

Impatto ambientale dell'attività mineraria in Sardegna: studi mineralogici e geochimici (*)

LUCA FANFANI (**), RAFAELE CABOI (**), ROSA CIDU (**), ALESSANDRO CRISTINI (**),
FRANCO FRAU (**), PIERFRANCO LATTANZI (**), PAOLA ZUDDAS (**)

Abstract. *Sardinia is characterized by a large variety of geologic and hydrologic environments, and by a rich wealth of mineral resources, that fueled a millennial history of mining activity. Therefore, it provides an excellent ground for studies of the environmental impact of mining activity. In this communication, we summarize the results of our studies, specifically concerning the deposits of Bacchu Locci (polymetallic – Pb,As), Furtei (epithermal Au), Monteponi (Pb-Zn-Ag), and Montevecchio (Pb-Zn-Ag). In abandoned mining districts (Bacchu Locci, Monteponi, and Montevecchio), because of a poor management of environmental issues, we observe significant heavy metal contamination. On the other hand, in the active Furtei mine the first four years of exploitation did not cause remarkable changes with respect to pre-mining baseline conditions.*

INTRODUZIONE

Per sua natura, l'attività mineraria è tra le attività industriali che maggiormente possono generare un rilevante impatto ambientale. Esso comprende, oltre ad un'intrinseca pericolosità, che può dar luogo a incidenti sul lavoro e/o malattie professionali, effetti quali: la modificazione più o meno permanente del paesaggio, la sottrazione ad altre attività (es. agricoltura) di aree più o meno estese, la creazione di morfologie instabili e soggette a frane e crolli, la possibile interferenza con la falda freatica ed il circuito idrologico in genere, l'inquinamento acustico e/o dispersione di polveri e/o gas. Ma l'impatto più rilevante è senz'altro rappresentato dalla dispersione nell'ambiente di elementi tossici (principalmente, i cosiddetti «metalli pesanti», termine un po' generico che comprende metalli veri e propri come Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, Cr... ma anche non-metalli o semimetalli quali Se, As, Sb, Bi...). Tale dispersione può essere veicolata per via meccanica (scivolamento gravitativo, ruscellamento, trasporto eolico), o per via chimica

(*) Presentato il 26/01/01.

(**) Dip. Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari.

(trasporto in soluzione); in ogni caso, il circuito delle acque superficiali rappresenta la via preferenziale di dispersione di questi elementi tossici anche a distanze notevoli dalla sorgente. È bene sottolineare che tali fenomeni di dispersione avvengono naturalmente ogni qualvolta rocce mineralizzate affiorano in superficie, o vengono comunque in contatto con l'ambiente esogeno; tuttavia, l'intervento antropico mediante la coltivazione mineraria esalta enormemente la portata del fenomeno.

Nell'ultimo ventennio, la crescente consapevolezza della necessità di coniugare le attività produttive e lo sviluppo economico in genere con la salvaguardia dell'ambiente ha stimolato, soprattutto in paesi come USA, Canada e Australia, numerosi studi ed iniziative volti a comprendere i meccanismi della dispersione di elementi tossici in conseguenza dell'attività mineraria, al fine di prevedere e prevenire le conseguenze, e/o proporre idonee misure di contenimento e risanamento.

In questo contesto, la Sardegna si colloca in una posizione affatto particolare. In poche altre regioni come nella nostra l'attività mineraria ha inciso, attraverso i millenni, in maniera così profonda sulla storia, sull'economia, sulla cultura e sul paesaggio. Pur se negli ultimi anni abbiamo assistito, in sintonia con quanto avviene a livello nazionale ed europeo, ad un complessivo declino dell'attività estrattiva, ne restano come patrimonio le cospicue testimonianze, che non a caso sono oggetto di consistenti iniziative di recupero e valorizzazione. Peraltro l'attività estrattiva si è per lo più sviluppata, in tempi anche recenti, con assai scarsa attenzione alla prevenzione e al contenimento dell'impatto ambientale, e gli interventi di bonifica e risanamento al cessare della coltivazione sono stati minimi. Pertanto, il bilancio dell'impatto ambientale dell'attività mineraria in Sardegna è piuttosto pesante, e appare chiaro come, nel quadro delle sopra ricordate iniziative di recupero e valorizzazione delle aree minerarie dismesse, le misure di risanamento ambientale occupino un ruolo di particolare importanza.

Il nostro gruppo si occupa da circa un decennio dello studio dei fenomeni che determinano l'impatto ambientale dell'attività mineraria. La natura intrinsecamente complessa di tali fenomeni rende necessario un approccio interdisciplinare al loro studio. Pertanto, pur concentrandoci prevalentemente, in base alle nostre competenze, sugli aspetti mineralogici e geochimici, abbiamo attivato proficue collaborazioni con colleghi di altre discipline geologiche, chimiche e biologiche della nostra Facoltà e di altre istituzioni italiane ed estere. Pur se le nostre ricerche hanno finalità prevalentemente «accademiche», ossia indagare sui principi fondamentali che controllano il rilascio dei metalli, esse hanno altresì, e non per caso, potenziali applicazioni pratiche. In questo senso, la nostra attività si è svolta di concerto e in collaborazione con società minerarie e di prospezione, enti locali territoriali, ed istituzioni comunque coinvolte nella tutela dell'ambiente e del territorio. Per ovvi motivi, le nostre ricerche, pur avendo interessato anche altre aree italiane ed estere, si sono sviluppate prevalentemente in Sardegna. È per noi un onore dedicare alla memoria di Francesco Corongiu un breve sommario dei risultati da noi conseguiti in alcune aree della nostra regione (Fig. 1).

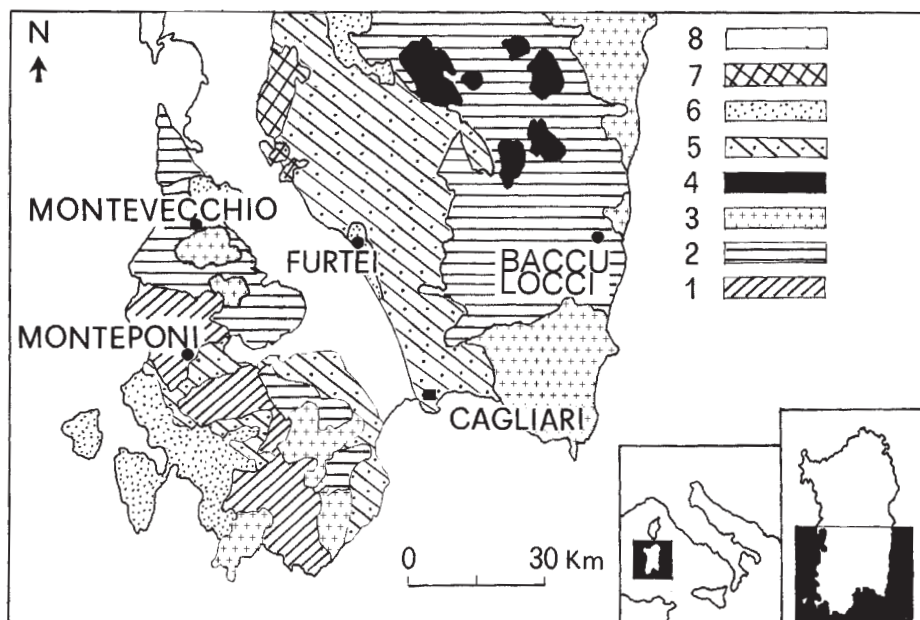
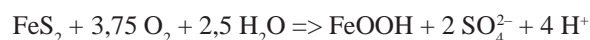


