

RICERCA DI METODI INNOVATIVI PER L'ANALISI E LA VALUTAZIONE DELL'EROSIONE
DEI SUOLI MEDIANTE ANALISI ISOTOPICHE

Ricerca di metodi innovativi per l'analisi e la valutazione dell'erosione dei suoli
mediante analisi isotopiche

A cura di:

Sergio Grauso, Filippo Onori

Autori:

*Armiento G., Bartolomei P., Crovato C., De Bonis P., Esposito M., Fattoruso G., Felici F.,
Grauso S., Grillini M., Marcinnò M., Neri M., Onori F., Pagano A., Pasanisi F., Peloso A.,
Regina P., Tebano C.*

2006 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie
l'Energia e l'Ambiente

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 88-8286-151-1

RICERCA DI METODI INNOVATIVI PER L'ANALISI
E LA VALUTAZIONE DELL'EROSIONE DEI SUOLI
MEDIANTE ANALISI ISOTOPICHE

A CURA DI:

SERGIO GRAUSO, FILIPPO ONORI

Autori:

Armiento G., Bartolomei P., Crovato C., De Bonis P., Esposito M. ,
Fattoruso G., Felici F., Grauso S., Grillini M., Marcinnò M., Neri M., Onori F.,
Pagano A., Pasanisi F., Peloso A., Regina P., Tebano C.



ELENCO DELLE MONOGRAFIE

RIADE “Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione” ha proposto e realizzato un avanzamento non solo nelle conoscenze settoriali, ma nell’approccio integrato e multidisciplinare, indispensabile per una tematica così complessa come la desertificazione. Di seguito sono riportate le 12 monografie prodotte nel corso delle attività di progetto, che documentano il lavoro svolto ed i risultati conseguiti.

1. La Desertificazione in Italia e il progetto RIADE
2. Caratterizzazione tipologica dei fenomeni di desertificazione nell’Italia meridionale ed insulare
3. Indicatori di desertificazione: approccio integrato e supporto alle decisioni
4. Tecnologie innovative per l’analisi di variabili climatiche
5. Nuove tecnologie per lo studio della vegetazione in relazione ai cambiamenti climatici
6. Ricerca di metodi innovativi per l’analisi e la valutazione dell’erosione dei suoli mediante analisi isotopiche
7. La sostanza organica e la desertificazione: aspetti sperimentali e modellistica
8. Salinizzazione e qualità delle acque: impatti e ipotesi di mitigazione
9. Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: dall’analisi conoscitiva alle strategie di salvaguardia e tutela
10. Lettura dinamica delle relazioni tra territorio, insediamenti umani ed utilizzo delle risorse naturali: sistematizzazione e riproposizione in chiave innovativa delle conoscenze e tecniche tradizionali
11. Modellistica ambientale e sistemi di supporto alle decisioni per la lotta alla desertificazione
12. Appunti da un viaggio di studio...ciò che abbiamo imparato e che non avremmo altrimenti appreso (dal Master F-RIADE)

<http://www.riade.net>

Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione



INDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUZIONE | 7 |
| Bibliografia..... | 10 |
| 2. DESCRIZIONE AREA DI STUDIO | 11 |
| Bibliografia..... | 17 |
| 3. I MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA PERDITA DI SUOLO | 19 |
| 3.1 l'analisi isotopica in spettrometria γ | 19 |
| 3.1.1. Principi e tecnica analitica..... | 19 |
| 3.1.2. Modelli di conversione | 21 |
| 3.2 LA RUSLE | 25 |
| 3.3 L'ANALISI STATISTICA | 26 |
| Bibliografia..... | 31 |
| 4. METODOLOGIA DI CAMPIONAMENTO..... | 35 |
| Bibliografia..... | 40 |
| 5. CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA E MINERALOGICA..... | 41 |
| Bibliografia..... | 42 |
| 6. RILIEVI IN LAGHI ARTIFICIALI | 43 |
| 6.1 Dati tecnici degli invasi | 43 |
| 6.2 I rilievi batimetrici..... | 46 |
| 6.2.1. Risorse impiegate | 46 |
| 6.2.2. Pianificazione e svolgimento dei rilievi | 48 |
| 6.2.3. Processamento ed elaborazione dei dati | 50 |
| Bibliografia..... | 54 |
| 7. RISULTATI | 55 |
| 7.1. Analisi granulometriche e mineralogiche..... | 55 |
| 7.2. Valutazione della sedimentazione negli invasi artificiali..... | 56 |
| 7.3. Misure in spettrometria γ e valutazione dell'erosione..... | 59 |
| 7.4. Applicazione della RUSLE | 71 |
| 7.5. Applicazione delle formule di regressione multipla..... | 79 |
| Bibliografia..... | 80 |
| 8. DISCUSSIONE | 81 |
| 8.1 Analisi isotopiche | 81 |
| 8.2 RUSLE | 90 |
| 8.3 Modello statistico | 91 |
| Bibliografia..... | 92 |
| 9. CONCLUSIONI..... | 93 |

1. INTRODUZIONE

L'erosione del suolo è da molto tempo oggetto di studi e ricerche finalizzati all'individuazione di metodi, diretti o indiretti, che ne consentano la sua valutazione. Nel corso degli ultimi 50 anni sono state messe a punto diverse metodologie basate sull'utilizzo di modelli, dal tipo empirico-parametrico o statistico, che correlano la perdita di suolo a diversi tipi di parametri fisici che influiscono sull'erodibilità del suolo, fino ai più recenti modelli matematici, fisicamente basati, che, attraverso complesse equazioni bi-dimensionali, cercano di riprodurre il processo di erosione e trasporto delle particelle erose.

