

FABRIZIO MERLO

BIOACCUMULO DI ^{137}Cs
IN *STEREOCAULON VESUVIANUM* PERS. (*Lichenes*)
SUL MONTE ETNA (SICILIA ORIENTALE)

RIASSUNTO

Si riferiscono i risultati di un'indagine condotta nel 2000 sulla quantità di Cesio radioattivo ancora presente nel tallo del lichene *Stereocaulon vesuvianum* Pers. campionato in 32 diverse stazioni sulle pendici del Monte Etna. La conoscenza della datazione delle colate sulle quali si è campionato ha permesso di stimare approssimativamente l'età massima possibile di alcuni licheni analizzati. Al fine di ricercare eventuali correlazioni statisticamente significative tra l'entità del bioaccumulo e le caratteristiche ambientali dei luoghi di campionamento, ogni stazione è stata caratterizzata in base diversi parametri, è stato altresì preso in considerazione un carattere morfologico del lichene, l'altezza del pulvino. Sebbene alla data in cui sono stati effettuati i campionamenti fossero già trascorsi 14 anni dall'incidente di Chernobyl ed oltre 50 anni dall'ultimo esperimento nucleare in atmosfera condotto nel Sahara, i risultati delle analisi hanno evidenziato la presenza di ^{137}Cs nei talli lichenici di tutte le stazioni. Le quantità misurate oscillano tra 6 e 73 Bq/Kg. La presenza del radionuclide è stata rilevata anche nei licheni sviluppatasi dopo l'incidente di Chernobyl. Elaborazioni successive hanno evidenziato un legame tra le concentrazioni di ^{137}Cs nei talli e le dimensioni dei licheni ($r = 0.81$, $p < 0.01$, $n = 32$).

SUMMARY

Biological ^{137}Cs uptake in Stereocaulon vesuvianum Pers. (Lichenes) on Mt. Etna (E Sicily) - This paper is focused on the radioactive Caesium amount still present in the thallus of the lichen *Stereocaulon vesuvianum* Pers. collected in 32 different sample areas on Mt Etna slopes and results from a field investigation carried out during 2000. The available information on the age of lava flows on which the specimens were collected allowed a rough estimation of the maximum age possible of some lichens. All the most important abiotic (altitude, exposition, geology, bioclimate) and biotic (height) parameters typical to the sampling sites have been taken into account looking for any statistically significant correlations between them and the measured uptake. Although if

the sampling was made 14 years after Chernobyl disaster and more than 50 years after the last nuclear test in Sahara, our analyses point out that ^{137}Cs is still present in lichen thalli of all the sampling sites. The measured values range between 6 and 73 Bq/Kg. The presence of the radionuclide was recorded also in the lichens grown after Chernobyl disaster. Further elaborations reveal that the concentration of ^{137}Cs in lichen thalli depends on (or at least has a positive link with) their size ($r = 0.81$, $p < 0.01$, $n = 32$).

INTRODUZIONE

Il Cesio radioattivo è un radioisotopo artificiale che ha dato fenomeni di contaminazione localmente anche imponenti. Si tratta di un elemento artificiale che si origina nelle reazioni di fissione nucleare del Plutonio e dell'Uranio e se ne conoscono due isotopi con diverso tempo di dimezzamento: ^{134}Cs ($t_{1/2} = 750$ giorni) e ^{137}Cs ($t_{1/2} = 30$ anni). I fenomeni di scambio ionico con il Potassio lo rendono biologicamente attivo e quindi estremamente pericoloso per l'ambiente e per la salute umana essendo all'origine dell'insorgenza di numerose neoplasie.

I radioisotopi del Cesio hanno fatto la loro comparsa tra gli anni '50 e '60 del XX secolo a seguito dei circa 400 test nucleari in atmosfera condotti da numerose nazioni ed in varie parti del mondo. Le regioni artica e subartica sono state quelle maggiormente interessate dal fallout anche se, per quanto in misura minore, il Cesio radioattivo è stato rilevato un po' ovunque. La sua presenza è stata registrata in passato anche nell'*area mediterranea centrale* nei periodi immediatamente successivi ai test nucleari francesi condotti nelle ex colonie nordafricane. A seguito di numerose moratorie internazionali, gli esperimenti nucleari in atmosfera sono andati diminuendo fino al 1962, data dell'ultima esplosione nucleare in atmosfera. In conseguenza di ciò, si è registrata una generalizzata progressiva diminuzione della concentrazione del Cesio radioattivo fino al 26 aprile 1986, data dell'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl (Ucraina) che ha rilasciato in atmosfera grandi quantità di sostanze nucleari tra le quali il ^{134}Cs ed il ^{137}Cs . Nell'immediatezza dell'evento numerosi sono stati gli studi miranti a misurare l'entità del fallout, soprattutto nelle aree prossime al luogo dell'incidente, pochissime sono state invece le indagini che hanno interessato il meridione d'Europa e insufficienti i rilevamenti recenti sull'eventuale quota residua di questo contaminante nei diversi comparti ambientali. Il presente contributo si prefigge pertanto, partendo dallo studio di un bioaccumulatore, il lichene *Stereocaulon vesuvianum* Pers., di fornire informazioni sulla presenza del cesio radioattivo nell'area indagata e la sua eventuale distribuzione spaziale. Nel contempo si cerca di definire meglio alcuni parametri che possono influenzare i processi di bioaccumulo.

CENNI STORICI

Negli ultimi decenni l'impiego di organismi per la valutazione della qualità dell'aria è divenuto una procedura largamente utilizzata in studi di monitoraggio (LORENZINI, 1984; MANES, 1989; PIERVITTORI, 1999; LOPPI, 1999). Relativamente al bioaccumulo di radionuclidi i vegetali possono accumularne nei loro tessuti, costituendo il primo anello di catene alimentari che porta a concentrazioni sempre crescenti nei tessuti animali, secondo un processo meglio noto come *magnificazione*. La maggior parte del Cesio presente nel suolo è assimilato direttamente dalle piante superiori, nei cui tessuti mostra una grande mobilità venendo attivamente e velocemente traslocato (ANDERSEN, 1967; BUKOVAC *et al.*, 1965; MIDDLETON, 1959; LUDWIEG, 1962; DAHLMAN *et al.*, 1969; AARKROG, 1975; COUGHTREY & THORNE, 1983, etc). Uno studio condotto in Friuli-Venezia Giulia (NIMIS *et al.*, 1986) sulla contaminazione da ^{134}Cs e ^{137}Cs nei macromiceti ha permesso di individuare le aree a maggiore ricaduta radioattiva nel periodo immediatamente successivo all'incidente di Chernobyl. Va tuttavia precisato che gli studi sul bioaccumulo di radionuclidi nei funghi hanno interessato per lo più gli ascomiceti lichenizzati e si riferiscono a quegli elementi con periodo di dimezzamento più lungo come il ^{137}Cs , lo ^{90}Sr , il ^{239}Pu e il ^{210}Pu (ERÄMETSÄ & YLIRUOKANEN, 1971; HOLM & PERSSON, 1975; KAURANEN & MIETTINEN, 1969; MIETTINEN, 1969, 1979; PERSSON, 1973). Studi sul bioaccumulo di Uranio radioattivo sono stati recentemente condotti nell'area dei Balcani per verificare eventuali residui di questo radioisotopo verosimilmente utilizzato in alcune testate missilistiche durante il conflitto che ha interessato quest'area geografica nel 1999 (DI LELLA *et al.*, 2003, 2004; LOPPI *et al.*, 2003, 2004).

Le prime misure della quantità di ^{137}Cs e ^{90}Sr nei licheni risalgono alla fine degli anni '50 del secolo scorso. Si è dimostrato che i licheni contengono questi radionuclidi in quantità da tre a venti volte maggiori rispetto a quelle delle piante vascolari (GORHAM, 1959; HVINDEN & LILLEGRAVEN, 1961; RAHOLA & MIETTINEN, 1971; SALO & MIETTINEN, 1964; TUOMINEN & YAACKOLA, 1973). Si è anche dimostrato che i licheni hanno un'alta efficienza nel trattenere il ^{137}Cs anche dopo forti precipitazioni (PLUMMER, 1969).

In Italia le indagini sul bioaccumulo di radionuclidi in talli lichenici sono estremamente scarse e quasi tutte sono state effettuate dopo l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl. Uno studio preliminare sul bioaccumulo di radionuclidi nei licheni è stato condotto da CANIGLIA *et al.* (2000) nell'Italia nord-orientale (prealpi e Dolomiti), mentre concentrazioni di radiocesio sono state misurate in campioni raccolti sul M. Vesuvio (ADAMO *et al.*, 1989, 2004), nel territorio parmense (TRIULZI *et al.*, 1996), in Toscana sul M. Amiata (FEIGE *et al.*, 1990).

AREA DI STUDIO

L'area studio, l'Etna, sita nella provincia di Catania (Sicilia orientale), è racchiusa in un quadrato di circa 32 Km di lato e include, talvolta parzialmente, il territorio di numerosi comuni. Essa ricade nei fogli della Carta d'Italia 1:50.000 dell'I.G.M.I. n. 612 "Randazzo", n. 613 "Taormina", n. 624 "Monte Etna" e n. 625 "Acireale". L'edificio vulcanico rappresenta in realtà un'area molto complessa costituita da numerosi coni, più o meno estesi, che si sono sovrapposti nell'arco di 500.000 anni (ROMANO, 1982, 1993). L'attuale struttura, il Mongibello recente, è estremamente articolata ed in forte dinamismo a causa della continua attività vulcanica di tipo effusivo. Ad oggi l'Etna costituisce il più alto (circa 3.340 m s.l.m.) ed esteso vulcano d'Europa in attività e, negli ultimi venticinque anni, uno dei vulcani più attivi del mondo. Dal 1971 si sono verificate sull'Etna quindici eruzioni di una certa consistenza e non meno di quaranta episodi eruttivi di minore importanza.

La composizione delle lave presenta una certa variabilità; le più antiche sono formate da andesiti augitiche, le più recenti da basalti olivinici (ROMANO, 1993).

A partire dal 1987, un'area di circa 50.000 ettari è stata tutelata con l'istituzione del Parco Naturale Regionale dell'Etna.

L'area di studio registra localmente, ed alle quote più basse, un'elevata densità di popolazione e quindi un elevato ritmo di tutte quelle attività che a questa condizione sono legate (un alto numero di scuole e di uffici, molte attività commerciali, medio traffico veicolare, ecc.). Non vi è presenza di grandi industrie, ma di piccole attività, per lo più legate al commercio ed al turismo. L'uso del territorio è, alle basse quote, prevalentemente agricolo. Relativamente intensa è l'attività estrattiva con un elevato numero di cave, talvolta di grandi dimensioni, molte di queste in piena attività.

Numerose sono le stazioni metereologiche presenti nell'area. Alcune esclusivamente pluviometriche (Adrano, Bronte e Ragalna), altre termopluviometriche (Linguaglossa, Nicolosi, Piedimonte Etneo e Zafferana Etnea). Al fine di riassumere le caratteristiche climatiche delle diverse località considerate, sulla base dei dati pubblicati dal Servizio Idrografico Regionale (DRAGO *et al.*, 2000), dalle medie trentennali (1965-1994) su base mensile delle precipitazioni e delle temperature delle stazioni termopluviometriche si sono costruiti i climogrammi di Peguy (Fig. 1). Dall'unione dei dodici punti relativi a ciascun mese, si ottiene un poligono delimitante un'area, la cui forma e dimensione rappresentano bene le caratteristiche climatiche di ciascuna stazione. Sul climogramma è anche riportata un'area triangolare di riferimento che, secondo Peguy, distingue una situazione di clima temperato al suo interno da situazioni di clima freddo, caldo ed arido. La posizione dell'a-

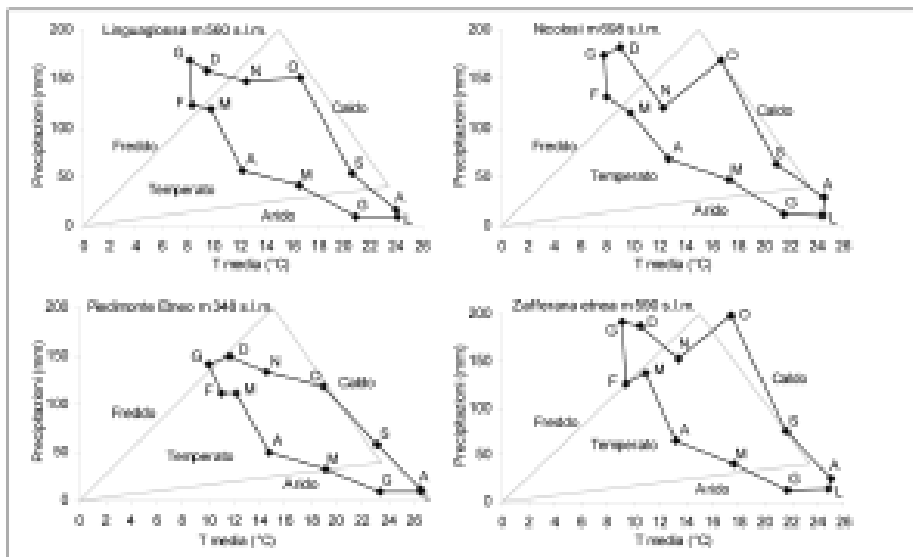


Fig. 1 — Climogrammi di Peguy riferiti alle quattro stazioni termopluviometriche presenti nell'area di studio (costruiti sulla base dei dati tratti da DRAGO *et al.*, 2000).

rea poligonale fornisce una rappresentazione schematica delle condizioni climatiche della stazione considerata. L'esatta ubicazione delle stazioni meteorologiche è stata riportata in Fig. 3.

MATERIALI E METODI

Dopo alcuni sopralluoghi in campo, si è scelto di concentrare l'interesse sul lichene *Stereocaulon vesuvianum* Pers. (Stereocaulaceae), in quanto abbondantemente presente in tutta l'area di studio. Si tratta di una specie sassicola fruticosa dal tallo primario squamuloso, effimero, da cui sorgono pseudopodezi a sezione circolare, di solito ramificati, la cui parte centrale è costituita da ife medullari circondate da uno strato più esterno di consistenza cartilaginea, spesso coperti da un tomento; i singoli talli riuniti in gruppi danno spesso origine ad una forma di crescita pulvinante (Fig. 2); sebbene la maggior parte delle specie di questo genere presenti in Italia abbiano una distribuzione artico-alpina, *S. vesuvianum* è comune in Italia meridionale, spesso su lave (M. Vesuvio e M. Etna) (NIMIS, 1987, 1993; MOBERG & HOLMÅSEN, 1992). Per il corretto riconoscimento della specie e per la nomenclatura si è fatto riferimento a NIMIS (1987).



Fig. 2 — Pulvino di *Stereocaulon vesuvianum* Pers. (Stereocaulaceae) (foto di G. Massari).

Date le finalità del presente studio, cioè – la ricerca sull'eventuale presenza del cesio radioattivo bioaccumulato in *S. vesuvianum* nell'area indagata, la sua eventuale distribuzione spaziale e la ricerca di possibili correlazioni statisticamente significative tra l'entità del bioaccumulo, un parametro biometrico del lichene (altezza del pulvino) e le caratteristiche ambientali – nel territorio oggetto di studio sono state individuate 32 stazioni di campionamento su nove diverse colate laviche di cui è nota la data dell'evento eruttivo che le ha generate (ROMANO 1982, 1993; ROMANO *et al.*, 1979), variamente distribuite sui diversi versanti dell'Etna (Fig. 3), a quote comprese tra 596 m s.l.m. (stazione 1911-1) ed 1498 m s.l.m. (stazione 1832-4) così da interessare più o meno uniformemente tutto il territorio indagato. Al fine di evitare l'influenza di potenziali agenti perturbatori lo sviluppo di *S. vesuvianum*, dove possibile, le stazioni sono state scelte lontano da attività antropiche, strade, cave, ecc. I campionamenti sono stati effettuati sulle colate del 1971, 1950, 1928, 1923, 1911, 1910, 1832, 1792 e 1536, tra il giugno e il dicembre del 2000. Si è cercato, nell'ambito delle stesse colate, di campionare in stazioni la cui differenza di quota ammontasse a circa 100 m così da verificare più agevolmente l'eventuale correlazione tra la quota e la concentrazione del cesio.



Fig. 3 — Carta schematica dell'area di studio suddivisa nei quattro Fogli della Carta d'Italia 1:50.000 dell'I.G.M.I. in cui ricade. Sono evidenziati i principali comuni, le stazioni metereologiche (con il simbolo "△" le stazioni pluviometriche e con il simbolo "◇" le stazioni termopluviometriche), le sagome delle colate sulle quali si è campionato con le relative datazioni e con il simbolo "•" i siti di campionamento.

Le stazioni sono state codificate usando due numeri separati da un trattino. Il primo numero indica la datazione della colata, il secondo numero indica il sito di campionamento sulla colata stessa e tiene conto della quota: il numero più piccolo indica il sito a quota inferiore.

Per la determinazione del parametro biometrico preso in considerazione, l'altezza del pulvino, in laboratorio si è stimata l'altezza dei 15 individui di dimensioni maggiori tra quelli raccolti in ogni singola stazione, calcolandone poi la media aritmetica (Tab. 1).

I parametri geologico-ambientali presi in considerazione per una migliore caratterizzazione di ciascuna stazione sono: la datazione della colata, i dati climatici (precipitazione media annua, temperatura media annua, escursione termica media annua, evapotraspirazione media annua, fascia bioclimatica d'appartenenza secondo la classificazione di RIVAS-MARTÍNEZ, 1995, desunti da DRAGO *et al.*, 2000), e i parametrici geografico-fisiografici (coordinate geografiche U.T.M., quota ed esposizione, rilevati personalmente).

La conoscenza della datazione delle colate sulle quali si è campionato ha permesso di stimare approssimativamente l'età massima possibile di alcuni dei licheni analizzati infatti, osservazioni su numerose colate "recenti" (1985 sul versante S; 1991, 1987 e 1989 sul versante E, 1981 sul versante N) non hanno evidenziato alcun segno di colonizzazione delle rocce di neogenesi. Soltanto sulla colata del 1983 sul versante S si sono osservate sporadiche e minuscole squamule del tallo primario di *S. vesuvianum*. Si ritiene quindi plausibile ritenere che la prima comparsa dei podezi dei primi individui non si abbia prima di vent'anni dal termine dell'eruzione stessa e di conseguenza è possibile stimare approssimativamente l'età massima possibile di alcuni dei licheni analizzati: non superiore a 10 anni sulla colata del 1971, la cui comparsa sarebbe quindi successiva all'incidente di Chernobyl; non superiore a 30 anni sulla colata del 1950, successivi quindi all'ultimo esperimento nucleare sahariano, ma antecedenti all'incidente di Chernobyl; possibili età maggiori (colate del 1928, 1923, 1910, 1911 1832, 1792 e 1536).

Il tallo lichenico è stato prelevato interamente dal substrato. Al fine di raggiungere la quantità necessaria per le analisi (vedi oltre), per ogni stazione è stato necessario formare i campioni con un *pool* di almeno 50 individui scelti tra quelli di maggiori dimensioni (quindi verosimilmente di età maggiore) presenti in un raggio di circa 5 metri dal punto georeferenziato.

Dopo essere stato accuratamente pulito dai residui di roccia e di polvere lavica in laboratorio, ogni singolo lichene del *pool* di un campione è stato pestato manualmente in un mortaio di agata. Successivamente, al fine di evitare variazioni del contenuto di acqua residua il materiale è stato essiccato in stufa a 40 °C per 6 ore. Il materiale così polverizzato ed essiccato è stato posto in capsule Petri di 35 mm di diametro avendo cura di occuparne interamente il volume (9 cc), sì da rispettare al massimo la geometria delle misure di radioattività. Dopo aver determinato il peso del loro contenuto, le capsule ricolme sono state chiuse con il loro coperchio e sigillate con del nastro di teflon. La massa di polvere di licheni contenuta nelle capsule è risultata compresa tra un minimo di 4,1 g ed un massimo di 5,3 g. Questa differenza è verosimilmente dovuta alla diversa compressione del materiale nelle capsule.

Le concentrazioni del ^{137}Cs sono state determinate dal Prof. Salvatore

Rizzo del Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università di Palermo. È stato utilizzato il metodo della spettrometria γ ad alta risoluzione. La catena di conteggio faceva capo ad un rivelatore al germanio iperpuro (HpGe) con efficienza 32% e risoluzione 1.8 keV adatto alla rivelazione di fotoni da circa 100 a 10000 keV e raffreddato mediante una barra di rame immersa in azoto liquido. Per abbassare notevolmente il fondo atmosferico il rivelatore è completamente circondato da uno strato di piombo dello spessore di 10 cm. Gli impulsi prodotti dai raggi γ sono stati amplificati, digitalizzati e classificati mediante un multicanale connesso ad un computer. Lo spettro, accumulato per la durata minima di 250.000 s, si estendeva fino all'energia di 1.800 keV in modo da comprendere, oltre all'energia del ^{137}Cs (661.662 keV), anche quella del ^{40}K (1460,8 keV), da utilizzare eventualmente per successive elaborazioni.

Sono state eseguite periodiche rilevazioni di fondo della durata di 250.000 s, di cui si è tenuto conto per la determinazione delle aree nette dei picchi.

Gli spettri ottenuti sono stati elaborati mediante il programma di analisi dedicato *Gammaplus* della Silena per la taratura in energia e per la determinazione delle aree dei picchi di interesse.

Per la taratura in efficienza si sono utilizzati due campioni tarati forniti dall'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni dell'ENEA, contenenti l'isotopo di interesse con attività certificata al 5%.

In tutti gli spettri effettuati, anche quelli della durata di parecchi giorni, non si sono registrati effetti di deriva degli spettri stessi. Per ridurre a priori l'occorrere di questi slittamenti, si procedeva per ogni spettro alla ritaratura in energia usando picchi noti all'interno dello spettro. L'entità variabile della massa utilizzata (compresa tra 4,1 e 5,3 g) produceva variazioni di densità e quindi variazioni di efficienza di rivelazione. Per calcolare la variazione di efficienza si sono usati due campioni tarati di densità diversa e si è assunta una variazione lineare della efficienza con la densità.

Le misure di radioattività non compromettono l'integrità dei campioni analizzati; questo ha permesso di utilizzare lo stesso materiale per analisi di concentrazione di metalli. I risultati di tali analisi sono adesso in fase finale di elaborazione e saranno oggetto di un futuro contributo.

I parametri stazionali, le dimensioni medie dei licheni di ogni singola stazione e la concentrazione del ^{137}Cs (espressa in Bq/Kg) sono stati riportati in Tab. 1, avendo anche cura di esprimere in classi di appartenenza numerose categorie di dati, al fine di permettere la ricerca di eventuali correlazioni statisticamente significative tra le diverse variabili considerate e il bioaccumulo del radionuclide.

Tabella 1
 Valori assoluti dei parametri considerati, della concentrazione del ¹³⁷Cs e ripartizioni in classi di appartenenza di diversi parametri per ogni singola stazione.

| Datazione colata e stazioni | Coordinate geografiche UTM | | Altezza media puvino (mm) | quota sito (m slm) | classe quota | esposizione | classe esposizione | Fascia bioclimatica | classe bioclimatica | T (°C) | ΔT annua (°C) | evapotraspirazione (mm) | classe evapotraspirazione | precipitazioni (mm) | classe precipitazioni | [¹³⁷ Cs] (Bq/kg) |
|-----------------------------|----------------------------|---------|---------------------------|--------------------|--------------|-------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|--------|---------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|
| | EST | NORD | | | | | | | | | | | | | | |
| 1971-1 | 509732 | 4177195 | 14 | 861 | 2 | NE | 1 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 9,0 ± 16,3% |
| 1971-2 | 508191 | 4177981 | 6 | 1039 | 3 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 1200-1400 | 4 | 8,0 ± 31,0% |
| 1971-3 | 508518 | 4178694 | 12 | 1093 | 3 | E | 3 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 11,0 ± 14,2% |
| 1971-4 | 507482 | 4178314 | 8 | 1197 | 3 | S | 5 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 13 | 18 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 6,0 ± 25,6% |
| 1950-1 | 508806 | 4176795 | 19 | 952 | 2 | NE | 2 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 1200-1400 | 4 | 28,0 ± 8,8% |
| 1928-1 | 510766 | 4180114 | 33 | 897 | 2 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 40,0 ± 4,5% |
| 1928-2 | 509502 | 4180514 | 36 | 1048 | 3 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 43,0 ± 4,4% |
| 1928-3 | 507424 | 4179342 | 23 | 1288 | 4 | E | 3 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 13 | 16 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 33,0 ± 7,3% |
| 1923-1 | 510180 | 4189611 | 24 | 671 | 1 | N | 1 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 16 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 25,0 ± 5,7% |
| 1923-2 | 508873 | 4188959 | 44 | 694 | 1 | NW | 8 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 16 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 40,0 ± 4,3% |
| 1923-3 | 507927 | 4188115 | 25 | 803 | 2 | NE | 2 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 30,0 ± 5,5% |
| 1911-1 | 508124 | 4191638 | 37 | 596 | 1 | N | 1 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 16 | 15 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 59,0 ± 3,0% |
| 1911-2 | 507658 | 4190579 | 36 | 667 | 1 | NW | 8 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 16 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 44,0 ± 4,0% |
| 1911-3 | 507614 | 4189207 | 43 | 762 | 1 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 60,0 ± 3,0% |
| 1911-4 | 506610 | 4188537 | 32 | 976 | 2 | NE | 2 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 52,0 ± 3,4% |
| 1910-1 | 499460 | 4164281 | 39 | 838 | 2 | S | 5 | mesomediterraneo subumido super. | 4 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 800-1000 | 2 | 59,0 ± 4,6% |
| 1910-2 | 499605 | 4165594 | 40 | 940 | 2 | SW | 6 | mesomediterraneo subumido super. | 4 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 800-1000 | 2 | 42,0 ± 6,0% |
| 1910-3 | 499088 | 4166832 | 26 | 1051 | 3 | SW | 6 | mesomediterraneo subumido super. | 4 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 800-1000 | 2 | 37,0 ± 6,7% |
| 1910-4 | 498810 | 4167872 | 29 | 1148 | 3 | E | 3 | mesomediterraneo subumido super. | 4 | 13 | 17 | 700-800 | 2 | 800-1000 | 2 | 30,0 ± 4,7% |
| 1832-1 | 489678 | 4183108 | 25 | 1036 | 3 | NW | 8 | mesomediterraneo subumido infer. | 2 | 13 | 17 | 700-800 | 2 | 700-800 | 1 | 25,0 ± 6,0% |
| 1832-2 | 491767 | 4182286 | 36 | 1296 | 4 | W | 7 | supramediterraneo subumido super. | 4 | 13 | 18 | 600-700 | 1 | 800-1000 | 2 | 57,0 ± 3,1% |
| 1832-3 | 492979 | 4181591 | 35 | 1401 | 5 | W | 7 | supramediterraneo subumido super. | 3 | 12 | 18 | 600-700 | 1 | 800-1000 | 2 | 63,0 ± 3,1% |
| 1832-4 | 493481 | 4181216 | 34 | 1498 | 5 | SW | 6 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 12 | 19 | 600-700 | 1 | 1000-1200 | 3 | 73,0 ± 2,7% |
| 1792-1 | 508318 | 4171440 | 30 | 775 | 1 | E | 3 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 45,0 ± 4,0% |
| 1792-2 | 507809 | 4171664 | 32 | 912 | 2 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 15 | 16 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 54,0 ± 3,1% |
| 1792-3 | 506339 | 4172052 | 29 | 1003 | 3 | SE | 4 | mesomediterraneo umido inferiore | 1 | 14 | 17 | 700-800 | 2 | 1000-1200 | 3 | 58,0 ± 3,2% |
| 1792-4 | 506346 | 4172046 | 21 | 1119 | 3 | NE | 2 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 12 | 18 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 33,0 ± 4,5% |
| 1792-5 | 505720 | 4171990 | 31 | 1253 | 4 | S | 5 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 13 | 18 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 61,0 ± 2,9% |
| 1792-6 | 505102 | 4172334 | 22 | 1312 | 4 | SE | 4 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 12 | 18 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 29,0 ± 5,3% |
| 1792-7 | 503850 | 4172214 | 33 | 1451 | 5 | SW | 6 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 12 | 19 | 600-700 | 1 | 1200-1400 | 4 | 41,0 ± 4,5% |
| 1536-1 | 492234 | 4188250 | 31 | 975 | 2 | N | 1 | mesomediterraneo subumido super. | 4 | 13 | 17 | 700-800 | 2 | 800-1000 | 2 | 31,0 ± 5,8% |
| 1536-2 | 493241 | 4186849 | 34 | 1048 | 3 | NW | 8 | supramediterraneo umido inferiore | 5 | 11 | 19 | 600-700 | 1 | 1000-1200 | 3 | 41,0 ± 4,0% |

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle analisi mostrano una presenza del ^{137}Cs nei talli lichenici di tutte le stazioni nonostante le misurazioni siano state effettuate dopo 14 anni dall'incidente di Chernobyl ed oltre 50 anni dall'ultimo esperimento nucleare in atmosfera condotto nel Sahara. Non è stata invece rilevata la presenza del ^{134}Cs ; verosimilmente, il relativamente breve tempo di dimezzamento ne ha ridotto la quantità fino a limiti non rilevabili. In che misura i diversi episodi che hanno liberato in atmosfera il radionuclide abbiano contribuito alla contaminazione non è possibile stabilirlo, ed i risultati ottenuti sono da intendersi come la somma di più eventi, anche molto lontani nel tempo e nello spazio. Le quantità misurate di ^{137}Cs oscillano dal minimo di 6 Bq/Kg (stazione 1971-4) al massimo di 73 Bq/Kg (stazione 1832-4). La presenza del radionuclide è stata rilevata anche in licheni di non oltre 10 anni di età (stazioni della colata del 1971), la cui comparsa è quindi successiva all'incidente di Chernobyl. Sembrerebbe quindi che anche il ^{137}Cs residuo, presente in concentrazioni infinitesimali nell'ambiente, venga attivamente bioaccumulato dallo *S. vesuvianum*.

Tale dato acquista ancor più valore in considerazione del fatto che già nel 1993 sull'Etna non era più possibile misurare il ^{137}Cs atmosferico ed analisi del terreno davano risultati al limite della rilevabilità, ad esclusione di 5 stazioni, il cui valore massimo non superava comunque i 3,4 Bq/Kg (Prof. Salvatore Rizzo, Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Prof. Stefano Bellia, Dipartimento di Chimica dei Fluidi Terrestri e Atmosferici dell'Università di Palermo, dati inediti: cfr. Tab. 2), a fronte di un valore minimo di 6 Bq/Kg riscontrato nel 2000 nei talli lichenici.

Tabella 2

Risultati di alcune analisi del terreno effettuate nel 1993 (S. Rizzo e S. Bellia, dati inediti).
In grassetto sono evidenziate le località oggetto di indagine anche nel presente lavoro.

| Località | [^{137}Cs] Bq/kg |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| colata preistorica (versante N) | 2,58 |
| colata del 1646 (versante NE) | 3,43 |
| colata del 1923 (versante NE) | 0,70 |
| scorie dell'eruzione del 1990 | 0,70 |
| colata del 1971 (versante E) | 0,80 |
| colata del 1950 (versante E) | 0,90 |
| colata del 1408 (versante S) | 0,70 |
| colata del 1669 (versante S) | 3,21 |
| colata del 1832 (versante S) | 0,70 |
| colata del 1985 (versante SW) | 2,28 |
| colata del 1610 (versante SW) | 2,31 |
| vallone Ignisanti (datazione ignota) | 0,80 |

La media e la mediana dei valori di concentrazione del ^{137}Cs ammontano rispettivamente a 40 e 41 Bq/Kg, con un intervallo tra valore massimo e minimo di 67. La deviazione standard è di 17.3 ed il coefficiente di variazione è 44 (tutta la statistica di base è stata sviluppata con il foglio di calcolo elettronico Microsoft). L'elevato valore della deviazione standard e del Coefficiente di Variazione, associati all'intervallo, indicano una grande difformità dei valori riscontrati nelle diverse stazioni, così come si evince anche dalla Fig. 4.

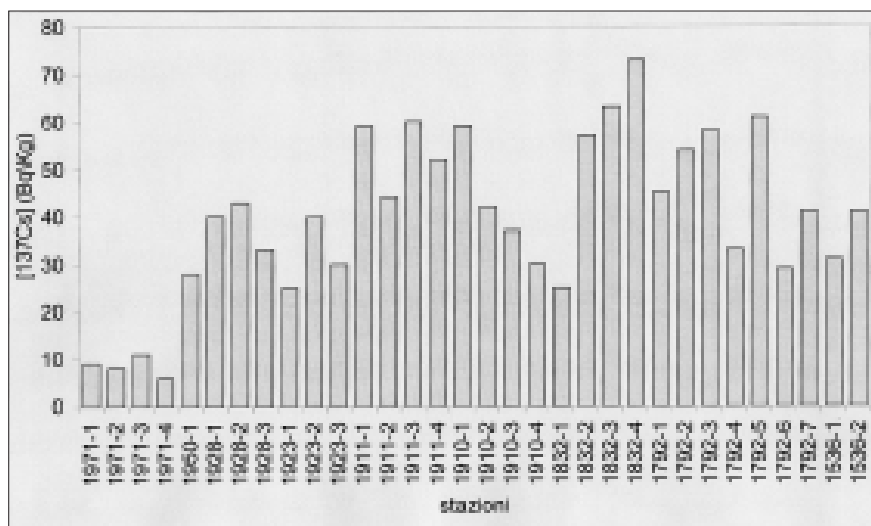


Fig. 4 — Andamento delle [^{137}Cs] nelle diverse stazioni.

Tale difformità indica una disomogenea distribuzione dell'elemento considerato in un ambiente dalle caratteristiche relativamente uniformi. Tale comportamento è tipico di manifestazioni non naturali ed è spesso da attribuire a fenomeni di inquinamento. In questo caso specifico essendo il ^{137}Cs un radioisotopo artificiale la sua presenza è da attribuire esclusivamente a un'alterazione di origine antropica.

Il calcolo delle correlazioni (effettuato con il software statistica della StatSoft) esclude in questo caso una connessione tra la distribuzione del ^{137}Cs la quota ($r = 0,12$), ipotesi formulata in passato da diversi autori (ADAMO *et al.*, 1989; TRIULZI *et al.*, 1996). Si è invece evidenziata una correlazione altamente significativa sotto un profilo statistico tra le concentrazioni del ^{137}Cs nei talli lichenici e il parametro morfologico (altezza del pulvino) ($r = 0,81$, $p < 0,01$, $n = 32$). L'interpretazione di questa correlazione (Fig. 5) non appare immediata.

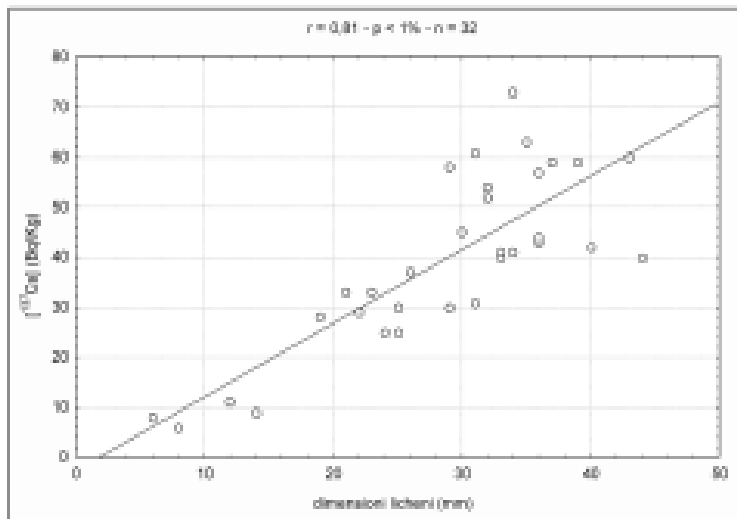


Fig. 5 — Correlazione tra ^{137}Cs nei licheni e relative dimensioni (altezza del pulvino) ($r = 0,81$, $p < 0,01$, $n = 32$).

Non esistono in letteratura dati sul rapporto dimensione lichene-bioaccumulato. In uno studio sul bioaccumulo di radionuclidi condotto in Toscana su due diverse specie licheniche, *Parmelia caperata* (L.) Ach. e *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., presenti nelle stesse stazioni (LOPPI & DE DOMINICIS, 1996), si è evidenziato tuttavia che nella specie di maggiori dimensioni (*L. pulmonaria*) si aveva una maggiore concentrazione di ^{137}Cs rispetto a quella di minori dimensioni (*Parmelia caperata*). Tale differenza è stata spiegata alla luce della loro diversa ecologia: poiché *L. pulmonaria* è molto più aeroigrofitica, è stato ipotizzato che abbia assorbito molta più acqua e/o umidità atmosferica nei giorni immediatamente successivi all'incidente di Chernobyl e quindi molto più ^{137}Cs che non *P. caperata*. Un'altra ricerca, condotta in Austria (HOFMANN *et al.*, 1993) su diverse specie raccolte nelle stesse stazioni, ha evidenziato un maggiore bioaccumulo in specie di maggiori dimensioni (in questo caso *Pseudoevernina furfuracea* (L.) Zopf.). Per spiegare tale comportamento, gli autori hanno ipotizzato che la morfologia del tallo potesse giocare un importante ruolo sui fenomeni di bioaccumulo. Tale ipotesi era stata formulata anche da altri autori (JAHNS, 1988; SEAWARD *et al.*, 1988). Per quanto questi lavori non siano perfettamente comparabili con il nostro perché trattano di specie diverse, appare interessante rimarcare come essi giungano alla stessa conclusione, e cioè che specie di maggiori dimensioni accumulino maggiormente rispetto specie di minori dimensioni. Nessuno dei lavori citati ha preso in considera-

zione, nell'ambito della stessa specie, le diverse dimensioni degli individui. È dunque lecito ipotizzare che, nel caso di inquinamenti di tipo acuto (presenza dell'inquinante in concentrazioni medio-alte per brevi periodi), nei processi di bioaccumulo la dimensione e la forma del bioaccumulatore giochino un ruolo non indifferente sulla quantità del bioaccumulato.

La ricerca di correlazioni tra il bioaccumulo del ^{137}Cs e gli altri parametri ecologici ed ambientali presi in considerazione quali la temperatura media annua, l'escursione termica annua, le precipitazioni medie annue, l'evapotraspirazione media annua, l'esposizione, la fascia bioclimatica di appartenenza non ha dato risultati statisticamente significativi.

Ringraziamenti — Sono grato ai numerosi amici e colleghi che mi hanno sempre incoraggiato nella stesura del presente contributo. Desidero però ringraziare particolarmente il prof. Salvatore Rizzo del Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università di Palermo per aver messo a disposizione, in maniera assolutamente incondizionata, tutte le sue risorse materiali e culturali senza preconcetti e con l'interesse e la voglia di cimentarsi in "qualcosa di nuovo". Ringrazio anche il prof. Stefano Bellia del Dipartimento di Chimica dei Fluidi Terrestri e Atmosferici dell'Università di Palermo per avermi permesso, assieme al prof. Salvatore Rizzo, di pubblicare i loro dati inediti. Infine ringrazio il dr. Salvo Pasta per i suggerimenti durante la prima stesura del testo.

BIBLIOGRAFIA

- AARKROG A., 1975 — Radionuclide levels in mature grain related radiocesium content and time of direct contamination. — *Health Phys.*, 28: 557-562.
- ADAMO P., VIOLANTE P. & VIOLANTE A., 1989 — Contenuto di radionuclidi nel tallo di *Stereocaulon vesuvianum* (Pers.). — *Atti Soc. Ital. Ecol.*, 7: 173-176.
- ADAMO P., ARIENZO M., PUGLIESE M., ROCA V. & VIOLANTE P., 2004 — Accumulation history of radionuclides in the lichen *Stereocaulon vesuvianum* from Mt. Vesuvius (South Italy). — *Environmental Pollution*, 127 (3):455-461.
- ANDERSEN A.J., 1967 — Investigations on the plant uptake of fission products from contaminated soil. Influence of plant species and soil types on the uptake of radioactive Strontium and Caesium. — Risø Rep. Nr. 170 Agric. Res. Dep., *Danish Atom Energy Comm. Res. Establ. Risø Denmark*.
- BUKOVAC M.J., WITTMER S.H. & TURKEY H.B., 1965 — Aboveground plant parts as a pathway for entry of fission products into the food chain with special reference to Sr 89-90 and Cs-137. In: E. B Fowler (ed.) "Radioactive fallout soils, plants, food, man". — *Elsevier*, New York.
- CANIGLIA G., CHIOVARO S. & NASCIBENE J., 2000 — Preliminary data in Prealps and in Dolomites (North-East Italy) on lichens as radioactivity bioaccumulators. — The fourth IAL Symposium progress and problems in Lichenology at the turn of the millennium. Barcellona 2000, *Book of abstracts*: 117.
- COUGHTREY P.J. & THORNE M.C., 1983 — Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. A critical review of data. 1 — *Balkema Verlag*, Rotterdam.
- DAHLMAN R.C., AUEBACH S. & DUNAWAY P.B., 1969 — Behaviour of C-137 tagged particles in a fescue meadow. — In: Environmental Contamination by radioactive material. *IAEA-SM-117/72*, Wien.

- DRAGO A., CARTABELLOTTA D., LO BIANCO B. & LOMBARDO M., 2000 — Atlante climatologico della Sicilia (CD-ROM). — *Assessorato Agricoltura e Foreste della Regione Siciliana. Servizi allo Sviluppo, Unità Operativa di Agrometeorologia. Realizzazione tecnica INTEA s.r.l.*, Palermo.
- DI LELLA L.A., FRATI L., LOPPI S., PROTANO G. & RICCOBONO F., 2003 — Lichens as biomonitors of uranium and other trace elements in an area of Kosovo heavily shelled with depleted uranium rounds. — *Atmospheric Environment*, 37: 5445- 5449.
- DI LELLA L.A., FRATI L., LOPPI S., PROTANO G. & RICCOBONO F., 2004 — Environmental distribution of uranium and other trace elements at selected Kosovo sites. — *Chemosphere*, 56: 861-865.
- ERÄMETSÄ O. & YLIRUOKANEN I., 1971 — Nyobium, molybdenum, hafnium, tungsten, thorium and uranium in lichens and mosses. — *Suom. Kemistilehti*, B 44, 32.
- FEIGE G.B., NIEMANN L. & JAHNKE S., 1990 — Lichens and mosses: silent chronists of the Chernobyl accident. — *Bibliot. Lichenol.*, 38: 63-77.
- GORHAM E., 1959 — A comparison of lower and higher plants as accumulators of radioactive fallout. — *Canad. J. Bot.*, 37: 327.
- HOFMANN W., ATARPOUR N., LETTNER H. & TÜRK R., 1993 — ^{137}Cs concentrations in lichens before and after the Chernobyl accident. — *Health Physics*, 64. 70-73.
- HOLM E. & PERSSON R.B.R., 1975 — Fall-out Plutonium in Swedish reindeer lichens. — *Health Phys.*, 29: 43-51.
- HVINDEN T. & LILLEGRAVEN A., 1961 — Cesium-137 and Strontium-90 in precipitation, soil and animals in Norway. — *Nature*, 192: 1144.
- JAHNS H.M., 1988 — The lichens thallus. Pp. 95-143 in: GALUN M. (ed.), Handbook of lichenology, Vol. I. — *CRC Press*, Boca Raton.
- KAURANEN P. & MIETTINEN J.K., 1969 — Po-210 and Pb-210 in the arctic food chain and the natural radiation exposure of Lapps. — *Health Phys.*, 16: 287.
- LOPPI S., 1999 — Licheni come bioaccumulatori di elementi in traccia. Stato dell'arte in Italia. — Atti Workshop Biomonitoraggio della qualità dell'aria sul territorio nazionale, *ANPA Serie, Atti 2*.
- LOPPI S. & DE DOMINICIS V., 1996 — Lichens as long-term biomonitors of air quality in central Italy. — *Acta Bot. Neerl.*, 45. 563-570.
- LOPPI S., RICCOBONO F., ZHANG ZH. Z., SAVIC S., IVANOV D. & PIRINTSOS S. A., 2003 — Lichens as biomonitors of uranium in the Balkan area. — *Environmental Pollution*, 125: 277-280.
- LOPPI S., DI LELLA A., FRATI L., PROTANO G., PIRINTSOS S.A. & RICCOBONO F., 2004 — Lichens as biomonitors of depleted uranium in Kosovo. — *J. Atmospheric Chemistry*, 49: 437-445.
- LORENZINI G., 1984 — Le piante e l'inquinamento atmosferico. — *Edagricole*, Bologna, 359 pp.
- LUDWIG F., 1962 — Die Aufnahme von Caesium 137 durch Kartoffelblätter. — *Z. Pfl. Ern. Dung. Bodenkd.*, 99: 190-194.
- MANES F. (ed.), 1989 — Man and the Environment. The plant components in anthropic systems. — *Proc. Soc. Bot. Ital. Conference*.
- MIDDLETON L.J., 1959 — Radioactive Strontium and Caesium in the edible parts of crop plants after foliar contamination. — *Intern. J. Radiat. Biol.*, 1: 387-402.
- MIETTINEN J.K., 1969 — The present situation and recent developments in the accumulation of Cs-137, Sr-90 and Fe-55 in arctic foodchains. - In: International Symp. On Environmental Contamination by Radioactive Materials., *IEAE*, Vienna: 145-151.
- MIETTINEN J.K., 1979 — Final report for the project "Radioactive foodchains environment". — *Dept. of Radiochemistry, University of Helsinki*. Rep. C-02 3011, A002.
- MOBERG R. & HOLMÅSEN I., 1992 — Flechten von Nord- und Mitteleuropa. Ein Bestimmungsbuch. — *Fischer*, Stuttgart, 237 pp.

- NIMIS P.L., GIOVANI C. & PADOVANI R., 1986 — La contaminazione da $^{134}\text{Cesio}$ e $^{137}\text{Cesio}$ nei macromiceti del Friuli-Venezia Giulia nel 1986. — *Stud. Geobot.*, 6: 3-121.
- NIMIS P.L., 1987 — I macrolicheni d'Italia. Chiavi analitiche per la determinazione. — *Gortania, Atti Museo friul. Storia nat.*, 8 (1986) 101-220.
- NIMIS P.L., 1993 — The Lichens of Italy. — *Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino*, 897 pp.
- PERSSON R.B.R., 1973 — Sr-90 in northern Sweden: relationships and annual variations from 1961 to 1969 in lichen reindeer and man. — *Health phys.*, 20: 393.
- PIERVITTORI R., 1999 — Licheni come bioindicatori della qualità dell'aria. Stato dell'arte in Italia. — Atti Workshop Biomonitoraggio della qualità dell'aria sul territorio nazionale, ANPA Serie, Atti 2.
- PLUMMER G.L., 1969 — Fallout radioisotopes in Georgia lichens. — *Radioecol. Proc. 2th Nat. Symp.*, 1967: 571.
- RAHOLA T. & MIETTINEN J.K., 1971 — Radionuclides in plants and reindeer meat in Lapland. — *Techn. Progr. Rep. SAEC NYO*, 3445-14: 15.
- RIVAS-MARTÍNEZ S., 1995 — Clasificación bioclimática de la tierra. — *Fol. Bot. Matrit.*, 16.
- ROMANO R., 1982 — Succession of the volcanic activity in Etnean area. — *Mem. Soc. geol. ital.*, 23, 27-48.
- ROMANO R., 1993 — Mt. Etna, carta naturalistica e turistica. — S.E.L.C.A., Firenze.
- ROMANO R., STURIALE C. & LENTINI F., 1979 — Carta Geologica del Monte. Etna, Scala 1:50000. — Progetto Finalizzato Geodinamica, CNR. Istituto Internazionale di Vulcanologia, Catania.
- SEAWARD M.R.D., HESLOP J.A., GREEN D. & BYLINSKA E.A., 1988 — Recent levels of radionuclides in lichen from southwest Poland with particular reference to ^{134}Cs and ^{137}Cs . — *J. Environ Radioactivity*, 7: 123-129.
- SALO A. & MIETTINEN J.K., 1964 — Strontium-90 and Caesium-137 in arctic vegetation during 1961. — *Nature*, 201: 1177.
- TRIULZI C., NONNIS MARZANO P. & VAGHI M., 1996 — Important alpha, beta and gamma-emitting radionuclides in lichens and mosses collected in different world areas. — *Ann. di Chimica*, 86: 699-704.
- TUOMINEN Y. & JAAKKOLA T., 1973 — Absorption and accumulation of elements. The lichens. — *Academic Press*, London.

Indirizzo dell'autore — F. MERLO, via Aldo Moro, 46 - 90046 Monreale (PA); e-mail: f.merlo@inwind.it