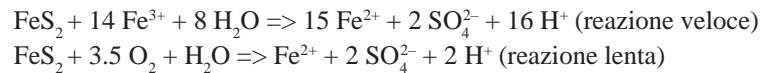
Figura 1. Carta geologica schematica della Sardegna meridionale con la localizzazione delle aree considerate in questo studio. Legenda: 1) Sedimenti Cambriani (prevalentemente carbonatici); 2) Metasedimenti Cambriano Superiore-Siluriano; 3) Graniti Ercinici; 4) Rocce carbonatiche del Mesozoico; 5) Sedimenti del Terziario (Eocene-Pliocene); 6) Vulcaniti dell'Oligo-miocene; 7) Vulcaniti del Pliocene-Pleistocene; 8) Sedimenti Quaternari.

MECCANISMI DI RILASCIO DEI METALLI IN AMBIENTI MINERARI

Ai fini di una migliore comprensione dei paragrafi successivi, riteniamo utile premettere un breve richiamo sui meccanismi che determinano e controllano il rilascio e la dispersione dei «metalli pesanti» in ambiente minerario. La maggior parte dell'abbondante letteratura mondiale, comprese le situazioni da noi studiate in Sardegna, riguarda casi di giacimenti di minerali metalliferi, in cui i «metalli pesanti» sono, nella mineralizzazione primaria, associati in prevalenza a solfuri e subordinatamente ad ossidi. Poiché i solfuri sono in generale instabili in condizioni esogene, l'esposizione dei corpi minerari all'ambiente superficiale provoca la loro ossidazione e/o dissoluzione, con conseguente rilascio dei metalli contenuti. Di capitale importanza è la reazione di ossidazione/dissoluzione della pirite (FeS_2), il solfuro più comune e abbondante, che può essere così schematizzata:



Si tratta di una reazione che produce un ambiente estremamente acido con pH compresi tra 2 e 4, mentre pH negativi si raggiungono quando non avviene la precipitazione del Fe^{3+} , secondo le seguenti reazioni:



(cf. [1]). Questi bassi pH favoriscono l'ulteriore dissoluzione di altri solfuri ed il trasporto in soluzione dei «metalli pesanti». In generale, si osserva infatti nelle acque di miniera una chiara correlazione tra bassi valori di pH e contenuto di metalli. Il fenomeno è conosciuto come «acid mine drainage» (AMD), ed è probabilmente il problema di maggior rilevanza ambientale associato all'attività mineraria. Come accennato nell'introduzione, il fenomeno si verifica anche in modo del tutto naturale in corrispondenza di affioramenti di rocce contenenti pirite; tuttavia, la coltivazione mineraria esalta tale meccanismo, a causa dell'esposizione all'ambiente esogeno di grandi masse di mineralizzazione primaria, e della comminazione del materiale estratto, che ne aumenta la reattività.

Altri solfuri contenenti Fe (pirrotina, arsenopirite, alcune varietà di blenda) hanno un comportamento analogo a quello della pirite. Peraltro, la produzione di drenaggio acido viene più o meno efficacemente contrastata da reazioni di neutralizzazione (principalmente ad opera di carbonati, soprattutto calcite, in subordine dolomite, ankerite e in minor misura silicati quali olivina, clorite, ecc.), che hanno come conseguenza la fissazione dei metalli in minerali secondari mediante fenomeni di coprecipitazione e/o adsorbimento. Particolarmente significativo il ruolo svolto dagli idrossidi di ferro, che possono adsorbire con apprezzabile efficacia elementi quali As, Pb e altri. Occorre infine accennare all'importantissimo ruolo che possono svolgere i batteri, sia nell'ossidazione dei minerali primari, che nella fissazione dei metalli in fasi di neoformazione.

IL DISTRETTO PIOMBO-ZINCIFERO DI MONTEVECCHIO-INGURTOSU

Questo distretto ha rappresentato, insieme all'Iglesiente, una fonte di Pb, Zn ed altri metalli (Ag, Cd, Cu, Sb, Bi) di assoluta rilevanza non solo regionale, ma anche a livello nazionale ed europeo. Il sistema mineralizzato si sviluppa per oltre 10 km in direzione ENE-OSO, in forma di vene subverticali incassate in metasedimenti siliciclastici Ordoviciani (Unità dell'Arburese), nei pressi del contatto con un plutone «granitico» ercinico, e subordinatamente entro il plutone stesso. La mineralogia primaria dei corpi minerali comprende galena e blenda quali minerali utili principali, accompagnati da quantità subordinate di pirite, pirrotina, barite, calcopirite, arsenopirite; il minerale di ganga principale è il quarzo, con locali concentrazioni di carbonati (dolomite, ankerite, siderite, più raramente calcite). Fenomeni di alterazione esogena, sia precedenti la coltivazione sia conseguenti ad essa, hanno determinato lo sviluppo di molteplici minerali secondari, tra cui spiccano cerussite, anglesite, idrossidi di Fe. La coltivazione

risale all'antichità, ma il periodo di maggiore sviluppo è compreso tra il 1848 ed il 1968; ogni attività è cessata nel 1991.

Le scarsissime opere di prevenzione e risanamento eseguite durante e dopo la coltivazione hanno determinato un considerevole impatto ambientale, che già si evidenzia a colpo d'occhio nelle enormi quantità (molti milioni di m³) di sterili di coltivazione e trattamento abbancati in varie discariche (di cui la principale è quella di Piccalinna), nonché dispersi per molti chilometri lungo i corsi d'acqua che drenano la zona.

Limitandosi al solo rischio connesso alla dispersione dei metalli pesanti, rileviamo come i materiali di discarica presentino tutt'ora concentrazioni significative, e talora decisamente cospicue, di Pb, Zn, Cd e subordinatamente di Cu (Tab. 1).

Studi mineralogici ([2], [3], [4]) hanno evidenziato le modalità di alterazione dei minerali primari in queste discariche, mentre l'applicazione ai materiali delle discariche di una metodica di estrazione sequenziale, generalmente usata sui suoli, ha permesso di stabilire l'ordine e le modalità con cui gli elementi pesanti e tossici vengono ceduti all'ambiente ([5], [6]). Tenuto conto dei forti venti che spesso spazzano la zona, non è da sottovalutare l'importanza di una dispersione eolica di materiale contaminato da metalli. Tuttavia, la principale dispersione avviene attraverso le acque superficiali ([7], [8], [9]). La località di Montevecchio delimita grosso modo lo spartiacque tra due bacini: ad ovest di Montevecchio, i corsi d'acqua (Rio Naracauli, Rio Irvi-Rio Piscinas) si dirigono a OSO e giungono al mare nel tratto di costa compreso tra Piscinas e Funtanazza; ad est di Montevecchio, il Rio Montevecchio/Rio Sitzerrì disegna un ampio semicerchio inizialmente diretto a est, quindi a nord, e infine ad ovest, raggiungendo infine la laguna di Marceddì. Tutti i corsi d'acqua che interagiscono in qualche misura con le discariche presentano un chimismo dominato dai solfati, e contengono in varia misura tenori di metalli potenzialmente pericolosi, o comunque superiori ai limiti di legge; si osserva, come tendenza generale, la ben nota correlazione tra bassi valori di pH ed alti contenuti in metalli (Fig. 2), tuttavia, ad ovest di Montevecchio si hanno per lo più pH vicini alla neutralità, anche in presenza di tenori significativi di metalli (in particolare, Zn).

Contenuti ragguardevoli di metalli sono stati riscontrati anche nei sedimenti di spiaggia della zona di Piscinas, e sono rilevabili anche nelle popolazioni di *Posidonia oceanica* nei fondali marini nel raggio di alcuni km dalle foci dei corsi d'acqua contaminati ([10]). Locali attenuazioni del carico di metalli si hanno in conseguenza di apporti di affluenti non contaminati, e/o fenomeni di precipitazione/adsorbimento su minerali secondari. In particolare, tali meccanismi limitano notevolmente la mobilità di Pb, mentre Zn e Cd appaiono più mobili. Non si ha, invece, diminuzione del carico totale di metalli trasportati in occasione delle precipitazioni: infatti, l'effetto di diluizione dell'acqua piovana è contrastato da una maggiore interazione tra acque superficiali e discariche minerarie. Un fenomeno quanto mai singolare, e potenzialmente di grande interesse per possibili applicazioni in interventi di risanamento, è stato osservato in un tratto del Rio Naracauli, ove si ha un abbattimento naturale dei metalli pesanti in soluzione a causa della precipitazione di idrozincite ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$), mediata da una

Tabella 1. Contenuto in ppm di alcuni elementi nelle discariche di Montevecchio (N° = numero dei campioni; da [8]).

Località	Naracauli (N°= 20)			Piccalinna (N° = 20)			Sanna (N° = 22)		
	min.	max.	media. + st.dev.	min.	max.	media. + st.dev.	min.	max.	media. + st.dev.
Pb	320	71100	15175 ± 21191	1878	8553	4801 ± 1962	946	77681	13089 ± 22408
Zn	1880	29300	13009 ± 8360	7424	23052	14203 ± 4086	4406	48194	14708 ± 11605
Cu	38	230	108 ± 55	147	745	381 ± 55	38	3154	427 ± 781
Cd	20	190	84 ± 47	32	247	128 ± 64	41	339	121 ± 81
Co	n.a.	n.a.	—	10	26	18 ± 7*	5	38	18 ± 7
Ni	n.a.	n.a.	—	19	62	38 ± 13	5	98	30 ± 18
Fe	n.a.	n.a.	—	56100	87600	80900 ± 7500	57360	109900	87300 ± 30700
Mn	n.a.	n.a.	—	2300	6000	4445 ± 1050	300	5950	4150 ± 1520

n.a. = non analizzato; *N° = 8.

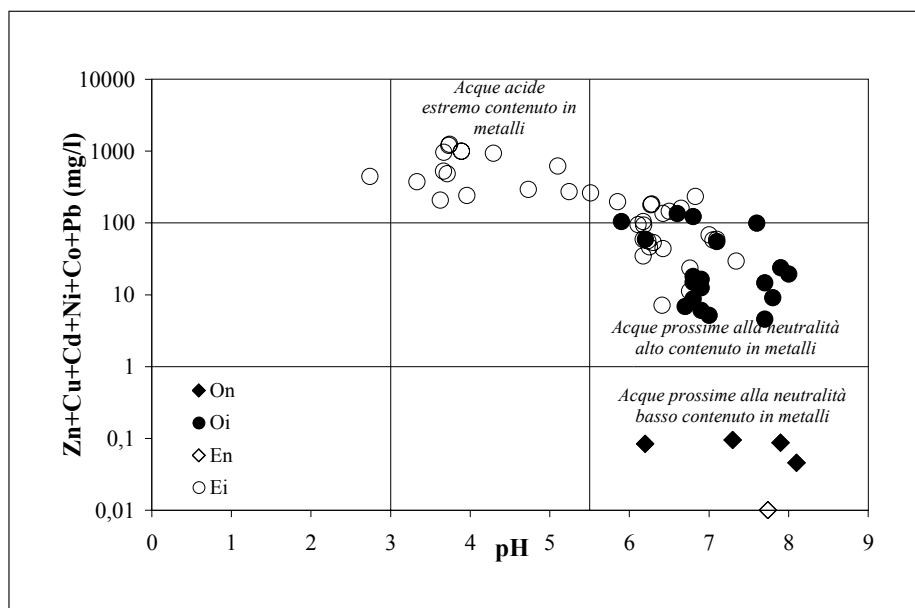


Figura 2. Diagramma di Ficklin per le acque di Montevecchio. I simboli indicano: Ei, En, acque provenienti dalla zona est di Montevecchio, che hanno interagito (Ei) o no (En) con mineralizzazioni e/o discariche; Oi, On, acque della zona ovest (dati da [8] e [9]).

comunità fotosintetica rappresentata da un'alga della specie *Chlorella* ed un cianobatterio della specie *Scytonema* ([11]). Sempre sul Rio Naracauli, in un tratto più a valle rispetto a quello in cui avviene la formazione dell'idrozincite, l'abbattimento di metalli in soluzione continua mediante la formazione di un flocculato bianco amorfo costituito prevalentemente da ossidi di Zn e Si (circa 500 g/kg Zn, e circa 100 g/kg Si), con minori quantità di Pb (circa 6 g/kg), Cd (1 g/kg), Cu (215 mg/kg), e Ni (80 mg/kg). È stato ipotizzato un meccanismo di adsorbimento di zinco e metalli pesanti su colloidali di silice idrata, in acque povere di ferro e a pH prossimo alla neutralità ([12]).

Sono stati infine compiuti alcuni studi sul trasferimento dei metalli alla biosfera e sui loro effetti. Sono stati riconosciuti effetti di degrado a carico di comunità detritivore presenti lungo i corsi d'acqua ([13]), e sono stati evidenziati fenomeni di traslocazione dei metalli a diverse specie vegetali che crescono sulle discariche o nei loro pressi ([14]).

IL DISTRETTO PIOMBO-ZINCIFERO DELL'IGLESIENTE

Come accennato in precedenza, il distretto dell'Iglesiente è stato uno dei maggiori produttori europei di Pb e Zn, con produzioni significative di altri metalli quali Ag, Cd, Hg. I giacimenti più importanti sono ospitati nel «Calcere metallifero» del Cambriano inferiore, e sono riconducibili alla tipologia dei giacimenti «Mississippi Valley» ([15]).

Anch'essi sono stati coltivati dall'antichità fino ad epoca recentissima, e anch'essi hanno lasciato una pesante eredità di situazioni di rischio ambientale (cf. [16]). Gli studi del nostro gruppo hanno riguardato principalmente la miniera di Monteponi, in particolare la qualità delle acque di miniera ([17], con riferimenti alla bibliografia progressa). Esse rappresentano una potenziale fonte di approvvigionamento per la città di Iglesias, che soffre in modo particolare della cronica scarsità di risorse idriche che affligge molte zone della Sardegna.

Nelle rocce carbonatiche che ospitano la mineralizzazione, vi è un'estesa circolazione di tipo carsico di acque sotterranee. Ciò ha costituito un considerevole intralcio alla coltivazione in sotterraneo, e fin dal secolo scorso furono messe in atto importanti misure di educazione dell'acqua dai cantieri. Dal 1910, la principale stazione di pompaggio fu collocata a Monteponi; l'ultimo impianto, costruito nel 1990, era situato a quota -200 sotto il livello del mare, per mantenere il livello della falda a -160. Nell'arco di questi 80 anni, fu osservato, nelle acque profonde, un progressivo aumento della salinità (fino a 12

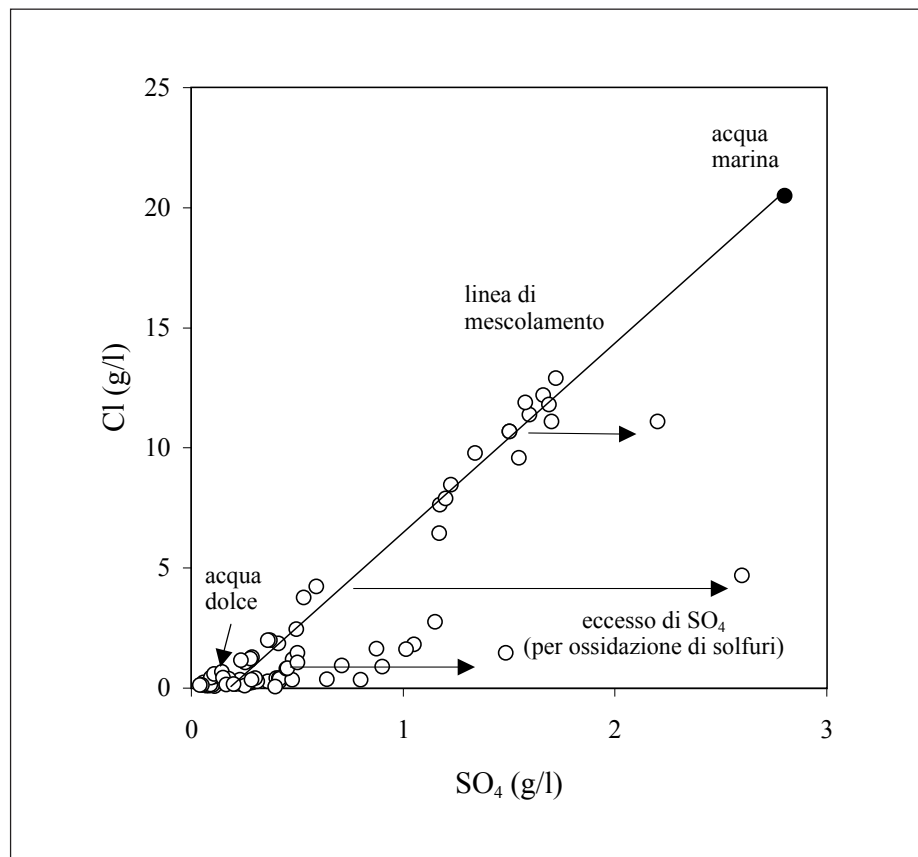


Figura 3. Diagramma Cl/SO₄ per le acque di Monteponi (da [17]).

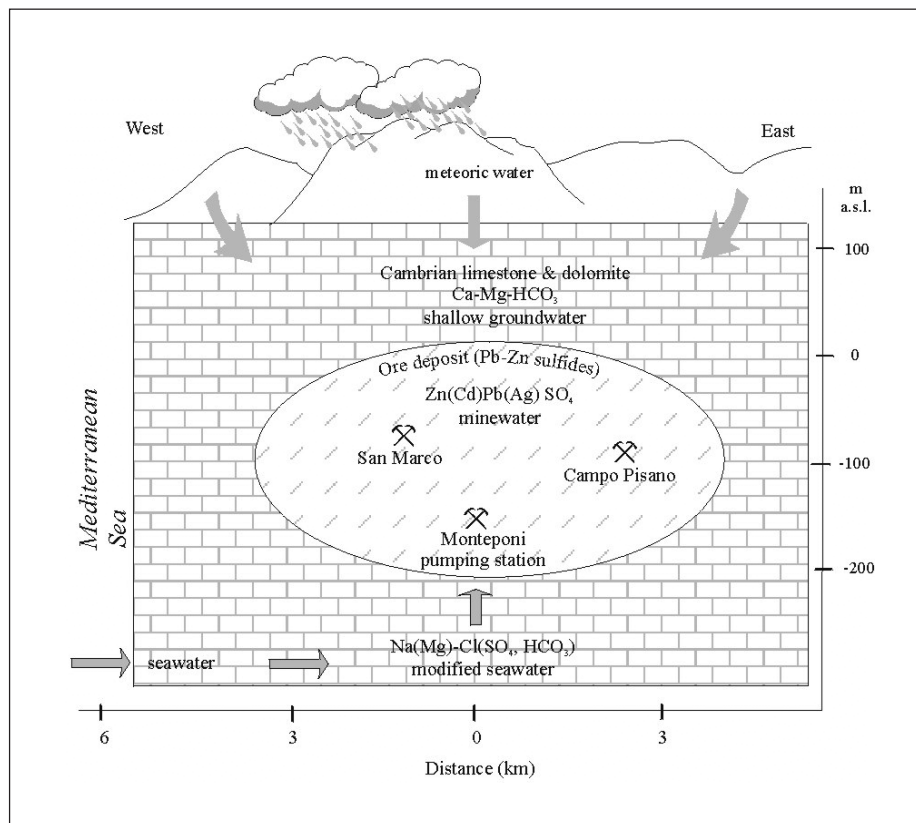


Figura 4. Schema idrogeochimico di Monteponi (da [17]).

g/l Cl) e di alcuni metalli (in particolare, Hg fino a 60 mg/l); ciò è stato attribuito ad un'infiltrazione di acqua marina richiamata dal progressivo abbassamento della falda. Dal 1997, l'eduzione è cessata, e ciò ha determinato la progressiva risalita del livello della falda, nonché un incremento di salinità e metalli nelle acque superficiali. Ciò è dovuto ad un mescolamento tra le acque superficiali e quelle profonde; in particolare, come esemplificato nel diagramma di Fig. 3, la maggioranza dei parametri chimici può essere modellizzata sulla base di un mescolamento tra acqua di mare e acque meteoriche. La stessa Fig. 3 mostra, peraltro, che in alcune acque si osserva un contenuto di solfati in eccesso rispetto al contributo stimato di acqua marina; ciò evidenzia un'interazione con i corpi minerali, i quali rilasciano zolfo (nonché metalli) per ossidazione/dissoluzione dei solfuri. La Fig. 4 riporta una schematizzazione del modello idrogeochimico proposto.

Da un punto di vista della qualità delle acque, a causa di un naturale processo di stratificazione è prevedibile che nel giro di pochi anni si abbia una nuova separazione tra acque poco saline in superficie, ed acque più saline in profondità; al contrario, il processo di rilascio di metalli da parte dei corpi minerali potrebbe proseguire per decenni, e

rappresenta probabilmente il maggiore ostacolo ad un utilizzo da parte dell'uomo delle acque di Monteponi.

IL GIACIMENTO AURIFERO DI FURTEI

La miniera aurifera di Furtei, in attività dal 1997, è uno dei pochi esempi attuali di attività estrattiva nel comparto metallifero in Sardegna. A causa della sua recente età, essa rappresenta altresì uno dei pochi casi in cui la coltivazione è stata preceduta, ed è accompagnata, da studi e misure volti a definire e a contenere il potenziale impatto ambientale ([18], [19], [20], [21]). Ciò è particolarmente importante in quanto la miniera coltiva un giacimento del tipo cosiddetto «epitermale ad alta solfurazione» o «acido-solfatico», di cui è ben noto il potenziale rischio ambientale ([1], [22], [23]). Infatti, tra le caratteristiche di questi giacimenti vi sono una presenza costante e talora abbondante di pirite e di altri solfuri contenenti elementi potenzialmente tossici (es. enargite Cu_3AsS_4) e un'estrema alterazione acida delle rocce incassanti, che limita grandemente le possibilità di tamponamento dell'acidità generata dall'ossidazione della pirite.

In accordo con questo quadro, studi condotti prima dell'inizio dell'attività estrattiva hanno evidenziato drenaggi acidi naturali (pH minimo = 2,3), con corrispondenti alti tenori di metalli (fino a 2000 ppm Al, 29 ppm Cu, 11 ppm Zn, 4 ppm Ni, 3 ppm Co, 0,4 ppm As; [19]). Peraltro, una parziale attenuazione naturale dell'acidità e del contenuto in metalli delle acque superficiali si realizza nella zona d'alterazione periferica (cosiddetta «propilitica»), ove sono presenti minerali (calcite, clorite) in grado di tamponare l'acidità ([20]). Inoltre, prima dell'inizio della coltivazione, la mineralizzazione primaria era ricoperta da una zona d'ossidazione, spessa da 10 a 50 m, costituita da minerali relativamente stabili (scorodite, goethite, jarosite, gesso), in cui sia i tenori che la mobilità dei «metalli pesanti» sono relativamente bassi. Poiché nei primi di tre anni di attività la coltivazione ha interessato questa zona ossidata, non è stata finora osservata alcuna variazione significativa del chimismo delle acque, durante i controlli periodici a cui esse vengono sottoposte (Fig. 5; [21]).

Un potenziale incremento del rischio ambientale potrebbe verificarsi nel prosieguo della coltivazione, allorché la rimozione più o meno totale della zona ossidata esporrà la mineralizzazione primaria all'alterazione esogena. In tale prospettiva, sarà necessario provvedere ad una pronta rimozione del materiale ricco in solfuri, nonché ad un tempestivo ripristino dei cantieri non più attivi.

Un'altra ovvia potenziale sorgente di rischio ambientale – quella che colpisce maggiormente la fantasia dei media, anche se non necessariamente la più pericolosa – è rappresentata dall'impianto di trattamento del minerale, ove si riscontrano concentrazioni estreme di CN (fino a 270 mg/l) e di metalli (ad es., Cu fino a 140 mg/l, Hg fino a 3 mg/l, As fino a 4,8 mg/l; [21]). Tuttavia, nell'ambito di una corretta gestione dell'impianto tali concentrazioni rappresentano un rischio solo potenziale. In effetti, nell'arco di tre anni di attività, le perdite dall'impianto di trattamento si sono rivelate minime, e sono state

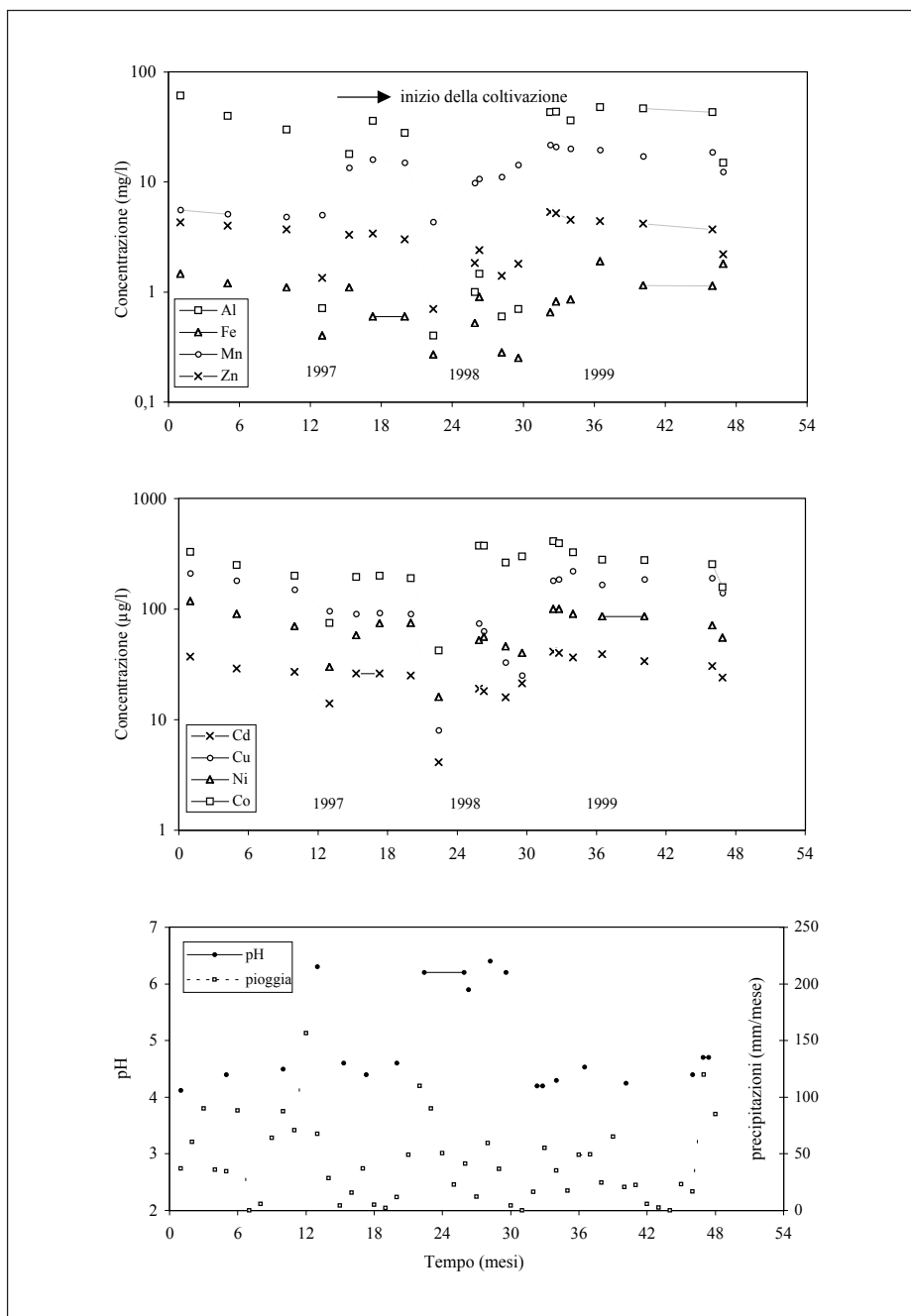


Figura 5. Variazione nel tempo delle concentrazioni di metalli e pH in acque superficiali di Furtei (da [21]). La freccia evidenzia l'inizio dell'attività estrattiva. Si noti come le variazioni chimiche riflettano sostanzialmente l'andamento delle precipitazioni.

prontamente affrontate con opportune misure di pompaggio. In conclusione, pur se sarebbe fuor di luogo negare l'esistenza di una componente di rischio ambientale connessa con la coltivazione del giacimento di Furtei, essa appare non superiore a quella di altre attività industriali, e sicuramente inferiore a quella di passate attività minerarie. In particolare, non esistono allo stato attuale elementi che possano suggerire situazioni di pericolosità immediata.

LA MINERALIZZAZIONE POLIMETALLICA DI BACCU LOCCI (VILLAPUTZU)

L'importanza economica di questo giacimento è stata senz'altro inferiore a quella delle zone precedentemente citate, ed anche dal punto di vista ambientale la sua rilevanza appare più circoscritta, a causa della sua collocazione alquanto remota, a nord di Villaputzu, nella Quirra. Inoltre, l'area è stata oggetto dei nostri studi solo in epoca relativamente recente, ed i risultati conseguiti hanno quindi carattere preliminare. Peraltro, essi evidenziano un sistema di grande interesse per la peculiare associazione geochimica, caratterizzata dalla compresenza di numerosi metalli e da una notevole anomalia di Se.

Da un punto di vista giacimentologico, la mineralizzazione di Baccu Locci rappresenta la propaggine nordorientale del distretto metallifero del Sarrabus-Gerrei ([24]). Il giacimento è stato coltivato tra il 1873 ed il 1965 per As e Pb, e recentemente è stato oggetto di prospezione per le sue potenzialità aurifere ([25]). La mineralizzazione è ospitata nel basamento Paleozoico (metasedimenti e metavulcaniti Ordoviciani-Siluriani), ed è costituita da prevalenti galena ed arsenopirite, con subordinate blenda, pirite, pirrotina, calcopirite; la ganga è prevalentemente quarzosa. I minerali secondari sono ben rappresentati, in particolare in una zona di affioramento di un tipico «gossan», e comprendono, oltre specie comuni come ossidi-idrossidi di Fe e carbonati-solfati (+ arseniati) di Fe-Cu-Pb-Zn, alcuni rari seleniati quali chalcomenite e orlandiite.

Da un punto di vista ambientale, il fatto più rilevante è rappresentato dalla pratica, invero poco saggia, di scaricare periodicamente nell'alveo del Rio Baccu Locci i materiali di risulta dell'impianto di trattamento del minerale, collocato circa a metà della valle. Infatti, a monte di questo impianto, le acque superficiali presentano un iniziale incremento di metalli (Pb, Cu, Zn, Cd) in conseguenza dell'afflusso di acque di drenaggio delle gallerie o comunque interagenti con corpi mineralizzati e/o discariche; tuttavia, i tenori dei metalli decrescono rapidamente verso valle, sia per fenomeni di diluizione, sia perché il pH (7-8) delle acque non favorisce la loro mobilità (Fig. 6a; [26]).

Un ruolo significativo nel controllo della variazione dei metalli in soluzione è rappresentato da fenomeni di precipitazione e ridissoluzione di fasi amorfe o poco cristalline moderatamente solubili. Tali fenomeni sono in buona misura determinati da fattori climatici, ossia si ha accumulo di queste fasi solide nella stagione secca, ed una loro rapida dissoluzione nella stagione delle piogge. A valle dell'impianto di trattamento, gli

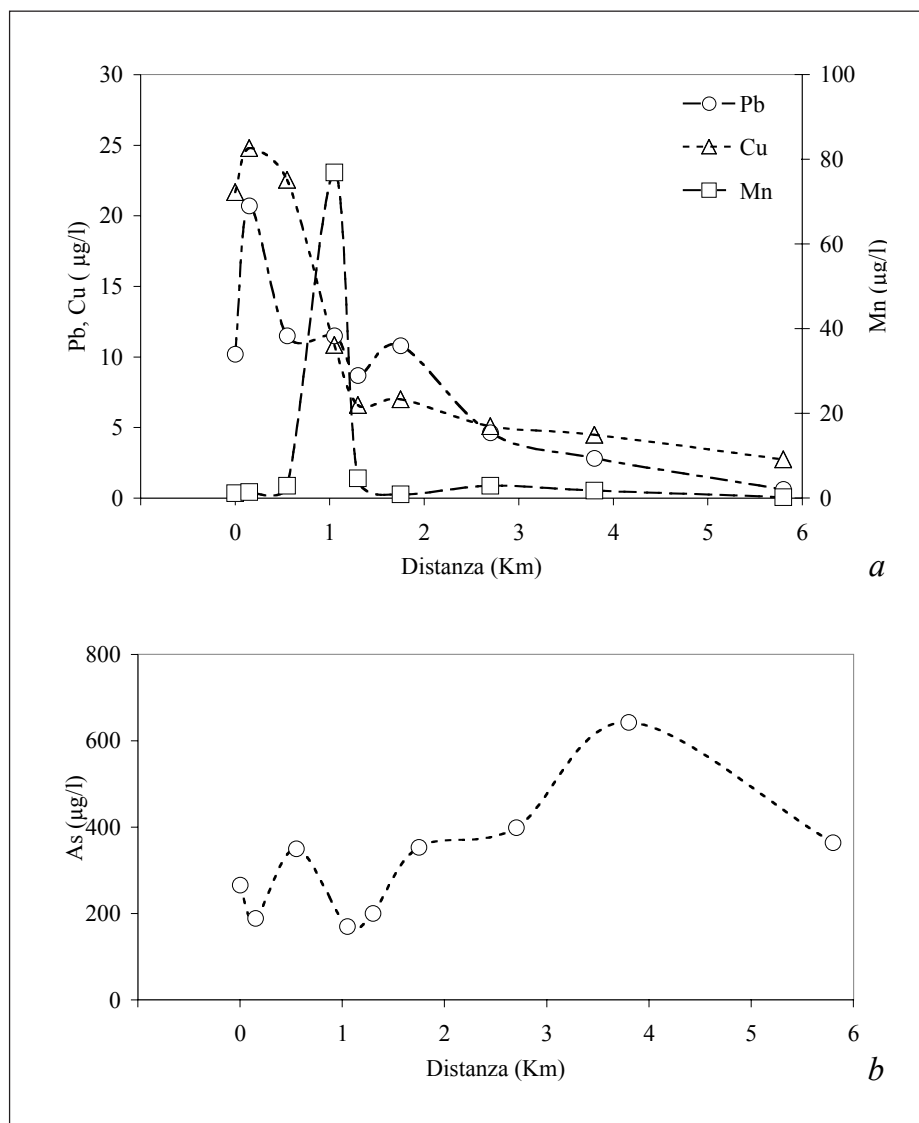


Figura 6. Variazione della concentrazione di alcuni metalli (a) e dell'arsenico (b) nelle acque del Rio Baccu Locci (da [26]). La distanza è riferita al primo punto di campionamento (acqua a monte dei principali corpi mineralizzati), muovendosi verso valle.

sterili scaricati nell'alveo hanno costituito riconoscibili orizzonti di sedimenti sulle sponde del Rio Baccu Locci fino al suo sbocco nella piana alluvionale costiera diversi chilometri più a valle. A differenza dei metalli, As è discretamente mobile anche in condizioni neutre/alcaline. Pertanto, la continua interazione delle acque con questi materiali trasportati causa una tendenza all'aumento di As (Fig. 6b). Sono stati misurati

tenori fino a 850 µg/l, solo parzialmente mitigati da fenomeni di precipitazione/adsorbimento ([27]). Misure e calcoli di speciazione mostrano peraltro che As è presente in soluzione prevalentemente nello stato d'ossidazione (V), meno tossico dello stato (III).

CONCLUSIONI

Riteniamo che i nostri studi, lungi dall'esaurire tutti gli aspetti del problema, abbiano appena abbozzato le grandi linee di un quadro che sembra promettere interessanti potenziali sviluppi. Dalle nostre ricerche è emerso infatti come, in un contesto come quello sardo caratterizzato da una notevole varietà di situazioni geologiche, giacimentologiche ed idrologiche, e da una prolungata e spesso multiforme attività estrattiva, si possano ricavare indicazioni non solo per una comprensione locale dei fenomeni di inquinamento (che peraltro può fornire, e ha già fornito, utili indicazioni per interventi di prevenzione e/o risanamento), ma anche per una modellizzazione a scala generale dei processi di rilascio e trasferimento alla biosfera dei metalli in aree minerarie. In altre parole, la Sardegna sembra essere un terreno privilegiato per l'elaborazione di modelli d'impatto ambientale dei giacimenti («environmental ore deposit models» – cf. [28]).

RINGRAZIAMENTI

I dati riportati in questa comunicazione sono stati ottenuti grazie al contributo di tecnici, laureandi, dottorandi e borsisti. Desideriamo ringraziare in particolar modo Carla Ardaù, Angelo Chessa, Claudia Dadea, Stefania Da Pelo, Giovanni De Giudici, Mario Lorrà, Francesca Podda e Laura Rundeddu. Le nostre ricerche hanno beneficiato di finanziamenti dell'Università di Cagliari (fondi locali ex 60%), del MURST (cofinanziamento nazionale ex 40%), del CNR, della Regione Sardegna e dell'Unione Europea.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.S. PLUMLEE, *The environmental geology of mineral deposits*. In: G.S. Plumlee & M.J. Logsdon (eds.), «The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A». Society of Economic Geologists, Littleton (CO), 71-116, (1999).
- [2] G. BERTORINO, A.M. CAREDDA, A. IBBA, P. ZUDDAS, *Weathering of Pb-Zn mine-tailing in pH buffered environment*. In Y.K. Kharaka & O.V. Chudaev Eds., «Proceed. of the 8th Internat. Symp. on water-rock Interaction - WRI-8», Vladivostok, Russia, 15-19 August 1995, Rotterdam A.A.Balkema, 859-862 (1995).
- [3] S. DA PELO, *Mineralogia e geochimica degli sterili di flottazione nell'area mineraria di Montevecchio, Sardegna sud-occidentale*. Rapporto interno, Centro CNR Minerogenesi e Geochimica applicata, Firenze (1996).
- [4] S. DA PELO, *Mineralogia e geochimica ambientale di aree minerarie attive e dismesse*. Tesi di dottorato in Scienze della Terra, Cagliari-Genova-Torino (1998).
- [5] A. CHESSA, L. FANFANI, P. ZUDDAS, *Heavy metals speciation on abandoned mine tailings*.

- International Conference «Heavy Metals in the Environment», Hamburg, September 1995, 2: 5-8 (1995).
- [6] L. FANFANI, P. ZUDDAS, A. CHESSA, *Heavy metals speciation analysis as a tool for studying mine tailings weathering*. Journal of Geochemical exploration, 58, 241-248 (1997).
- [7] R. CABOI, R. CIDU, L. FANFANI, P. ZUDDAS, *Abandoned mine sites: implications for water quality*. In R. Ciccu Ed., Proceeding SWEMP, Cagliari, Italy, October 7-11, 2, 797-805 (1996).
- [8] R. CABOI, R. CIDU, L. FANFANI, P. LATTANZI, P. ZUDDAS, *Environmental mineralogy and geochemistry of the Pb-Zn abandoned Montevecchio-Ingurto mining district, Sardinia, Italy*. Chron. recherche minière, 534, 21-28 (1999).
- [9] S. DA PELO, F. FRAU, C. ARDAU, L. RUNDEDDU, P. LATTANZI, *Water chemistry at the Montevecchio Levante mine tailings impoundment (Sardinia-Italy)*. In Cidu R. Ed., «Proceedings of the 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction» -WRI-10, Villasimius - Italy, Rotterdam, A.A.Balkema, in stampa (2001).
- [10] A.M. CAREDDA, A. CRISTINI, C. FERRARA, M.F. LOBINA, M. BAROLI, *Distribution of heavy metals in the Piscinas beach sediments (SW Sardinia, Italy)*. Environm. Geol., 38 (2), 91-100 (1999).
- [11] F. PODDA, P. ZUDDAS, A. MINACCI, M. PEPI, F. BALDI, *Heavy metal coprecipitation with hydrozincite from mine waters caused by photosynthetic microorganisms*. Appl. Environm. Microbiol., 66, 5092-5098 (2000).
- [12] P. ZUDDAS, F. PODDA, A. LAY, *Flocculation of metal-rich colloids in a stream affected by mine drainage*. In B. Arehart & J.R. Hulston Eds., Proceedings of the 9th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction -WRI-9, Taupo (New Zealand), 30 March-3 April 1998, Rotterdam, A.A.Balkema, 1009-1012 (1998).
- [13] C. DADEA, A. PONTI, A. BASSET, R. CABOI, *Effetti del dilavamento di sterili minerari su caratteristiche strutturali e funzionali di sistemi acquatici a base detrito*. Atti Soc. Ital. Ecol. 17, 769-773 (1997).
- [14] M. BARBAFIERI, C. DADEA, *Heavy metal uptake of spontaneous species as a tool for phytoremediation in a mining area*. 15th Conf. Contaminated Soils & Waters, Amherst, Mass., October (1999), 18-21.
- [15] M. BONI, *Ores in southwestern Sardinia*. Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia, 48, 155-184 (1994).
- [16] M. BONI, S. COSTABILE, B. DE VIVO, M. GASPARRINI, *Potential environmental hazard in the mining district of Southern Iglesias (SW Sardinia, Italy)*. J. Geochem. Explor., 67, 417-430 (1999).
- [17] R. CIDU, C. BIAGINI, L. FANFANI, G. LA RUFFA, I. MARRAS, *Mine closure at Monteponi (Italy): effect of the cessation of dewatering on the quality of shallow groundwater*. Appl. Geochem., 16, 486-502 (2001).
- [18] G. MADAU, G.P. PINNA, B. HUMPHRIES, A. ORRÙ, *Furtei Gold Project - Environmental baseline study and management plan*. In R. Ciccu Ed., Proceeding SWEMP, Cagliari, Italy, October 7-11, 1, 189-196 (1996).
- [19] R. CIDU, R. CABOI, L. FANFANI, F. FRAU, *Acid drainage from sulfides hosting gold mineralization (Furtei, Sardinia)*. Environm. Geol., 30, 231-237 (1997).
- [20] R. CIDU, S. DA PELO, P. LATTANZI, *Environmental mineralogy and geochemistry of epithermal gold deposit at Furtei, Sardinia*. In C.J. Stanley et al. (eds.), «Mineral deposits: processes to processing», Balkema, Rotterdam, 1175-1178 (1999).
- [21] R. CIDU, *Impact of small-scale gold mining on water quality*. In: R.K. Singhal & A.K.

- Mehrotra (eds.), «Environmental issues and management of waste in energy and mineral production», Balkema, Rotterdam, 607-614 (2000).
- [22] G.S. PLUMLEE, K.S. SMITH, J.E. GRAY, D.B. HOOVER, *Epithermal quartz-alunite deposits*. In E.A. du Bray (ed.), «Preliminary descriptive geoenvironmental models of mineral deposits», U.S. Geol. Surv. Open File Rept 95-231, 162-169 (1995).
- [23] G.S. PLUMLEE, K.S. SMITH, M.R. MONTOUR, W.H. FICKLIN,, E.L. MOSIER, *Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types*. In L.H. Filipek & G.S. Plumlee (eds.), «The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, PartB», Society of Economic Geologists, Littleton (CO), 373-432 (1999).
- [24] F. BAKOS, G. CARCANGIU, S. FADDA, A. MAZZELLA, R. VALERA, *The gold mineralization of Baccu Locci (Sardinia, Italy): origin, evolution and concentration processes*. Terra Nova 2(3): 234-239 (1990).
- [25] J.RAYNER, D. MANIS, *Gold in Sardinia: recent developments in exploration and exploitation*. In Cidu R. Ed., «Proceedings of the 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction» -WRI-10, Villasimius - Italy, A.A.Balkema, Rotterdam, in stampa (2001).
- [26] F. FRAU, C. ARDAU, M. LORRAI, L. FANFANI, *Geochemistry of waters in the dismantled mine area of Baccu Locci (Sardinia, Italy): the arsenic contamination*. In Cidu R. Ed., «Proceedings of the 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction» -WRI-10, Villasimius - Italy, A.A.Balkema, Rotterdam, in stampa (2001).
- [27] C. ARDAU, F. FRAU, C. DADEA, P. LATTANZI, J. MATTUSCH, R. WENNRICH, K. TITZE, *Solid-state speciation of arsenic in waste materials and stream sediments from the abandoned mine area of Baccu Locci (Sardinia, Italy)*. In Cidu R. Ed., «Proceedings of the 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction» -WRI-10, Villasimius - Italy, A.A.Balkema, Rotterdam, in stampa (2001).
- [28] P. LATTANZI, L. FANFANI, R. CABOI, R. CIDU, P. ZUDDAS, *Environmental ore deposit models: insights from Sardinia*. In Cidu R. Ed., «Proceedings of the 10th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction» -WRI-10, Villasimius - Italy, A.A. Balkema, Rotterdam, in stampa (2001).