Una metodologia, nata negli anni '60-'70 [7] [8] [9] [10] e tuttora applicata in studi in diverse parti del mondo, è basata sull'analisi in spettrometria γ del ^{137}Cs . Quest'ultimo è un isotopo radioattivo di origine artificiale, prodotto nelle esplosioni degli esperimenti nucleari effettuati a partire dal 1952, anno in cui si è verificata la prima ricaduta significativa seguita da un secondo picco nel 1963 e quindi dalle ricadute legate all'incidente di Chernobyl nel 1986. Questa metodologia rende quindi conto dei processi di erosione/sedimentazione avvenuti negli ultimi 40-50 anni, in quanto si basa sull'ipotesi che, in seguito alle ricadute atmosferiche, il ^{137}Cs si sia uniformemente distribuito sulla superficie del suolo, e che, essendo rapidamente adsorbito, lungo il profilo pedologico, dalle particelle argillose e dalla sostanza organica del suolo, i successivi processi di erosione/sedimentazione ne abbiano provocato la perdita o l'accumulo, con conseguente diminuzione o aumento dell'attività misurabile all'interno del suolo stesso.

Mediante un opportuno campionamento del suolo, è possibile determinare i valori puntuali di attività e, attraverso metodi di interpolazione, ottenere una carta della distribuzione del ^{137}Cs nell'area di interesse, che mette in evidenza le zone di erosione e di deposito. Inoltre, con l'applicazione di modelli di conversione che consentono di operare un bilancio di massa, è possibile esprimere la perdita o l'accumulo di suolo in termini di peso per unità di superficie [2] [3] [4]. Questi vengono determinati in base al confronto con il profilo radiometrico detto "di riferimento", individuato in un sito interno o prossimo all'area di studio, che non abbia subito sostanziali modifiche e rimaneggiamenti, dovuti ai processi fisici e/o antropici.

Il presente studio è stato condotto con la finalità di verificare l'applicabilità di questa metodologia ad un'area vasta, come un bacino idrografico di dimensioni dell'ordine delle decine di chilometri quadrati, diversamente da quanto finora fatto nelle esperienze riportate nella letteratura scientifica, limitate a parcelle sperimentali o microbacini. La piccola dimensione di queste aree, inferiore al km^2 , ha infatti consentito in tali casi di adoperare il classico criterio di campionamento dei suoli, secondo un reticolo a maglia regolare o lungo transetti che seguono il profilo del versante, il che comporta un elevato numero di punti di prelievo per unità di superficie.

L'applicazione ad una scala più ampia costituisce di per sé un aspetto innovativo nella metodologia, in quanto, affinché essa sia utilizzabile nella pratica, implica che il numero di campioni di suolo, sui quali devono essere effettuate le misure radiometriche, sia quanto più limitato possibile, in proporzione all'area da studiare, in modo da contenere i costi relativi alla campagna di prelievo ed alle analisi di laboratorio.

Al tempo stesso, è necessario che i campioni siano sufficientemente rappresentativi delle condizioni pedologiche, morfologiche e vegetazionali riconoscibili nell'ambito del territorio in esame, in modo da rendere conto, con sufficiente approssimazione, del comportamento dei radionuclidi in relazione alle caratteristiche fisiche del suolo e all'influenza di eventuali lavorazioni agrarie.

Lo sforzo è stato quindi teso alla messa a punto di un criterio di campionamento che consentisse il risparmio dei costi, ma anche la rappresentatività dei campioni. Questo criterio è stato basato sulla classificazione del territorio in esame in "unità di paesaggio" ossia in aree caratterizzate da omogeneità di caratteri morfologici, geo-pedologici e di copertura del suolo, sulla scorta di un'esperienza analoga già condotta, con risultati incoraggianti, sull'Appennino bolognese [1].

Il raggiungimento di questo obiettivo si pone come fondamentale per dimostrare la praticabilità su vasta scala della metodologia radioisotopica di valutazione dell'erosione del suolo. La giustificazione di tale sforzo sta nel fatto che questa metodologia, a sua volta, rappresenta una promettente tecnica che si colloca a metà strada tra i rilievi diretti in campo e l'applicazione di modelli teorici, ma che non ha finora potuto ottenere, proprio per i suoi limiti pratici, un'utilizzazione su vasta scala né ha potuto affermarsi, conseguentemente, come strumento di monitoraggio e valutazione, valido e alternativo, ai fini della gestione della risorsa suolo.

Dato il carattere sperimentale della ricerca, ai fini della verifica dei risultati e della validazione della metodologia di campionamento, in assenza di dati disponibili di perdita di suolo cui fare riferimento, è stata ravvisata l'opportunità di utilizzare anche tecniche di tipo convenzionale, onde poter disporre di un data-set complementare, da correlare alle misure provenienti dalla tecnica radioisotopica ed ottenere un valido ed esaustivo quadro di riferimento dell'entità del processo erosivo areale.

Un modo per ottenere dati di riferimento sufficientemente attendibili, è la determinazione dei volumi di sedimentazione all'interno degli invasi artificiali, nei quali vengono captati i sedimenti provenienti dall'erosione dei versanti e trasportati a valle dai corsi d'acqua. La determinazione del tasso di sedimentazione rende conto della corrispondente erosione sui versanti del bacino sotteso, anche se bisogna considerare che il processo di trasporto dei sedimenti erosi nell'ambito di un bacino è un processo complesso, discontinuo nello spazio e nel tempo, il che dà luogo ad una "resa solida" del bacino stesso che costituisce solo una frazione della reale massa di sedimenti erosi. La correlazione del volume totale dei sedimenti lacustri e del relativo tasso medio di deposizione annua con i dati provenienti dalle misure radioisotopiche sui campioni di suolo, consente comunque di verificare la validità della metodologia utilizzata.

A tale scopo, sono stati ricercati i serbatoi artificiali presenti nella porzione di territorio siciliano, compresa tra la provincia di Siracusa e quella di Agrigento, individuata quale una delle aree di studio nell'ambito del progetto RIADE. Fra questi, è stato individuato il lago Comunelli, sul torrente omonimo, ubicato tra Licata e Gela, nel territorio del Comune di Butera (provincia di Caltanissetta). Il bacino idrografico sotteso dal serbatoio è rappresentativo delle condizioni geolitologiche, morfologiche e pedoclimatiche di larga parte dell'interno e della fascia meridionale della Sicilia, pertanto è stato ritenuto idoneo per lo svolgimento della ricerca.

Inoltre, l'evidente presenza di un cospicuo volume di sedimenti depositato all'interno del serbatoio, oltre che testimoniare l'intensità dei processi erosivi a monte, ha subito lasciato intravedere, in occasione del primo sopralluogo, la possibilità di ottenere un riscontro sufficientemente attendibile degli stessi processi in termini quantitativi, mediante la misura diretta dello spessore dei sedimenti. Inoltre, dato che i prolungati periodi di siccità degli ultimi anni hanno determinato la periodica venuta a giorno dei materiali depositati al fondo, questo invaso offriva la possibilità di studiare direttamente la successione stratigrafica dei sedimenti, attraverso perforazioni a carotaggio continuo. L'analisi dell'intera colonna stratigrafica avrebbe consentito la determinazione del tasso di sedimentazione, sia attraverso la misura del contenuto in ^{137}Cs sia mediante l'individuazione di livelli-guida, quali ceneri di provenienza etnea e/o sabbie sottili di provenienza sahariana, che avrebbero permesso di definire con una certa precisione i limiti temporali della deposizione.

Al fine di verificare gli effetti dei processi erosivi in funzione del substrato geolitologico e delle condizioni climatiche, allo studio del serbatoio Comunelli è stato affiancato uno studio analogo nella porzione più orientale dell'area di studio, caratterizzata dalla presenza del massiccio carbonatico dei monti Iblei. Qui è stato individuato il serbatoio di S. Rosalia sul torrente Irminio, presso Ragusa, nel territorio comunale di Giarratana.

Per poter operare una valutazione dell'efficacia della metodologia radioisotopica nei confronti di altre metodologie, in termini di capacità previsionali rispetto al dato osservato, sono stati applicati, in aggiunta, altri due diversi modelli di valutazione. Il primo è un modello statistico, specificamente messo a punto mediante l'analisi di regressione multipla tra i dati di portata solida in sospensione ed i parametri idrogeomorfologici relativi a 16 bacini idrografici della Sicilia. Il secondo è costituito dalla RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), un modello empirico-parametrico messo a punto da ricercatori americani [5] [6], molto diffuso ed utilizzato con successo in diversi ambiti geografici.

Nel seguito, dopo la descrizione delle aree di studio e delle tecniche utilizzate, vengono riportati i risultati ottenuti con l'impiego delle diverse metodologie. Nella discussione, gli stessi risultati vengono messi a confronto e commentati, insieme ad alcune riflessioni sui problemi tecnici che si sono evidenziati nel corso dell'esperienza condotta in campo ed in fase di elaborazione.

Bibliografia

- [1]. Bartolomei P., Cremona G., Esposito M., Valpreda E. (2000), Valutazione dell'erosione areale in un territorio montano dell'Appennino emiliano-romagnolo: una proposta metodologica per il bacino del torrente Brasimone, in: "Caratterizzazione di ambienti fragili: il Parco dei laghi Suviana e Brasimone (Bologna)", Rapporto tecnico Accordo di programma MURST-ENEA 1996-1999.
- [2]. Di Stefano C., Ferro V., Rizzo S., (2000), Assessing soil erosion in a small Sicilian basin by caesium-137 measurements and a simplified mass balance model, *Hydrological Sciences Journal*, 45(6): 817-832
- [3]. Porto P., Walling D.E., Ferro V., (2001), Validating the use of caesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, *Journal of Hydrology*, 248: 93-108.
- [4]. Porto P., Walling D.E., Tamburino V., Callegari G., (2003), Relating caesium-137 and soil loss from cultivated land, *Catena*, 53: 303 – 326.
- [5]. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water—a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703. United States Government Printing Office, Washington, DC
- [6]. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, P.J., 1991. RUSLE-revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*. January-February, 30-33
- [7]. Ritchie J.C., Spraberry J. A., Mc Henry J. R., (1974), Estimating soil erosion from the redistribution of fallout ^{137}Cs , *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 38: 137-139.
- [8]. Rogowski A.S. & Tamura T. (1965), Movement of caesium-137 by runoff, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam, *Health Physics*, 11 : 1133-1340.
- [9]. Rogowski A.S. & Tamura T., (1970a), Erosional behaviour of caesium-137, *Health Physics*, 18 : 467-477.
- [10]. Rogowski A.S. & Tamura T., (1970b), Environmental mobility of caesium-137, *Radiat. Bot.*, 10: 35-45.

2. DESCRIZIONE AREA DI STUDIO

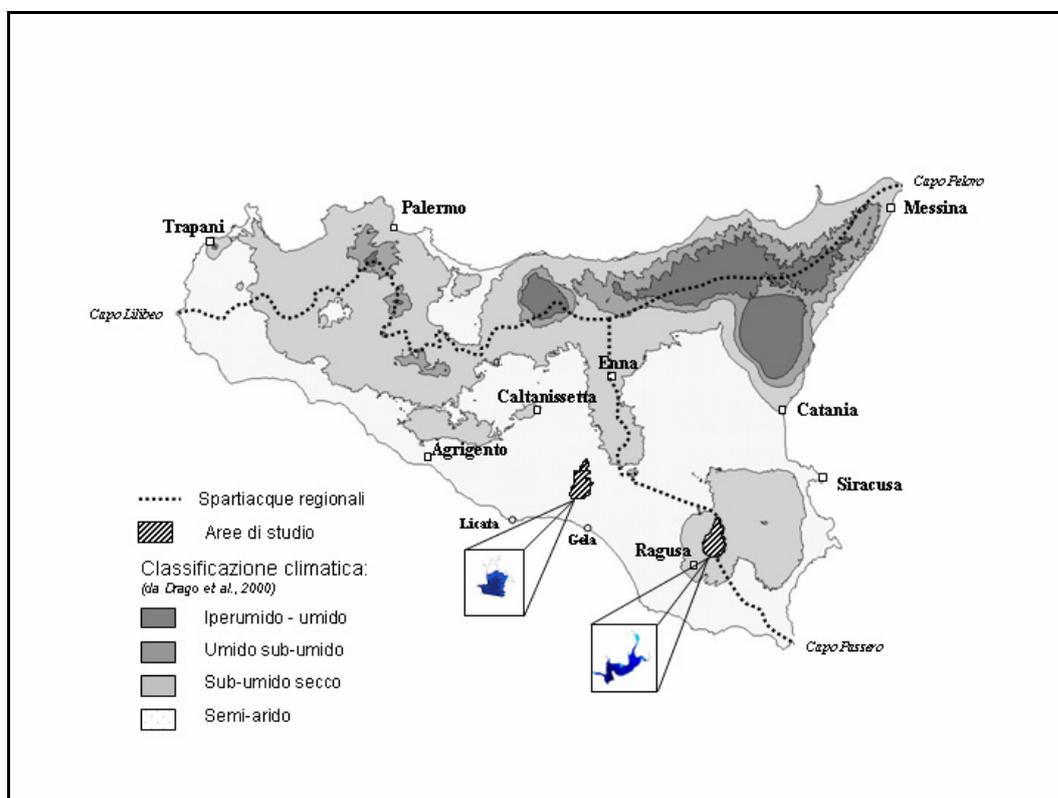
Il bacino idrografico del torrente Comunelli è ubicato nel versante meridionale della Sicilia, che va dall'estremità occidentale dell'isola (Capo Lilibeo) a quella sud-orientale (Capo Passero) (Figura 1).

Situato in provincia di Caltanissetta e compreso nei territori dei Comuni di Mazzarino e Butera, esso presenta una superficie totale, fino alla foce, di circa 108 km², con altitudine massima di 526 m.s.m. ed altitudine media di 283 m. Il torrente, che sviluppa una lunghezza di circa 25 km, ha un andamento grosso modo nord-sud e sfocia nel Mar Mediterraneo, in località Manfria-Castello di Falconara, dopo aver attraversato, nel tratto terminale, la piana costiera a ovest di Gela.

La porzione di bacino afferente all'invaso omonimo è di circa 84 km², con quota minima, alla base della diga, pari a 66 m s.l.m. La diga è stata eretta a circa 7 km dalla foce del torrente, al passaggio tra la zona interna collinare e la pianura alluvionale costiera. Non esistono stazioni idrometriche all'interno del bacino, per cui non sono disponibili dati di portata.

La caratterizzazione climatica effettuata da Drago et al. [12], attribuisce all'intera provincia di Caltanissetta un clima semiarido, in base alle classificazioni di De Martonne, Emberger e Thornthwaite.

Figura 1 – Ubicazione delle aree di studio e classificazione climatica della Sicilia



Il regime pluviometrico è caratterizzato da precipitazioni inferiori alla media regionale e da eventi eccezionali rari e di scarsa entità che fanno dell'area la zona più arida della Sicilia. Le precipitazioni sono concentrate nei mesi invernali e autunnali mentre sono pressoché assenti in quelli estivi.

Le piogge medie annue, relativamente all'area del bacino del Comunelli, sono comprese tra i 475 mm di Mazzarino ed i 415 mm di Butera. La porzione di bacino più prossima alla costa, a valle della diga, risulta più arida con valori di precipitazione assimilabili a quelli registrati nella vicina stazione pluviometrica di Gela (385 mm). Nel periodo autunnale si verificano eventi piovosi molto intensi, superiori ai 200 mm mensili. La variabilità delle precipitazioni è più bassa nei mesi autunnali e invernali (c.v. = 60-80), mediamente più alta nei mesi primaverili e altissima in quelli estivi (fino a 150-200). Per quanto riguarda le temperature, l'area collinare, rappresentata dalla stazione di Mazzarino, è caratterizzata da una temperatura media annua di 17 °C, mentre nell'area della pianura costiera, rappresentata dalla stazione di Gela, si registrano condizioni più calde e aride, con una temperatura media annua di circa 20 °C (il più elevato dell'intera regione). Riguardo alle temperature massime, sia all'interno che nell'area costiera si supera la soglia dei 30 °C (oltre 32 °C a Mazzarino, poco meno a Gela).

Il contesto geologico nel quale l'area di studio si inserisce è quello del settore di avanfossa, che occupa quasi per intero la porzione centro meridionale della Sicilia e che si articola in due bacini di sedimentazione (Fossa di Caltanissetta e Fossa di Castelvetro) separati dai Monti Sicani. I depositi relativi all'avanfossa risultano articolati in sistemi di horst-graben e strutture a pieghe generati dalla tettonica post-orogena attiva fino al Pleistocene inferiore. Sia i terreni postorogeni, plastici e arenacei, sia quelli ascrivibili alla "Serie gessoso-solfifera", sono facilmente erodibili e danno luogo ad un paesaggio collinare a forme molto addolcite, localmente interrotto da piccoli rilievi isolati, guglie e pinnacoli più resistenti all'erosione. La diffusa presenza di terreni argillosi favorisce lo sviluppo di intensi processi erosivi cui si associano frequenti movimenti franosi [13]. La costituzione geolitologica del bacino è data prevalentemente da formazioni argillose e da arenarie e sabbie argillose, con inclusioni di estesi lembi della serie gessoso-solfifera (essenzialmente calcari marnosi) e marne (trubi), tutte di età mio-pliocenica (Figura 2).

In base all'indagine effettuata nell'ambito del Progetto AVI - Aree Vulnerate da calamità Idrogeologiche [11], la zona risulta tra le più dissestate dell'intera regione, sia a causa delle caratteristiche geomorfologiche del territorio che della sua utilizzazione, spesso condotta in maniera irrazionale, associata ad una limitata presenza di vegetazione (Figura 3).

I versanti sono infatti caratterizzati da acclività medio-alta, con scarsa vegetazione arbustiva e forestale (rispettivamente: 6% e 3% della superficie totale del bacino) ed una limitata estensione di prato-pascolo (16%), mentre l'utilizzazione prevalente del suolo è di tipo agrario (73%), condizioni che sicuramente favoriscono un dilavamento esasperato dei terreni da parte delle acque di precipitazione meteorica.

La concomitanza delle condizioni geomorfologiche, pedologiche e climatiche fa sì che già in presenza di normali precipitazioni si abbiano situazioni di stabilità generali alquanto precarie, con diffusione di fenomeni di dissesto di vario tipo ed intensità.

Figura 2 – Schema geolitologico del bacino idrografico del t. Comunelli : 1) arenarie e sabbie argillose; 2) marne e calcari marnosi, evaporiti; 3) depositi clastici recenti; 4) argille

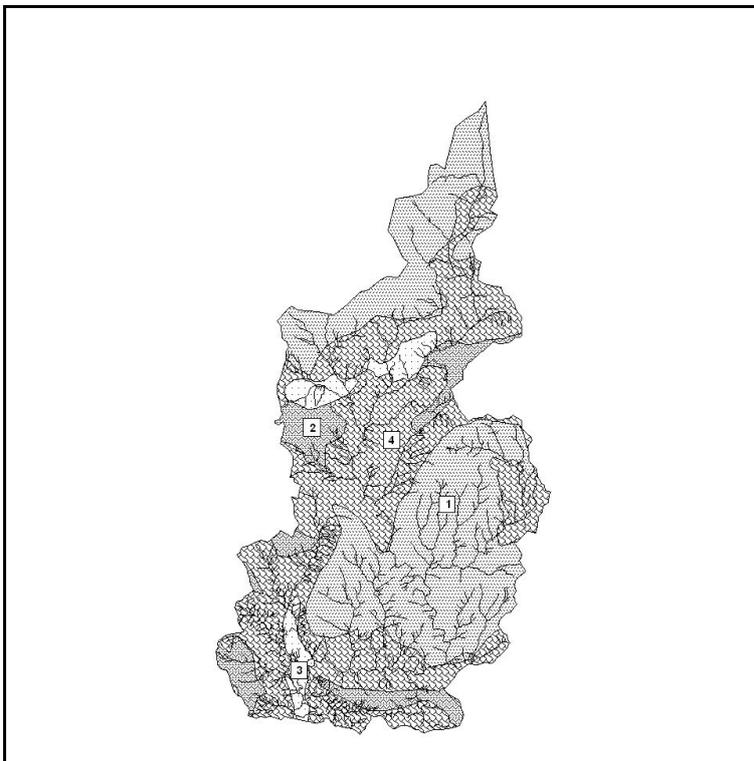
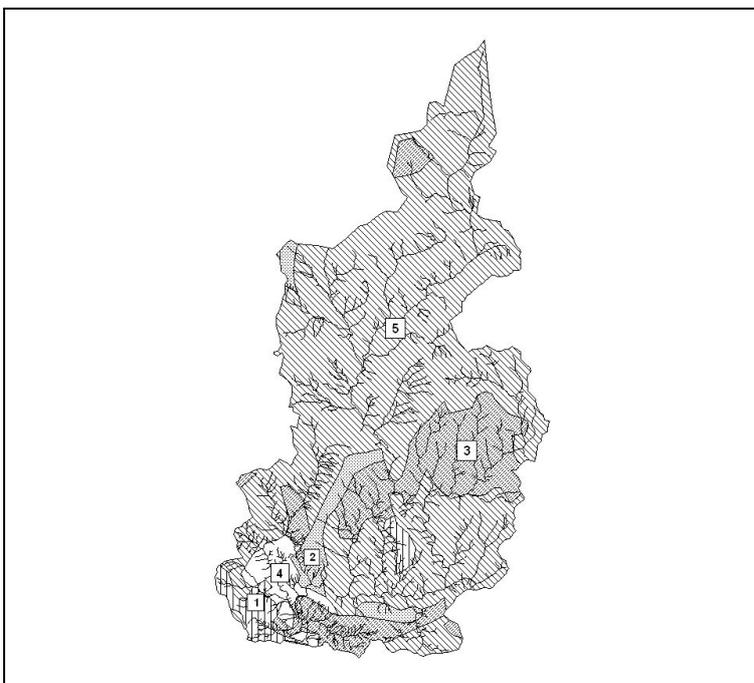


Figura 3 – Carta del land-cover del bacino del t. Comunelli: 1) formazioni forestali artificiali; 2) formazioni arbustive; 3) prati, pascoli, gariga; 4) formazioni idrofite; 5) colture agrarie



Nella parte medio-alta del bacino si verificano spesso colate fangose, conseguenti alle rare piogge, provenienti dai versanti coltivati nei quali, durante il periodo autunnale-invernale, i suoli nudi non hanno alcuna protezione. In assenza di opere di regimazione e contenimento, tali colate finiscono per interessare spesso la rete stradale, con conseguente disagio nelle comunicazioni. Molteplici sono stati gli eventi calamitosi che si sono succeduti negli ultimi anni all'interno del territorio. Tra i dissesti più significativi, il lavoro del CNR cita l'alluvione avvenuta nel settembre del 1971, causata dalla caduta di circa 200 mm di pioggia in due ore, che provocò il repentino riempimento dell'invaso Comunelli, all'epoca completamente vuoto, e la tracimazione di circa 2.000.000 di mc d'acqua. Nel 1993 si è registrata inoltre la chiusura al traffico della S.P. n.8 Butera - Gela, all'altezza del km 12, per il pericolo di caduta massi dalla scarpata e per il crollo di un muro di cinta dell'abitato.

La seconda area di studio, nella quale ci si è limitati a verificare l'entità dell'erosione attraverso la misura del volume di sedimentazione all'interno dell'invaso di S. Rosalia, è costituita dal bacino del fiume Irmínio a monte dell'invaso. La superficie totale del bacino imbrifero, fino alla sua foce sul M. Mediterraneo, è di circa 266 km². L'area sottesa dall'invaso, interamente compresa nel Comune di Giarratana, ammonta a circa 95 km². L'altitudine massima è di 986 m s.l.m. (M.te Lauro), quella minima, determinata dalla quota di massimo invaso, è di 382 m s.l.m., mentre la quota minima alla base della diga è di 328,9 m s.l.m.. La lunghezza totale dell'asta principale alla foce è di 48 km, mentre quella misurata all'entrata nell'invaso è di circa 22 km.

All'interno del bacino, dal 1961 al 1964, ha funzionato una stazione idrometrica alla quota di 336 m s.l.m., in località S. Rosalia, dove è stato realizzato l'omonimo invaso. Il deflusso medio annuo misurato in 4 anni di osservazioni era di 123 mm (pari a circa 12 Mm³/anno) mentre la precipitazione annua risultava pari a 656 mm.

In base a quanto riportato da Drago et al. [12], per quanto riguarda gli indici di classificazione climatica, le classificazioni che sembrano meglio rispondere alla reale situazione territoriale, sono quelle di De Martonne e Thornthwaite, secondo le quali l'area è caratterizzata da un clima di tipo temperato-caldo. Il bacino del f. Irmínio a monte dell'invaso ricade nella cosiddetta zona interna degli Iblei, comprendente parte del territorio comunale di Ragusa e i territori di Monterosso Almo, Chiaramonte Gulfi e Giarratana.

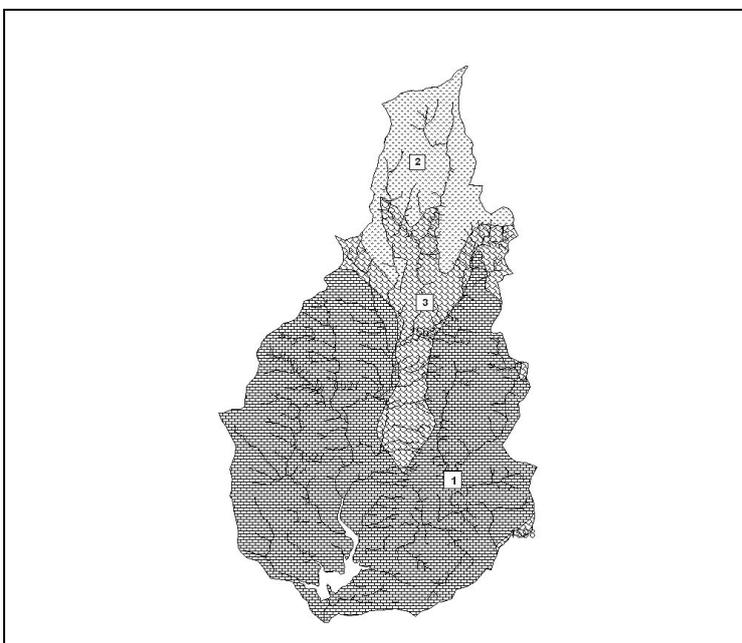
La temperatura media annua è di 16 °C e il periodo arido va da maggio ad agosto. Durante il periodo estivo, le medie delle massime presentano valori fino a 31 °C, in luglio e agosto. I valori medi delle temperature minime durante i mesi più freddi (gennaio, febbraio), normalmente non scendono al di sotto di 4-5 °C. Le gelate sfiorano eccezionalmente la soglia di -6 °C.

Per quanto riguarda le precipitazioni, l'area presenta una media annua relativamente alta (circa 660 mm) e di poco superiore al valore medio regionale, rappresentata dalle stazioni di Chiaramonte Gulfi (648 mm) e Monterosso Almo (668 mm), in contrasto con la zona costiera, tra le più aride di tutta la Sicilia, con un valore medio annuo di circa 436 mm.

La distribuzione mensile delle precipitazioni delle singole stazioni, a scala provinciale, è tipicamente mediterranea, con una concentrazione degli eventi piovosi in autunno e inverno e una forte riduzione degli stessi nel periodo primaverile-estivo. Si riscontra una buona simmetria tra la piovosità mensile dei mesi invernali (gennaio, febbraio, marzo) e quella dei mesi autunnali (dicembre, novembre, e ottobre), nonché una bassa variabilità temporale delle precipitazioni nei mesi autunnali e invernali (c.v. = 60-80), mediamente più alta nei mesi primaverili e altissima in quelli estivi (c.v. fino a 200-300). Per quanto riguarda gli eventi estremi, le precipitazioni di massima intensità oraria presentano, nell'area in esame, valori minimi (36 mm a Monterosso Almo), mentre nell'arco delle 24 ore sono stati registrati eventi eccezionali di 241 mm.

Il corso del fiume Irmínio incide il margine meridionale del plateau carbonatico dei M.ti Iblei. Questo costituisce il settore di avampaese, localizzato nella porzione orientale della Sicilia e composto da rocce prevalentemente calcaree e calcarenitiche, che continua in mare verso Sud raggiungendo la scarpata ibleo-maltese. La morfologia è tipicamente tabulare, condizionata dalla giacitura sub-orizzontale delle successioni rocciose, ed è incisa da profondi solchi fluviali che prendono il nome di "cave". Il substrato roccioso del bacino è quindi prevalentemente di tipo carbonatico, costituito in massima parte da calcareniti (membro Irmínio della Formazione Ragusa) e da marne e calcari marnosi (Formazione Tellaro), di età miocenica, con la presenza di alcuni lembi di coperture vulcaniche antiche (Pliocene medio-superiore) nella parte alta del bacino (Figura 4).

Figura 4 – Schema geolitologico del bacino idrografico del f. Irmínio: 1) calcareniti; 2) vulcaniti; 3) marne, calcari marnosi

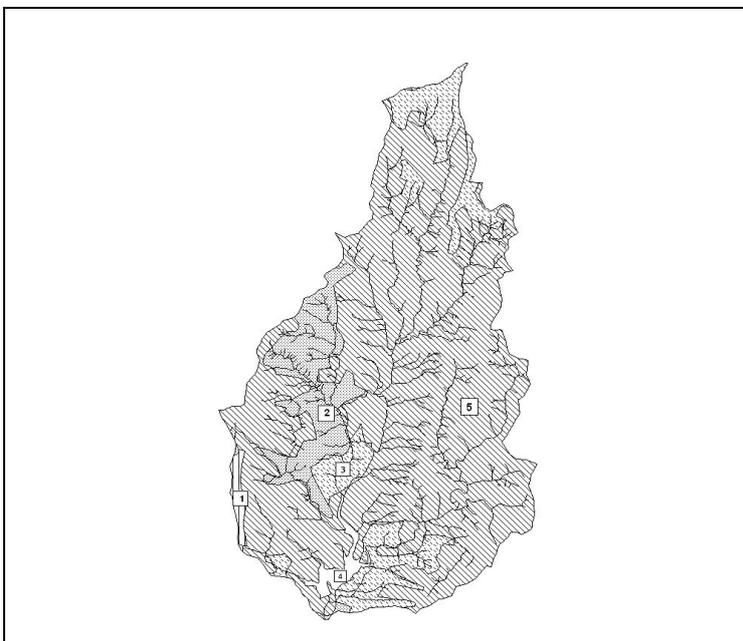


Dal punto di vista della stabilità dei versanti, il territorio non presenta particolari note di dissesto: una zonazione effettuata da parte del Comune di Giarratana, nell'ambito del P.R.G., basata su tre livelli (1°: aree leggermente instabili, 2°: aree molto instabili, 3°: aree con dissesti in atto) ha messo in evidenza che la gran parte del territorio ricade nel primo livello di instabilità, che prevede isolate possibilità di crolli e scivolamenti interessanti i versanti costituiti dal Membro Irminio (con una pendenza fino al 50%) e dalla Formazione Tellaro (con una pendenza fino al 25%). Le aree definite molto instabili, con probabili fenomeni di crolli, scivolamenti e scoscendimenti, sono limitate a piccoli lembi a forte acclività, superiore al 50% nel Membro Irminio e fino al 50% nella Formazione Tellaro. Le aree con dissesti in atto sono invece piccolissime zone localizzate nei fianchi dei torrenti o in alcune parti dei centri abitati, in cui i dissesti sono innescati da azioni antropiche (lesioni nelle strade e smottamenti causati dal carico di edifici, opere di scavo, formazione di trincee).

L'utilizzazione prevalente del suolo è data da colture agrarie (76%), in minore misura da prato-pascolo (11%), mentre le aree a vegetazione spontanea (essenzialmente macchie e arbusti) ricoprono poco più del 10% (Figura 5).

Da quanto detto, si può evincere che le due aree in esame si inseriscono in domini geografici sensibilmente diversi per quanto riguarda l'aspetto geologico, morfologico e climatico. Nel seguito, attraverso i risultati dei rilievi batimetrici, si evidenzieranno infatti le rispettive potenziali influenze sulla funzionalità dei serbatoi in essi realizzati.

Figura 5 – Carta del land-cover del bacino del f. Irminio: 1) formazioni forestali artificiali; 2) formazioni arbustive; 3) prati-pascoli, gariga; 4) lago artificiale; 5) colture agrarie



Bibliografia

- [11]. CNR-GNDICI (1993). Progetto AVI - Relazione Regione Sicilia, U.O. N°11, Soil Test Merid sas.
- [12]. Drago A., Cartabellotta D., Lo Bianco B., Lombardo M., 2000. Atlante Climatologico della Regione Siciliana. Assessorato Regionale Agricoltura e Foreste, U. O. di Agrometeorologia, Regione Siciliana, