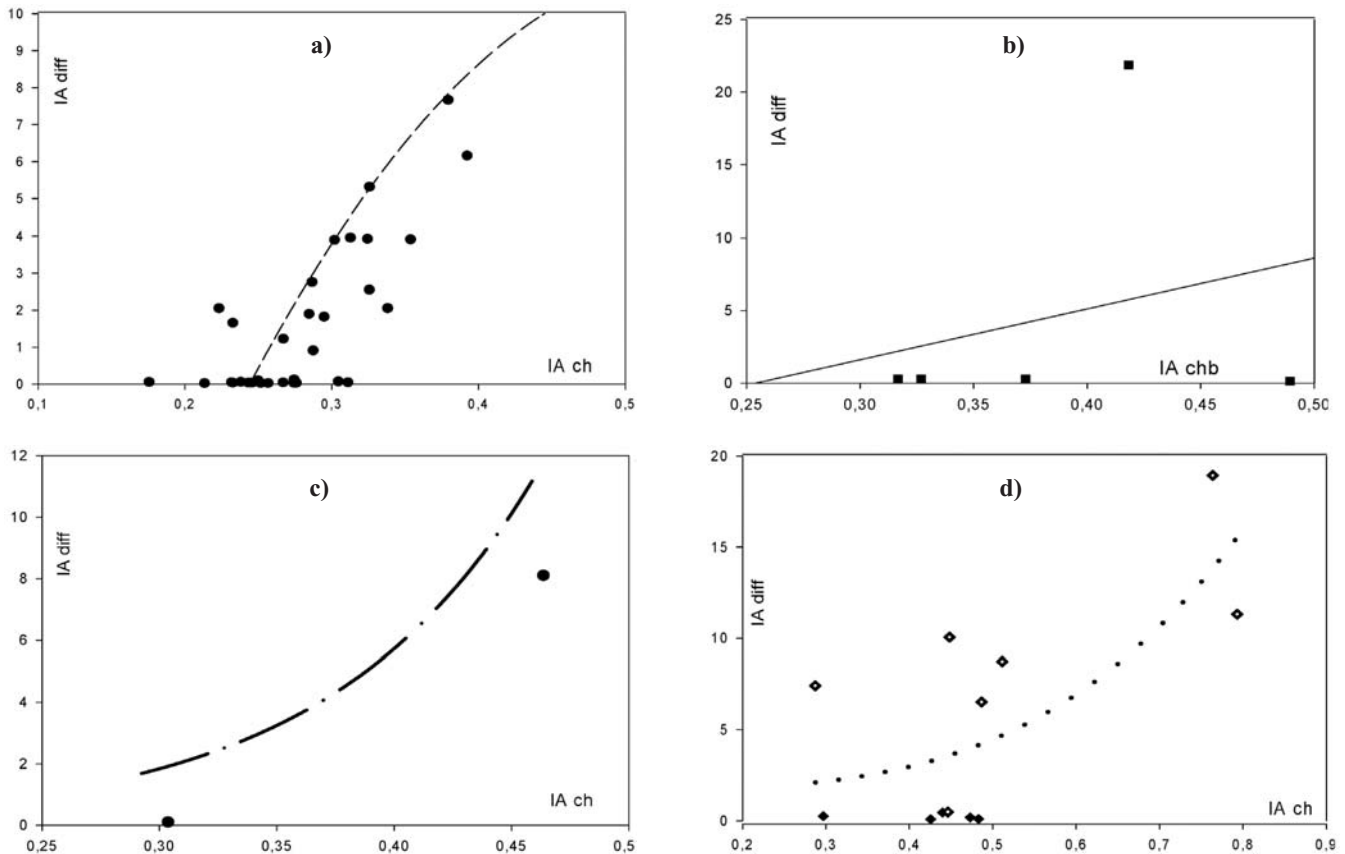
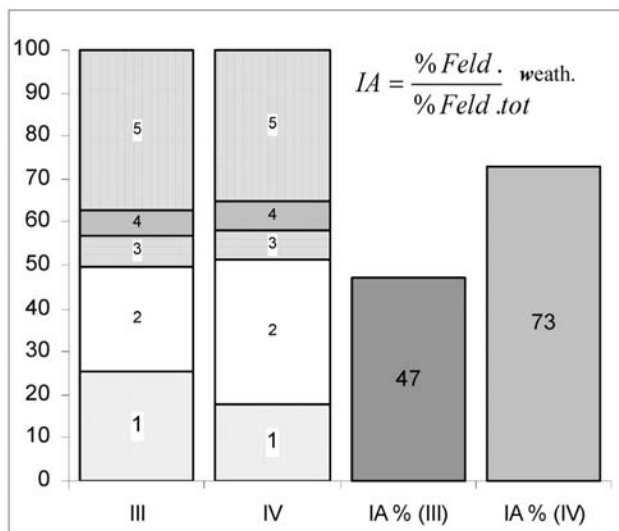


Fig. 8 - Relazioni sperimentali tra gli indici IA_{diff} e IA_{ch}/IA_{chb} col procedere dell'alterazione : a) graniti; b) scisti biotitici; c) scisti filladici; d) aureola metamorfica
- Experimental relations between IA_{diff} and IA_{ch}/IA_{chb} with the advance of weathering: a) granites; b) biotitic schists; c) Phyllitic schists; d) metamorphic aureole



logica della roccia madre, ai processi chimici verificatisi durante la loro petrogenesi e ai legami inter-intramolecolari. Per tali motivi sono stati presi in considerazione solo alcuni elementi maggiori dalla cui interazione l'indice risultante IA_{Chb} ha evidenziato un trend crescente rispetto l'alterazione e l'indice mineralogico.

In ultima analisi è stato condotto un controllo di sezioni sottili relative ai termini intrusivi, attraverso una valutazione quantitativa e la successiva applicazione di un indice di alterazione petrografico (IA%; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a).

La sola applicazione sui termini intrusivi è dovuta prioritariamente al fatto che i processi di alterazione sono meglio riconoscibili. I risultati raggiunti hanno rilevato un aumento dell'indice IA% sia col procedere dell'alterazione che dal confronto con IA_{diff} (Figura 9 a,b). Eventuali difformità con gli esiti ottenuti dalle analisi diffrattometriche sono insite nel diverso grado di sensibilità strumentale. D'altra parte le analisi mineralogiche hanno messo in luce la presenza di prodotti di alterazione come minerali argillosi ($2\theta=19^\circ$) che al microscopio sono poco facilmente distinguibili.

M.TE GRANIERI-SALINCRITI

Ai fini dell'analisi dei fenomeni di alterazione chimica, legati alla presenza di contatti termometamorfici, è stato individuato un versante, in destra idrografica della Fiumara Allaro (M. Granieri-Salincriti), caratterizzato da importanti movimenti gravitativi profondi di tipo Sackung (Zischinsky *sensu*), a cui si associano grandi frane, rockavalanche, che fanno da corredo al più esteso processo deformativo (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b) (Tabella 1; Figura 10).

L'esistenza di intensi processi di alterazione chimica è stata evidenziata da numerose osservazioni di campagna, dalla presenza di livelli di silice amorfa, di caolinite nelle fratture dell'ammasso roccioso e di minerali di neoformazione come la woodwardite (Figura

Fig. 9a - Valutazione dei processi di alterazione nei termini granitici moderatamente ed altamente alterati (Classe III, IV). 1) Feldspati non alterati; 2) Feldspati alterati; 3) Biotite; 4) Clorite; 5) Quarzo, Muscovite, minerali secondari

-- Weathering processes in moderately and highly weathered granites (Classes III and IV). 1) Unweathered Feldspars; 2) Weathered Feldspars; 3) Biotite; 4) Chlorite; 5) Quartz, Muscovite, secondary minerals

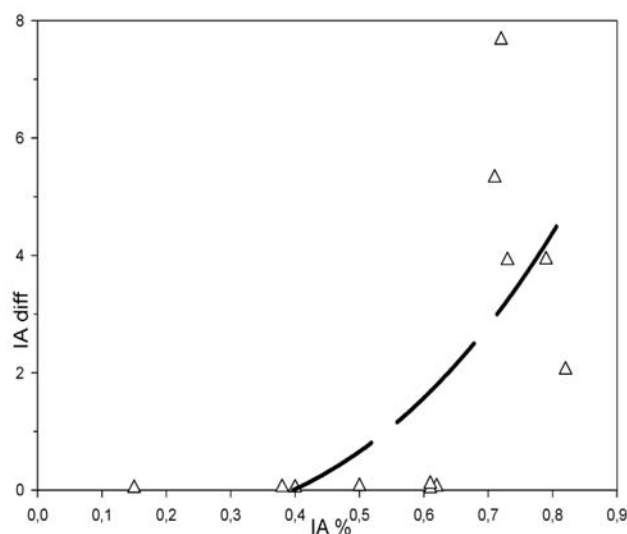


Fig. 9b - Relazione sperimentale tra l'indice mineralogico e quello diffrattometrico nei termini granitici, con l'avanzare dei processi di alterazione (Classes III, IV)

- Experimental relation between mineralogical and diffractometric indexes in granites with the advance of weathering (Classes III and IV)

of weathering and as against IA_{diff} (Figures 9 a,b). Deviations, if any, with respect to diffractometric results are due to instrumental sensitivity. Mineralogical analyses highlighted the presence of weathering products, such as clayey minerals ($2\theta=19^\circ$), which are hardly distinguishable under the microscope.

MT. GRANIERI-SALINCRITI

With a view to analysing chemical weathering processes related to thermal-metamorphic contact belts, a slope on the left bank of the Allaro river (Mt. Granieri-Salincriti) was identified. The slope is experiencing a major deep gravitational deformation of Sackung type (Zischinsky *sensu*) with associated active large landslide rock avalanches (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979b) (Table 1; Figure 10)

Intense chemical weathering was evidenced by numerous field surveys, occurrence of amorphous silica levels, of kaolinite in rock mass joints and of newly-formed minerals, such as woodwardite (Figure 11; NICKEL, 1976; BARRESE *et alii*, 1985). Woodwardite is an aluminium and copper sulphhydrate of epigenetic origin and deposition. This mineral represents the direct consequence of

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA
(MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

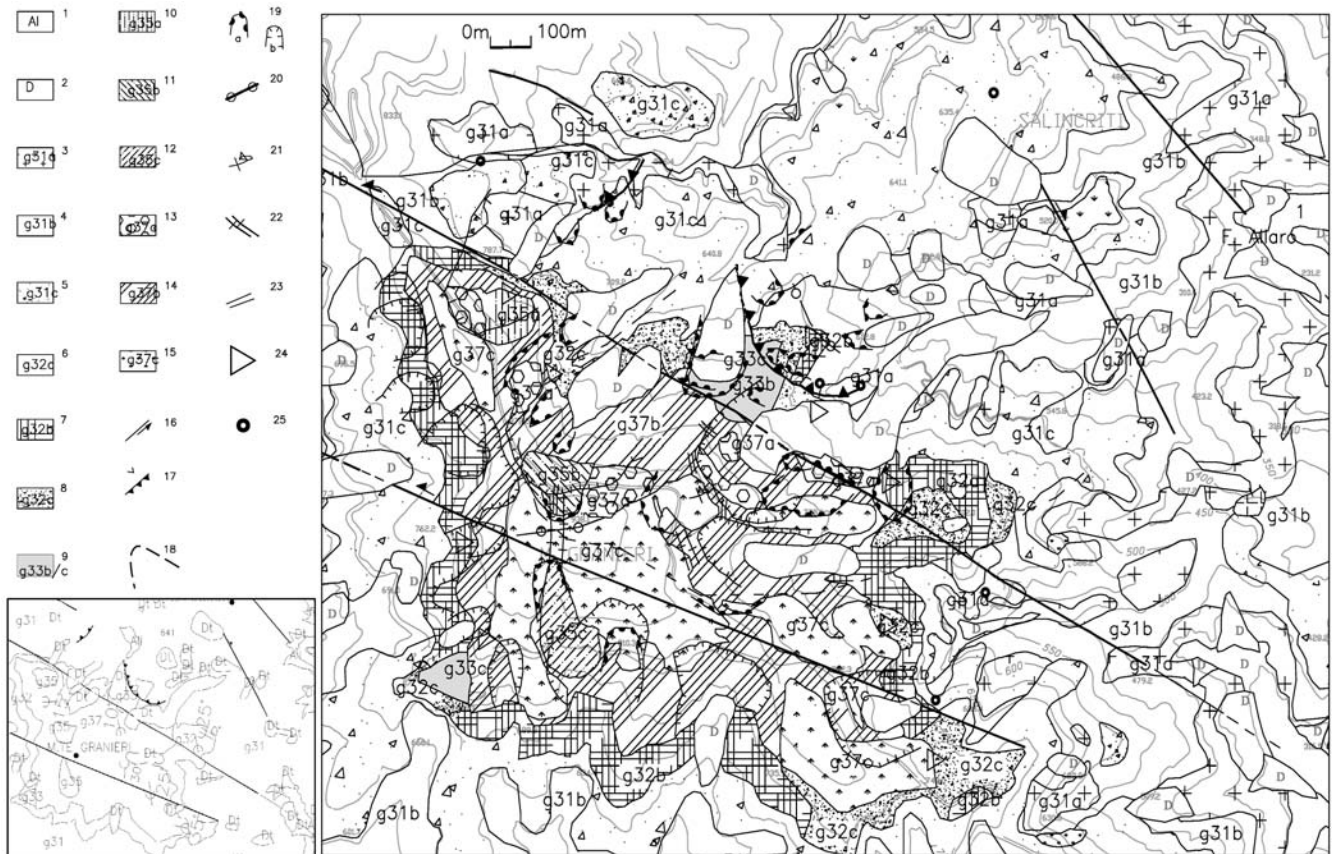


Fig. 10 - Assetto geologico-tecnico e geomorfologico di M.te Granieri Salincriti: 1) Alluvioni (Olocene); 2) Detrito di frana/Depositi di conoidi; (Paleozoico) Complesso intrusivo acido; 3) Classe III; 4) Classe IV; 5) Classe con coperture di Classe VI. Scisti biotitici termometamorfosati; 6) Classe III; 7) Classe IV; 8) Classe V con coperture di Classe VI. Cornubianiti con elevate concentrazioni di intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali; 9) Classe IV/V. Scisti biotitici con intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali; 10) Classe III; 11) Classe IV; 12) Classe V. Scisti biotitici; 13) Classe III; 14) Classe IV; 15) Classe V con coperture di Classe VI; 16) Faglia trascorrente con debole componente distensiva; 17) Faglia inversa; 18) DGPV; 19) Scarpata di frana (a-attiva; b-quiete); 20) Doppia cresta; 21) Terrazzo in controtendenza; 22) Trincea; 23) Zona di trazione e/o fatturazione; 24) Sorgenti 4.5<pH<5; 25) Sorgenti pH<4. Modificato da PELLEGRINO, 2000

- *Engineering-geological sketch map of Mt. Granieri-Salincriti: 1) Alluvial deposits (Olocene); 2) Landslide debris or Debris-flow fan; Granites; 3) Class III; 4) Class IV; 5) Class V with Class VI. Thermo-metamorphosed Schists; 6) Class III; 7) Class IV; 8) Class V with Class VI. Thermo-metamorphosed Schists with pegmatites; 9) Classes IV/V. Schists with pegmatites; 10) Class III; 11) Class IV; 12) Class V. Biotitic Schists; 13) Class III; 14) Class IV; 15) Class V with Class VI; 16) Strike-normal fault; 17) Inverse fault; 18) Advanced stage of the DSGSD; 19) Main landslide scarp (a-active; b-quiet); 20) Double crest; 21) Counterslope terrace; 22) Trench; 23) Jointed zone; 24) Springs 4.5<pH<5; 25) Springs pH<4. After PELLEGRINO, 2000*

11; NICKEL, 1976; BARRESE *et alii*, 1985); si tratta di un solfato idrato di alluminio e rame di origine e deposizione epigenetica direttamente conseguenziale ai processi geochimici in atto, che si presenta come sottili patine o incrostazioni pulverulenti blu-verdastre.

I suddetti processi sono legati all'interazione tra l'acqua d'infiltrazione profonda, dovuta alla presenza di una falda, ed i solfuri contenuti nelle intrusioni aplitiche/pegmatitiche. Le intrusioni sono localizzate specialmente lungo l'Aureola metamorfica (AM) (20-50 m), e si diramano nei sovrastanti SB sotto forma di intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali.

A conferma dei processi analizzati sono state registrate, infine, elevate concentrazioni di acido solforico e fluoridrico, legate rispettivamente all'ossidazione dei solfuri e all'alterazione delle miche

ongoing geochemical processes and appears as blue-greenish thin patinae or pulverulent incrustations.

These geochemical processes derive from interaction of surface water seepage and groundwater circulation with the sulphides contained in aplitic/pegmatitic intrusions. The latter intrusions are mostly found along the metamorphic aureole (MA) (20-50 m) and they propagate to the overlying BSs as pegmatitic and/or hydrothermal intrusions.

Finally, the investigated processes were also testified by high concentrations of sulphuric and hydrofluoric acids (depending on sulphide oxidation and mica weathering, respectively, Table 1); pH values near springs (all linear) were equal to 4.5-5 along the contact and lower than 4 (at times down to 2.5) in the weathered

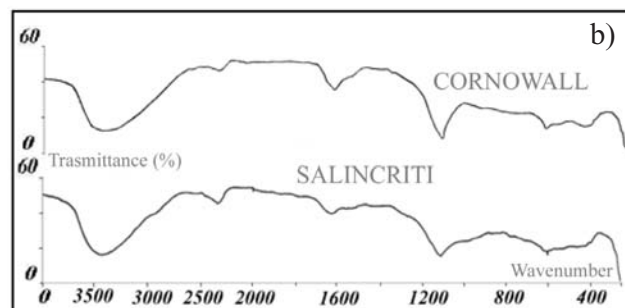
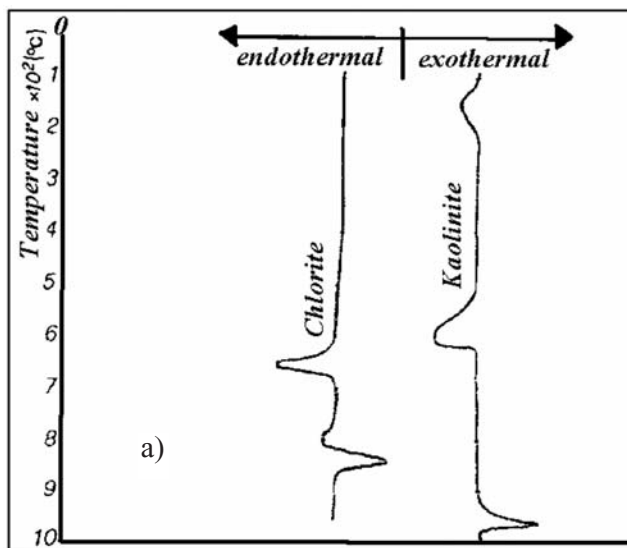


Fig. 11 - a) Curve Termo-differenziali per la Caolinite e per la Clorite; b) Spettro I.R. della woodwardite di Salincriti confrontato con lo spettro del minerale di Carnarvoshire (Galles)
- a) Differential thermal curves for Kaolinite and Chlorite; b) Infrared spectrum of the Salincriti woodwardite vs. the one of the Canarvoshire (Wales) mineral

(Tabella 1), mentre i controlli del pH in corrispondenza delle emergenze, tutte esclusivamente di tipo lineare, hanno confermato valori tra 4,5 e 5 lungo il contatto ed inferiori a 4, talora fino a 2,5, nei Graniti alterati (Figura 10).

Dai rilievi di dettaglio eseguiti (PELLEGRINO *et alii*, 2006), per ciascun litotipo sono stati riconosciuti nel complesso quattro Classi di alterazione; molto probabilmente il trend non lineare dei profili di alterazione è giustificabile sia da una circolazione idrica discontinua all'interno dell'ammasso cristallino, sia per la presenza di termini caratterizzati da una diversa suscettibilità verso i processi di alterazione.

FASCE DI AUREOLA METAMORFICA E PROCESSI DI ALTERAZIONE

Le analisi di dettaglio condotte nell'area di M.te Granieri-Salincriti sono state mirate, in particolare, alla definizione degli aspetti geochimici e minero-petrografici dei volumi di roccia esposti all'alterazione profonda.

Definite le Classi di alterazione, a parità di Classe e/o stadio raggiunto dall'alterazione è stata condotta un'ulteriore separazione in gruppi, in funzione della diversa esposizione agli intensi processi geochimici. La suddivisione è avvenuta tenendo conto di alcuni indicatori macroscopici, quali l'areale interessato dal contatto termometamorfico (fascia di Aureola Metamorfica), la presenza di intrusioni, la ricostruzione della circolazione idrica sotterranea ed i valori del pH misurato in corrispondenza delle emergenze, e microscopici come l'andamento di IAdiff, la solubilità di Al_2O_3 , SiO_2 , degli alcali e del calcio (Figura 12), la presenza della woodwardite. Per quanto riguarda Al_2O_3 ed SiO_2 , sebbene la loro solubilità tenda ad aumentare in condizioni di $pH < 5$, è stato osservato che non esiste una precisa relazione, anche a parità di stadio di alterazione, tra contenuto ed esposizione ai fenomeni di alterazione chimica; bastano, infatti, anche

granites (Figure10).

Detailed surveys (PELLEGRINO *et alii*, 2006) made it possible to distinguish four weathering classes for each lithotype. The non-linear trend of weathering profiles may be justified by discontinuous groundwater flow within the crystalline rock mass and by the occurrence of terms with different susceptibility to weathering.

THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS AND WEATHERING

Detailed analyses in the Mt. Granieri-Salincriti area were intended to define the geochemical and minero-petrographical characters of the rock volumes exposed to deep chemical weathering.

After defining weathering classes (Figure 8), lithotypes of the same weathering class and/or stage were further separated into groups, depending on their different exposure to intense geochemical processes. This separation took into account both macroscopic indicators (e.g. metamorphic aureole zone, occurrence of intrusions, pattern of groundwater circulation and pH measured near springs) and microscopic indicators (e.g. trend of IAdiff, solubility of Al_2O_3 , SiO_2 , alkalis and calcium (Figure 10), presence of woodwardite). With regard to Al_2O_3 and SiO_2 , although their solubility tends to rise at pH values of < 5 , there is no correlation (even in lithotypes with the same weathering degree) between their content and exposure to chemical weathering; indeed, minimum pH changes can re-precipitate them. Therefore, to identify geochemical decomposition-exposed levels,

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

EVIDENZE SPERIMENTALI	SEQUENZA IPOTIZZATA
1) presenza di numerose sorgenti al contatto scisti graniti	1) Infiltrazione dell'acqua meteorica nella formazione metamorfica molto permeabile per fratturazione
2) Le analisi effettuate sulle acque sorgenti al contatto hanno dato: pH= 5; presenza di (abbondante) di Zn ⁺⁺ e (in quantità subordinata) Cu ⁺⁺ ed Al ⁺⁺⁺	2) Reazione dell'acqua con i solfuri (in primo luogo blenda) con formazione di H ₂ SO ₄ + Zn ⁺⁺
3) Le analisi delle acque emergenti più in basso, dalla coltre granitica alterata, hanno dato: pH 3.5-4; presenza di Cu ⁺⁺ (abbondante), Zn ⁺⁺ (1/10 di quello rilevato al punto 2), di Al ⁺⁺⁺ F ⁻ e Ca ⁺⁺	3) Ulteriore attacco degli altri solfuri presenti (pirite e calcopirite) nonché delle miche (biotite negli scisti e muscovite nei graniti)
4) Le analisi petrografiche su sezioni sottili (tre per ogni campione ortogonali tra loro) hanno consentito di misurare il grado di alterazione Ia, espresso come rapporto tra feldspati alterati e feldspati totali; quelle diffrattometriche e termodifferenziali, sul residuo<2? dei graniti e sui precipitati, hanno evidenziato la presenza di minerali di neof ormazione quali caolinite e woodwardite	4) Attacco ed alterazione dei feldspati (K-feldspati e plagioclasti) presenti nei graniti

EXPERIMENTAL EVIDENCE	PRESUMABLE SEQUENCE
1) Occurrence of numerous springs along the contact	1) Water circulation in metamorphic rocks
2) Springs located over and along the thermal-metamorphic contact: 4<pH<5; abundant Zn ⁺⁺ and subordinately Cu ⁺⁺ and Al ⁺⁺⁺	2) Surface water seepage into biotitic schists and, above all, groundwater circulation in metamorphic aureole (hornfels) interact with sulphides (blende) contained in local intrusions: development of H ₂ SO ₄ + Zn ⁺⁺
3) Springs along the contact belt and in weathered granites: pH< 4; abundant Cu ⁺⁺ , Zn ⁺⁺ (1/10 of previous point 2), Al ⁺⁺⁺ , F ⁻ and Ca ⁺⁺	3) Groundwater strongly interacts with other sulphides (pyrite and chalcopirite) and mica (biotite in metamorphites and muscovite in granites)
4) Thin-section, diffractometric and fluorescence analyses indicate that, as weathering advances, almost all crystals of plagioclase, biotite, hornblende and k-feldspar are significantly altered. Advance of weathering in rocks from moderately to completely weathered is accompanied by a general decrease in the contents of albite, microcline and micas, as well as by an increase in clayey minerals, such as chlorite, smectites, halloysite and kaolinite. Chemical-minero-petrographic indexes show a rise of kaolinite and newly-formed minerals (i.e. woodwardite) in biotitic schists close to major intrusion zones, in granites and in hornfels close to the thermal-metamorphic contact belt as a consequence of geochemical processes	4) Deep decomposition of feldspars (K-feldspar and plagioclasi) in the granitic formation

Tabella 1 - Schema dei meccanismi d'innesco dei profondi processi geochimici. After PRESTININZI, 1984
- Mechanisms triggering deep geochemical processes. After PRESTININZI, 1984

minime variazioni di pH per farli riprecipitare. Per l'individuazione dei livelli esposti è stato, dunque, preso in considerazione solo il trend di Na₂O+K₂O+CaO, che per entrambi i litotipi a parità di stadi di alterazione ha evidenziato un andamento decrescente, portando così all'elaborazione dell'indice IA ch-pH=1/(Na+K+ Ca).

La figura 12 illustra, come nel caso dei graniti, i campioni analizzati presentino una diminuzione del contenuto di alcali nelle condizioni di esposizione, dunque un aumento di IA ch-pH. In particolare, a parità di stadio di alterazione il confronto tra IAch-pH e IA_{diff} nei termini intrusivi evidenzia un trend crescente in condizioni di esposizione (Figura 13), a cui corrisponde una maggiore concentrazione di minerali argillosi. Il confronto della globalità dei risultati individua, inoltre, un andamento crescente dagli stadi moderatamente ad altamente alterati. Anche nelle metamorfite di contatto il confronto tra IA ch-pH e IA_{diff} evidenzia un trend crescente dagli stadi moderatamente ad altamente alterati, soprattutto nei campioni provenienti da zone con elevate concentrazioni di intrusioni, dove si misurano altresì maggiori concentrazioni di prodotti di alterazione.

Tenuto conto dei risultati ottenuti e delle linee guida tracciate da studi precedenti, relativi all'analisi dei processi di alterazione legati all'aggressività delle acque (MALOMO, 1980; GRANT, 1969), è stato

only the trend of Na₂O+K₂O+CaO was taken into consideration. Weathering degree remaining equal, lithotypes displayed a declining trend, which resulted into the definition of the IAch-pH=1/(Na+K+ Ca) index.

Figure 12 shows that, in the case of granites, the samples have a lower content of alkalis under decomposition exposure conditions and thus an increase of IAch-pH. In particular, in intrusive terms with the same weathering degree, the comparison between IAch-pH and IA_{diff} reveals an increasing trend under geochemical exposure conditions (Figure 13). This trend corresponds to a higher concentration of clayey minerals. The comparison of all results suggests an increasing trend from moderately to highly weathered terms. Also in contact metamorphites, the comparison between IA ch-pH and IA_{diff} shows a rising trend in moderately to highly weathered terms, especially in samples collected from zones with high concentrations of intrusions, where also higher concentrations of weathering products are recorded.

The results of this study and of prior studies on weathering and effects of aggressive waters (MALOMO, 1980; GRANT, 1969) led to define a concise index of the mineralogical and chemical properties (IA_{diff} IA ch-pH) of terms exposed to deep chemical

WEATHERING OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCKS IN THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY):
GENERAL ASPECTS AND EFFECTS OF THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS

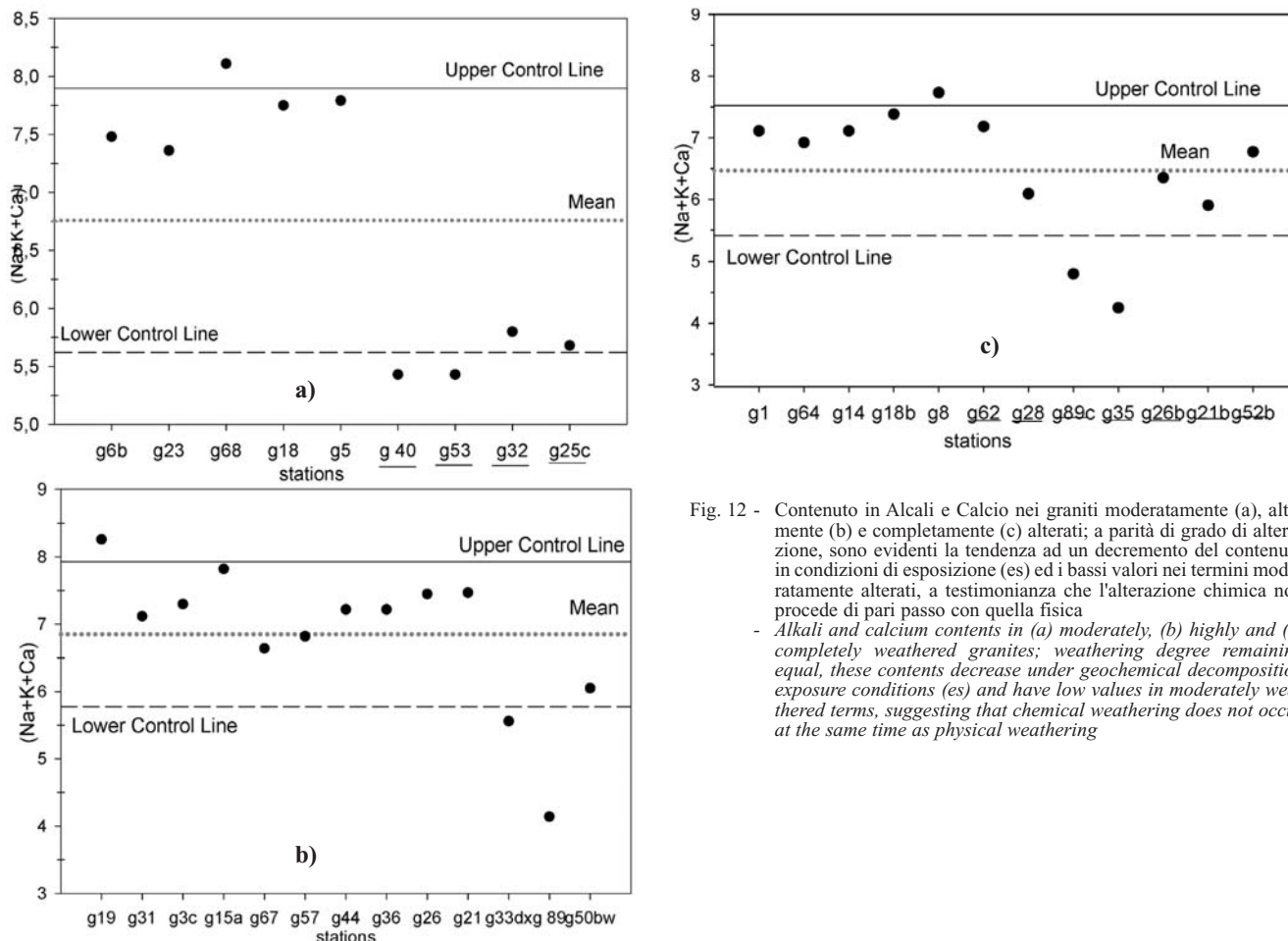


Fig. 12 - Contenuto in Alcali e Calcio nei graniti moderatamente (a), altamente (b) e completamente (c) alterati; a parità di grado di alterazione, sono evidenti la tendenza ad un decremento del contenuto in condizioni di esposizione (es) ed i bassi valori nei termini moderatamente alterati, a testimonianza che l'alterazione chimica non procede di pari passo con quella fisica
- Alkali and calcium contents in (a) moderately, (b) highly and (c) completely weathered granites; weathering degree remaining equal, these contents decrease under geochemical decomposition exposure conditions (es) and have low values in moderately weathered terms, suggesting that chemical weathering does not occur at the same time as physical weathering

definito un indice riassuntivo delle proprietà mineralogiche e chimiche (IA diff a IA ch-pH) in condizioni di alterazione chimica profonda: IAch-pH water.

In particolare nei termini intrusivi, la relazione tra IAdiff, IAch ed IAch-pH water evidenzia una risposta netta: un andamento crescente con l'alterazione di IAch-pH water; a parità di stadio di alterazione i campioni, attribuiti ad un contesto di esposizione, registrano un incremento di IAdiff ed IAch-pH water ed un decremento di IAch (Figura 14). L'andamento di IAch è legato all'aumento della mobilità di Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 e alle condizioni di acidità delle acque ($pH < 5$ in presenza di H_2SO_4), le cui continue variazioni ne possono influenzare negativamente il trend. Nei campioni completamente alterati (V) la separazione tende ad essere meno evidente, visto lo stadio di alterazione già troppo avanzato. La figura 15 illustra come i risultati relativi alle metamorfiti di contatto confermino quanto ottenuto per i litotipi precedenti.

Si è cercato, infine, di tenere conto dell'influenza dei fenomeni di alterazione chimica sugli aspetti quantitativi (Figura 16), da cui è emer-

weathering. From this index, the following expression of IAch-water pH was derived.

In intrusive terms, the relation between IAdiff, IAch and IAch-water pH exhibits a clear response: growing trend of IAch-water pH with the advance of alteration. Weathering degree remaining equal, the samples exposed to deep chemical weathering have an increase of IAdiff and IAch-water pH and a decrease of IAch (Figure 14). The trend of IAch is due to the higher mobility of Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 and TiO_2 and to water acidity ($pH < 5$ in the presence of H_2SO_4), whose continuous changes may negatively affect its trend. In completely weathered samples (V), the different response between samples exposed and not exposed to deep chemical decomposition tends to be less evident, given their advanced weathering stage. In Figure 13, the results obtained for thermal-metamorphic rocks are consistent with those obtained for the previous lithotypes.

Finally, an assessment was made of the impact of chemical weathering on quantitative aspects (Figure 16). Weathering

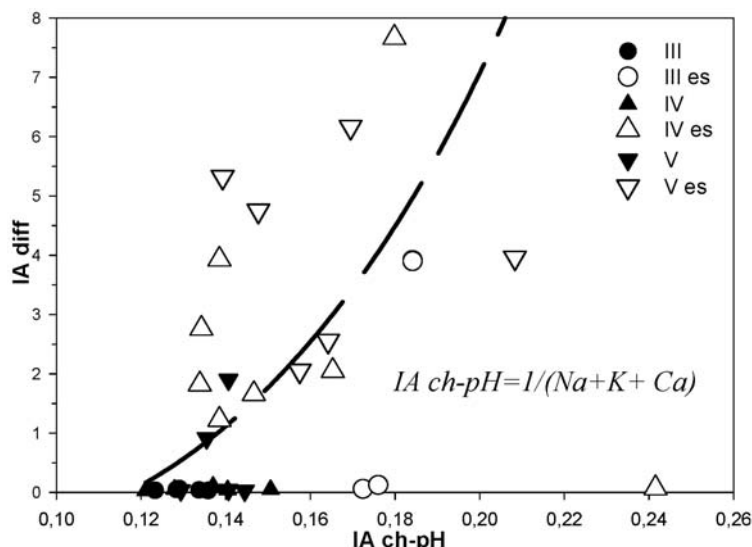


Fig. 13 - Relazione sperimentale tra IA ch-pH e IA diff nei termini intrusivi, a parità di stadio di alterazione raggiunto ma in condizioni di diversa esposizione
 - Experimental relation between IA ch-pH and IA diff in granites under different exposure conditions, weathering degree remaining equal

so che a parità di stadio di alterazione i valori più elevati dell'indice IA% si raggiungono in corrispondenza dei livelli esposti in cui è stata osservata una tendenza al peggioramento sia del singolo cristallo che della struttura dell'ammasso. Quest'ultimo aspetto si esplica attraverso una maggiore fratturazione intra ed intercristallina, un incremento della porosità e la completa perdita dell'abito originario da parte del cristallo. La figura 16 illustra come a parità di Classe di alterazione si hanno contemporaneamente anche valori più elevati di IA ch-pH water.

EFFETTI A SCALA DI AMMASSO DEI PROCESSI GEOCHIMICI: PROFILI DI ALTERAZIONE

Sulla base dei numerosi dati acquisiti, è stato avviato un confronto tra i peculiari elementi geologico-geochimici del sistema naturale indagato ed alcuni aspetti geomeccanici dell'ammasso roccioso e di stabilità dei versanti (PELLEGRINO *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI 2006). L'obiettivo è stato quello di misurare gli effetti a scala d'ammasso degli intensi processi di alterazione chimica e di definire la distribuzione dei volumi e/o degli areali esposti a tali processi. In particolare, l'attenzione è stata concentrata in quegli areali in cui, sulla base degli indicatori macroscopici e microscopici (della fascia di Aureola Metamorfica, delle intrusioni, della circolazione idrica sotterranea, del pH delle emergenze, della presenza di minerali di neoformazione, etc.), è stata rilevata una buona correlazione tra processi geochimici e litotipi presenti.

Nella sovrastante calotta di Scisti biotitici, specialmente in prossimità delle manifestazioni pegmatitiche e/o idrotermali, le analisi geomeccaniche di dettaglio hanno evidenziato brusche trasformazioni dei profili di alterazione, sia verticalmente che orizzontalmente. La distribuzione spaziale degli orizzonti di alterazione in tali aree è segnata, infatti, da un rapido passaggio da termini moderatamente alterati a completamente e/o altamente alterati con intensi fenomeni

degree remaining equal, the highest values of the IA% index are reached in exposed levels, where both the individual crystals and the structure of the rock mass tend to deteriorate. This deterioration translates into more intense intra- and inter-crystalline cracking, increased porosity and complete loss of the original crystal habit. Figure 16 demonstrates that, weathering class being equal, also higher IAch-water pH values are measured.

EFFECTS OF GEOCHEMICAL PROCESSES AT ROCK-MASS SCALE: WEATHERING PROFILES

Based on the numerous collected data, a comparison was made between the distinctive geological-geochemical features of the investigated natural system and some geomechanical and slope stability (PELLEGRINO *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006). The comparison was aimed at testing the impact of intense chemical weathering at rock-mass scale and at determining the distribution of the affected rock volumes and/or zones. Particular attention was attached to zones where geochemical processes had a clear impact on the investigated lithotypes, based on macroscopic and microscopic indicators (thermal-metamorphic contact belt, intrusions, groundwater circulation, pH of springs, newly-formed minerals).

In the overlying biotitic schist cap, especially in the vicinity of pegmatitic and/or hydrothermal intrusions, detailed geomechanical analyses exhibited sudden changes in weathering profiles, both vertically and horizontally. In effect, the spatial distribution of weathering horizons in such zones is marked by a fast passage from moderately weathered to completely and/or highly weathered terms, accompanied by intense saprolitisation, oxidation and diffuse argillified facies of the rock mass (Classes IV-V; Figure

WEATHERING OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCKS IN THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY):
GENERAL ASPECTS AND EFFECTS OF THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS

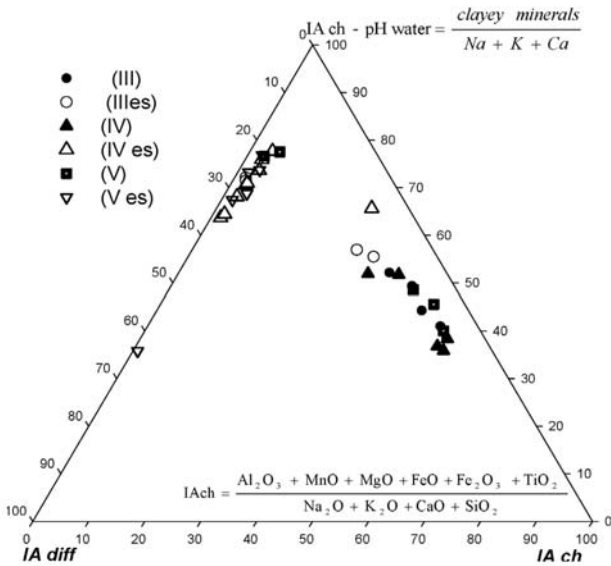


Fig. 14 - A parità di stadio di alterazione raggiunto, gli indici minero-petrografici e chimici mostrano un incremento di minerali argillosi nei termini intrusivi in presenza di un contatto termometamorfico (es)
- *Chemical and minero-petrographic indexes show an increase of clayey minerals in granites lying close to thermal-metamorphic contact belt (es), rock mass weathering degree being equal*

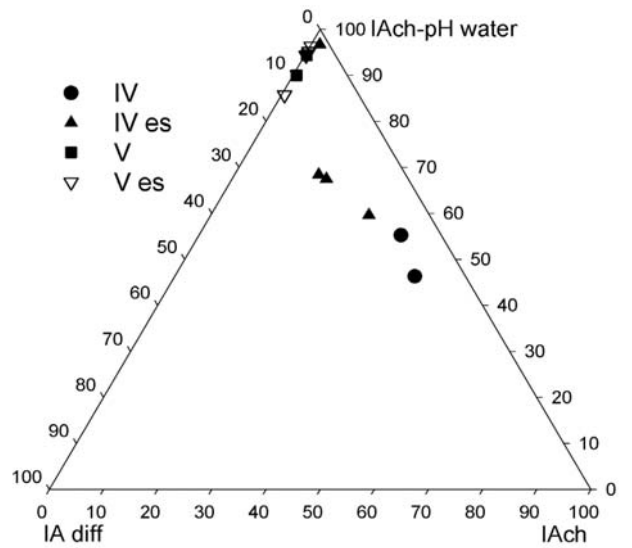


Fig. 15 - A parità di stadio di alterazione raggiunto, gli indici minero-petrografici e chimici mostrano un incremento di minerali argillosi anche nelle cornubianiti con una maggiore concentrazione di intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali (es)
- *Chemical-minero-petrographic indexes show an increase of clayey minerals in the highly weathered aureole with high concentration of pegmatitic and/or hydrothermal intrusions (es), rock mass weathering degree being equal*

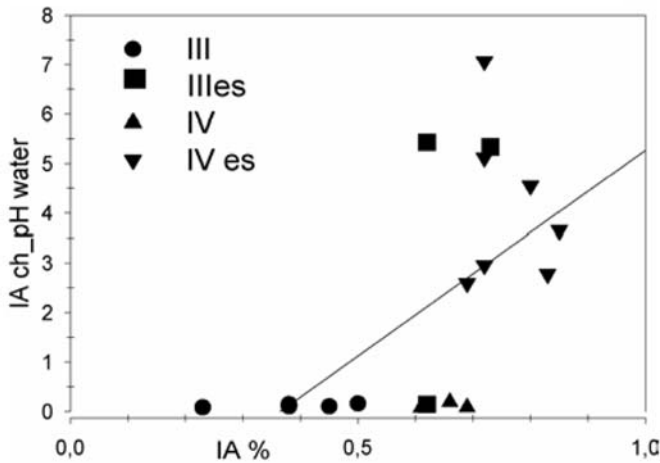


Fig. 16 - Relazione sperimentale tra IA ch_pH water e IA diff nei termini intrusivi in condizioni di diversa esposizione, a parità di stadio di alterazione raggiunto
- *Experimental relation between IA ch-water pH and IA in intrusive terms under different geochemical decomposition exposure conditions, rock mass weathering degree being equal*

di saprolitizzazione, di ossidazione e diffuse facies argillificate dell'ammasso (Classe IV-V; Figura 17a), così come hanno anche indicato le analisi minero-petrografiche e chimiche (Figura 6).

Analogamente sono state riscontrate discontinue variazioni dei profili di alterazione lungo la fascia di aureola metamorfica, caratterizzati da una mancanza di linearità sia orizzontalmente che verticalmente e non riconducibili a superficiali fenomeni di alterazione.

Lungo l'aureola metamorfica si osservano, infatti, diffuse facies argillificate dell'ammasso con prevalenza di roccia altamente e/o completamente alterata (Classe IV-V; PELLEGRINO & PRESTININZI,

17a). This finding was also validated by minero-petrographical and chemical analyses (Figure 6).

Discontinuous changes in weathering profiles were also noted along the thermal-metamorphic contact belt. These changes, with both horizontal and vertical non-linearities, cannot be attributed to shallow weathering.

Actually, diffuse argillified facies of the rock mass with dominance of highly and/or completely weathered lithotypes (Classes IV-V; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006) are observed along the metamorphic aureole. In particular, extensive portions of highly



Fig. 17 - a) sinistra: vista panoramica del versante M.te Granieri-Salincriti. Aureola metamorfica e scisti biotitici, profondamente alterati e con elevate concentrazioni di intrusioni pegmatitiche e/o idrotermali; b) destra: particolare dell'aureola metamorfica profondamente alterata lungo la principale superficie di distacco

- a) left: panoramic view of Mt. Granieri-Salincriti slope. Highly and/or completely weathered metamorphic aureole and biotitic schists, with high concentration of pegmatitic and/or hydrothermal intrusions; b) right: detail of completely weathered metamorphic aureole along the main rupture surface

Fig. 18 - Particolare dei graniti profondamente alterati in prossimità della fascia di aureola metamorfica, dove è stata verificata la presenza di abbondanti minerali argillosi

- Detail of highly and/or completely weathered granites near thermal-metamorphic contact belt, where presence of clayey minerals has been observed

2006). In particolare, in prossimità sia del contatto con i corpi intrusivi che delle manifestazioni pegmatitiche e/o idrotermali sono state rilevate estese porzioni di roccia sciolta con immersi nuclei meno alterati, di colore bruno-rossastro e/o avana-verdastro, altamente alterata. La roccia presenta una struttura saprolitica ed intensi processi di argillificazione dell'ammasso (Figura 17b).

Anche i rilievi effettuati nel complesso intrusivo lungo il contatto hanno evidenziato la presenza di roccia altamente e/o completamente alterata, diffuse facies argillificate dell'ammasso (Classe IV-V), con sporadici stadi moderatamente alterati, ed estesi livelli di materiale argilloso all'interno delle fratture (Figura 18).

I risultati ottenuti dal rilievo geomeccanico hanno chiaramente evidenziato la diffusione di stadi di alterazione con nette evidenze macroscopiche, a cui si associa un generale decadimento delle caratteristiche fisico-meccaniche e reologiche dei materiali (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PRESTININZI, 1984; PELLEGRINO *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

I dati ottenuti mostrano una diversa sensibilità dei litotipi analizzati agli intensi processi geochimici. Le rocce metamorfiche sono in genere meno vulnerabili ai processi di alterazione rispetto ai termini intrusivi a causa della loro mineralogia, tessitura e struttura (Figura 6). Tuttavia, l'esistenza di una concentrazione o accumulo di minerali in livelli foliati (biotite, muscovite) e condizioni favorevoli come nel caso studiato (mineralizzazioni a solfuri, interazione con l'acqua di falda a $\text{pH} < 5$) favoriscono processi di alterazione, addirittura più concentrati rispetto alle rocce più ricche di feldspati (PRICE, 1995).

In tale ambito, un ruolo determinante sugli effetti a scala d'ammasso (susceptibilità) è giocato, contemporaneamente, dall'aggressività delle acque sotterranee (acid solutions), dal quadro fessurativo dell'ammasso roccioso che ne condiziona la permeabilità e soprattutto dal fattore tempo di esposizione ai processi geochimici (diversa permanenza delle soluzioni acide aggressive nel sottosuolo). Quest'ultimo fattore è connesso alla presenza di piccole falde sospese e soprattutto di un acquifero localizzato.

Nella calotta di scisti biotitici, la presenza di nuclei circoscritti di roccia profondamente alterata, in corrispondenza delle zone di intru-

weathered loose rock, incorporating less weathered brown-reddish and/or havana brown-greenish nuclei, were found both near the contact with intrusive bodies and near pegmatitic and/or hydrothermal intrusions. This rock has a saprolitic structure and intense argillification of its mass (Figure 17b).

Moreover, surveys of the intrusive body lying along the contact indicated the occurrence of highly and/or completely weathered rock, diffuse argillified facies of the rock mass (Classes IV-V), with sporadic moderately weathered portions, and extensive levels of clayey material inside joints (Figure 18).

Results from geomechanical surveys showed diffuse weathering with clear macroscopic evidence and general deterioration of physico-mechanical and rheological properties of materials (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PRESTININZI, 1984; PELLEGRINO *et alii*, 2006; PELLEGRINO & PRESTININZI 2006).

This evidence corresponds to belts of intense chemical weathering, as demonstrated by the application of minero-petrographical and chemical indexes in the same zones (Figures 6, 14 and 15).

The collected data infer different susceptibility of the investigated lithotypes to intense geochemical processes. Usually, metamorphic rocks are less susceptible to weathering than intrusive terms, for intrinsic causes (mineralogy, texture, structure; Figure 6). Nevertheless, concentration or accumulation of minerals in foliated levels (biotite, muscovite) and appropriate conditions (like in the case study: sulphide mineralisations, interaction with water seepage at $\text{pH} < 5$) induce more concentrated weathering than in rocks richer in feldspars (PRICE, 1995).

In this respect, the following factors have a crucial impact on the rock mass (susceptibility): aggressiveness of seepage water and groundwater (acidic solutions), jointing of the rock mass (affecting its permeability) and, above all, time of exposure to geochemical processes (different time of residence of acidic solutions in the subsurface). The latter factor is connected with the occurrence of small perched aquifers and, above all, of a deep localised aquifer. These processes are responsible for hydrolysis, alteration of minerals (feldspars, micas), as well as volumetric and textural changes, which

sione, è da attribuire ad un avvio dell'alterazione geochimica legato all'acqua di infiltrazione caratterizzata da soluzioni leggermente acide e bassi valori del tempo di esposizione (Tabella 1; Figura 19).

Al contrario, lungo l'aureola metamorfica l'esistenza di un substrato profondamente fratturato, di una maggiore aggressività delle acque e l'esistenza di un acquifero localizzato sopra il contatto termometamorfico (maggiore tempo di esposizione) giustificano i diffusi ed estesi volumi di ammasso profondamente alterato e argillificato.

Relativamente ai termini intrusivi, l'esistenza di irregolarità nella distribuzione degli stadi ad intensa alterazione chimica è da attribuire ad una circolazione piuttosto discontinua di soluzioni acide a seguito dell'alternarsi di roccia sciolta, tenera e litoide e alla presenza di piccole falde sospese.

L'esistenza di materiale argilloso all'interno delle fratture, anche nei livelli apparentemente meno alterati, testimonia il fatto che la disintegrazione fisica non è sempre progressiva e può non evolversi parallelamente con la disaggregazione. In molte rocce, infatti, le fratture, sviluppatesi negli stadi iniziali del weathering, vengono riempite da materiale argilloso ed altri prodotti di alterazione negli stadi avanzati dei geoprocessi chimici. In questo contesto può anche accadere che le rocce profondamente decomposte possano essere meno friabili e meno permeabili delle porzioni di roccia circostanti più fresche.

La complessità dei risultati ottenuti porta a ritenere che i profondi fenomeni di alterazione chimica controllino il trend dei profili di alterazione e, al tempo stesso, abbiano un ruolo determinante nel decadimento dei parametri fisico-meccanici e nei mutamenti dei caratteri reologici della fascia di aureola metamorfica e delle zone a maggiore concentrazione di intrusioni nella calotta di Scisti (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006; PELLEGRINO *et alii*, 2006). La presenza di anisotropie ed eterogeneità a scala dell'intero versante, con fasce ad intensa alterazione (causa), induce sia lo sviluppo della concentrazione di sforzi di taglio lungo superfici subverticali in corrispondenza della sommità del versante di M.te Granieri sia una significativa influenza sull'entità e sui meccanismi delle deformazioni da creep profondo all'interno dell'ammasso (effetti) con possibili evoluzioni parossistiche (PRESTININZI, 1984; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

CONCLUSIONI

Nell'area in studio i processi di alterazione ed il loro sviluppo a livello territoriale e a scala del singolo versante, oltre che dagli eventi tettonici e climatici, risultano controllati dalla natura del substrato e dalla presenza di contatti termometamorfici.

I rilievi effettuati e le analisi condotte, secondo una procedura multidisciplinare, hanno evidenziato un substrato articolato e profili di alterazione complessi.

Ai fini del presente lavoro, l'applicazione di un criterio di valutazione di tipo minero-petrografico e chimico ha consentito di raggiungere risultati molto soddisfacenti: gli indici di alterazione deter-

are amplificate da un substrato profondamente fratturato.

In le intrusioni delle zone della biotite schista, la presenza di nuclei limitati di roccia profondamente alterata è suggestiva dell'inizio di alterazione geochimica. Questa alterazione è legata all'infiltrazione di acqua piuttosto che alla percolazione e/o ad un acquifero localizzato (con soluzioni leggermente acide e breve tempo di esposizione; Tabella 1; Figura 19).

Conversamente, lungo le aureole metamorfiche, l'esistenza di un substrato profondamente fratturato, di una maggiore aggressività delle acque e l'esistenza di un acquifero localizzato sopra il contatto termometamorfico (maggiore tempo di esposizione) giustificano i diffusi ed estesi volumi di ammasso profondamente alterato e argillificato.

L'esistenza di materiale argilloso all'interno delle fratture, anche nei livelli apparentemente meno alterati, testimonia il fatto che la disintegrazione fisica non è sempre progressiva e può non evolversi parallelamente con la disaggregazione. In molte rocce, infatti, le fratture, sviluppatesi negli stadi iniziali del weathering, vengono riempite da materiale argilloso ed altri prodotti di alterazione negli stadi avanzati dei geoprocessi chimici. In questo contesto può anche accadere che le rocce profondamente decomposte possano essere meno friabili e meno permeabili delle porzioni di roccia circostanti più fresche.

La complessità dei risultati ottenuti porta a ritenere che i profondi fenomeni di alterazione chimica controllino il trend dei profili di alterazione e, al tempo stesso, abbiano un ruolo determinante nel decadimento dei parametri fisico-meccanici e nei mutamenti dei caratteri reologici della fascia di aureola metamorfica e delle zone a maggiore concentrazione di intrusioni nella calotta di Scisti (GENEVOIS & PRESTININZI, 1979a; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006; PELLEGRINO *et alii*, 2006). La presenza di anisotropie ed eterogeneità a scala dell'intero versante, con fasce ad intensa alterazione (causa), induce sia lo sviluppo della concentrazione di sforzi di taglio lungo superfici subverticali in corrispondenza della sommità del versante di M.te Granieri sia una significativa influenza sull'entità e sui meccanismi delle deformazioni da creep profondo all'interno dell'ammasso (effetti) con possibili evoluzioni parossistiche (PRESTININZI, 1984; MARTINO *et alii*, 2004; PELLEGRINO & PRESTININZI, 2006).

CONCLUSIONS

In the study area, weathering processes and their advance at regional and slope scales are controlled by the nature of the bedrock, the presence of thermal-metamorphic contacts, as well as by tectonic and climatic events. The surveys and analyses conducted in this study according to a multi-disciplinary approach revealed a diversified bedrock and complex weathering profiles.

Significant results were achieved by applying minero-petrographical and chemical assessment criteria. The alteration indexes developed in this study represent semi-quantitative to quantitative tools for assessing the susceptibility of the crystalline-metamorphic

ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA (MASSICCIO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA

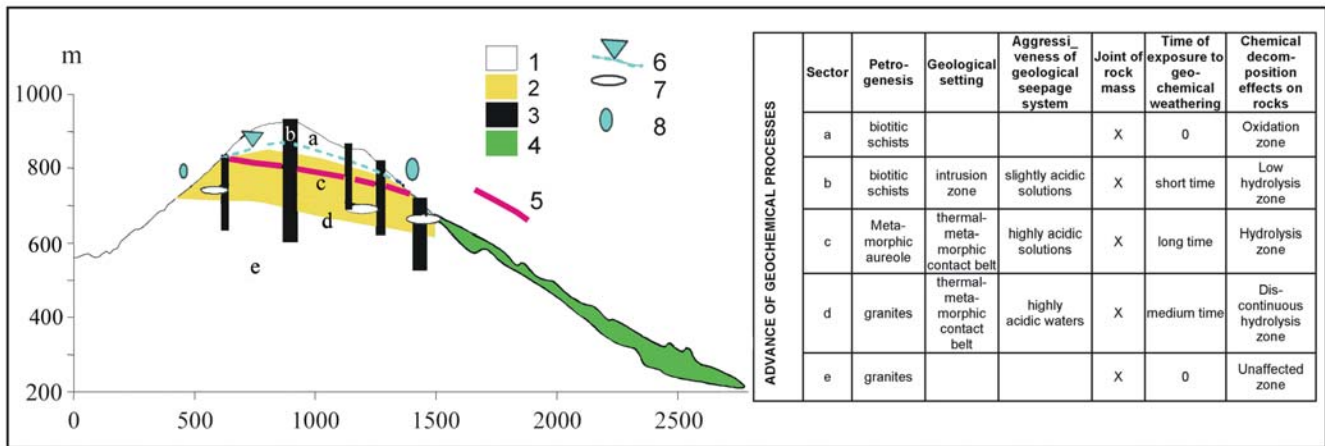


Fig. 19 - Sketch della distribuzione dei processi geochimici lungo il versante Mt. Granieri Salincriti (legenda di fianco a destra)

1) substrato cristallino-metamorfico; 2) zone esposte a fenomeni di idrolisi e di degradazione con diversa intensità lungo la fascia di contatto termometamorfico; zona di aureola metamorfica con sporadici livelli esposti nella calotta di scisti biotitici, posti al di sotto del livello di falda; discontinui livelli esposti nell'ammasso intrusivo prossimo al contatto; 3) zone di intrusione, i cui effetti si osservano nella calotta di scisti; 4) rock-avalanche; 5) limite del contatto termometamorfico; 6) acquifero; 7) falde sospese; 8) sorgenti

- Sketch of geochemical process distribution along Mt. Granieri-Salincriti slope (legend on right side)

1) crystalline-metamorphic bedrock; 2) zones affected by phenomena of hydrolysis and chemical decomposition of different extent along thermal-metamorphic contact belt: metamorphic aureole with sporadic affected levels in the schist cap underneath water table; discontinuous affected levels in intrusive body close to thermal-metamorphic contact; 3) intrusion zones, whose effects are evident in the schist cap; 4) rock-avalanche; 5) boundary of thermal-metamorphic contact; 6) aquifer contained in metamorphites; 7) perched aquifers; 8) springs

minati rappresentano strumenti per la misura, da semi-quantitativa a quantitativa, della suscettibilità del substrato cristallino-metamorfico e delle fasce di aureola metamorfica ai processi di alterazione. Nell'area di M.te Granieri-Salincriti in corrispondenza delle fasce ad alterazione chimica intensa sono stati osservati livelli di caolinite nelle fratture, silice amorfa, minerali di neoformazione e diffuse facies argillificate dell'ammasso cristallino metamorfico (caolinitizzazione). La maggiore solubilità degli alcali e la maggiore concentrazione di minerali argillosi costituiscono gli elementi caratteristici dei processi geochimici in atto, come confermano le relazioni tra gli indici mineralogico-petrografici e quelli chimici. In corrispondenza delle rocce metamorfiche, in particolare delle cornubianiti, pur essendo meno sensibili ai processi di alterazione rispetto ai termini intrusivi per cause intrinseche, la combinazione di una concentrazione e/o accumulo di minerali in livelli foliati (biotite, muscovite, orneblenda) e di solfuri produce una maggiore aggressività delle acque che comporta anche in questo caso una maggiore suscettibilità dell'ammasso rispetto agli adiacenti livelli più ricchi in quarzo e feldspati.

Il modello geologico di riferimento per il versante M.te Granieri-Salincriti, ricostruito a partire dagli elementi conoscitivi acquisiti, giustifica i processi di deformazione gravitativa in atto e li pone tra gli effetti della presenza di fasce ad intensa alterazione chimico-fisica. Lo studio dei processi di alterazione chimica profonda e l'insieme dei risultati ottenuti nel presente lavoro forniscono un contributo alla determinazione degli areali e dei volumi di ammasso roccioso esposti ai processi geochimici.

bedrock to weathering and to geochemical processes concentrated along thermal-metamorphic contact belts.

In the Mt. Granieri-Salincriti case study area, belts with intense chemical weathering were identified. These belts are featured by levels of kaolinite in joints, amorphous silica, newly-formed minerals and diffuse argillified facies of the crystalline-metamorphic rock mass (kaolinitisation). Inside these belts the higher solubility of alkalis and the higher concentration of clayey minerals are indicators of ongoing geochemical processes, as corroborated by the relations between mineralogical-petrographical and chemical indexes. Metamorphic rocks, namely cornubianites, are less susceptible to weathering than intrusive terms (for intrinsic causes). However, a combination of two factors makes these rock masses more prone to weathering: i) concentration and/or accumulation of minerals in foliated levels (biotite, muscovite, hornblende), and ii) intense geochemical decomposition resulting from presence of sulphides minerals and exposure to aggressive waters. These foliated rock levels prove to be more susceptible to weathering than the nearby levels richer in quartz and feldspars.

The reference geological model of the Mt. Granieri-Salincriti slope justifies the ongoing deformational processes as one of the effects of intense chemical weathering belts. The results achieved in this study on deep chemical weathering are expected to: i) give a major contribution to identifying zones and volumes of rock mass exposed to geochemical processes, and ii) provide a tool to gain insight into the phenomenon-cause-effect relation and the related geological-evolutionary model of the slope.

**WEATHERING OF CRYSTALLINE-METAMORPHIC ROCKS IN THE ALLARO AND AMUSA RIVER BASIN (SERRE MASSIF, CALABRIA, ITALY):
GENERAL ASPECTS AND EFFECTS OF THERMAL-METAMORPHIC CONTACT BELTS**

OPERE CITATE / REFERENCES

- AMODIO MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARETTA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976) - *L'arco Calabro-Peleoritano nell'orogene appenninico-maghrebide*. Mem. Soc. Geol. It., **17**: 1-60.
- BALDANZA B. & TRISCARDI M. - Nota Preliminare. Istituto di Mineralogia e Petrografia. V. dei Verdi, 75, Messina.
- BARRESE E., BURRAGATO F., PRESTININZI A. (1985) - *Genesi del solfato idrato di Alluminio e Rame legato ai processi di alterazione dei graniti (Salincriti R.C.)*. Conv. SIMP-Cosenza.
- BONARDI G., GIUNTA G., PERRONE V., RUSSO M., ZUPPETTA A. & CIAMPO G. (1980) - *Osservazioni sull'evoluzione dell'arco calabro peleoritano nel Miocene inferiore: la Formazione di Stilo-Capo d'Orlando*. Boll. Soc. Geol. It., **99**: 365-393.
- BONARDI G., DE VIVO B., GIUNTA G., LIMA A., PERRONE V. & ZUPPETTA A. (1982) - *Mineralizzazioni dell'Arco Calabro Peleoritano. Ipotesi genetiche e quadro evolutivo*. Boll. Soc. Geol. It., **101**: 141-155.
- BONARDI G., COMPAGNONI R., MESSINA A., PERRONE V., RUSSO S., DE FRANCESCO A.M., DEL MOIRO A. & PLATT J. (1992) - *Sovrainpronta metamorfica nell'Unità dell'Aspromonte (Settore meridionale dell'Arco Calabro Peleoritano)*. Boll. Soc. Geol. It., **111**: 81-108.
- CALCATERRA D., PARISE M. & DATTOLA L. (1996) - *Caratteristiche dell'alterazione e franosità di rocce granitoidi nel bacino del torrente Alaco (Massiccio della Serre, Calabria)*. Boll. Soc. Geol. It., **115**: 3-28.
- CRITELLI S., DI NOCERA S., LE PERA E. (1991) - *Approccio metodologico alla valutazione petrografica del grado di alterazione degli gneiss del Massiccio silano (Calabria Settentrionale)*. Geol. Appl. Idrogeol., **26**: 41-70.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979a) - *Time dependent behaviour of granitic rocks related to their alteration grade*. Rock Mechanics, Proc. Int. Congr., Montreaux, 153-159.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979b) - *Analisi tridimensionale dei versanti rocciosi: la frana di Salincriti (RC)*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **19**(3): 367-387.
- GEOLOGICAL SOCIETY ENGINEERING GROUP WORKING PARTY REPORT (1995) - *The description and classification of weathered rocks for engineering purposes*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **28**: 206-242.
- GEO TECHNICAL CONTROL OFFICE (1984) - *Geotechnical manual for slopes*. Geotechnical Control Office. Engineering Development Department. Hong Kong, pp. 295.
- GRANT W. H. (1969) - *Abrasion pH, an index of chemical weathering*. Clay and Clay minerals, **17**: 151-155.
- HEIKE MERLIN O. & LORENZONI S. (1972) - *Il Massiccio "granitico" della Serre, Calabria*.
- IRFAN T. Y. & DEARMAN W. R. (1978) - *The engineering petrography of a weathered granite and its application to granite in Corea*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **11**: 233-244.
- HILL S.E. & ROSENBAUM M.S. (1998) - *Assessing the significant factors in a rock weathering system*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **31**: 85-94.
- LEE S. G. & DE FREITAS M. H. (1989) - *A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **22**: 31-48.
- LUMB P. (1962) - *The properties of decomposed granite*. Geotechnique, **12**: 226-243.
- MALOMO S. (1980) - *Abrasive pH of feldspars as an engineering index for weathered granite*. Bulletin of IAEG, **22**: 207-211.
- MARTINO S., PELLEGRINO A., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA (2004) - *The Impact of alterations on Deep-Seated Gravitational Deformations: the case of Mt. Granieri-Salincriti (Calabria, Italy)*. Proc. IX Int. Symp. Landslides, Balkema, Rotterdam.
- NICKEL E. H. (1976) - *New data on woodwardite*. Mineral. Mag., **43**: 644-647.
- PELLEGRINO A. (2000) - *Aspetti metodologici nella caratterizzazione geomeccanica degli ammassi costituiti da rocce cristalline vulnerabili ai processi di alterazione e possibili implicazioni nella genesi dei fenomeni franosi e delle Deformazioni Gravitative Profonde di Versante, applicazione in alcune aree situate all'interno dei bacini dei F. Amusa e Allaro (RC), Calabria*. Dottorato di Ricerca XIII ciclo in Scienze della Terra. Università degli Studi di Roma La Sapienza.
- PELLEGRINO A. & PRESTININZI A. (2003) - *Il contributo del monitoraggio GPS alla comprensione dei fenomeni deformativi di versante: il caso di M. te Granieri-Salincriti (RC, Italia)*. In Cartography aimed at controlling and management of territory, Proc. Reg. Congr., Regione Calabria-Asita.
- PELLEGRINO A. & PRESTININZI A. (2006) - *Weathering conditioning the geomechanical properties along thermal-metamorphic contact belts: the case of Mt. Granieri-Salincriti DSGSD (Calabria - Italy)*. Proc First EGU 2004, General Assembly Nice, Geomorphology, Special Issue, in press.
- PELLEGRINO A., PRESTININZI A. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2006) - *Costruzione del modello geologico-tecnico in ammassi cristallino-metamorfici affetti da intensi processi di alterazione: un esempio di applicazione nei bacini delle Fiumare Allaro ed Amusa (Italia)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**(2): in press.
- PRESTININZI A. (1984) - *Deformazioni gravitative profonde: aspetti cinematici ed analisi dei rapporti con alcuni processi alterativi*. Boll. Soc. Geol. It., **103**: 707-716.
- PRICE D.G. (1995) - *Weathering and weathering processes*. Quarterly Journal of Engineering Geology, **28**: 243-252.
- SCHULTZ L. G. (1964) - *Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-Ray under chemical data for the PIERRE Shale*. U.S: Geol. Surv. Prof.

**ANALISI DEI PROCESSI DI ALTERAZIONE DELLE ROCCE CRISTALLINO-METAMORFICHE DEL BACINO DELLE F. ALLARO E AMUSA
(MASSICCO DELLE SERRE, CALABRIA, ITALIA): ASPETTI GENERALI ED EFFETTI LEGATI ALLE FASCE DI AUREOLA METAMORFICA**

Paper, Washington , 391 C, 1-31

TORTORICI L. (1982) - *Lineamenti geologico-strutturali dell'Arco Calabro Peleoritano*. Rend. Soc. It. Minerar. Petrogr., **38**: 927-940.

VAI G. B. (1992) - *Il segmento Calabro-Peleoritano dell'orogene ercinico. Disaggregazione palinspastica*. Boll. Soc. Geol. It., **111**: 109-129.

ZISCHINSKY U. (1969) - *Über sackungen*. Rock Mech., **1**: 30-52.

Received August 2005 - Accepted March 2006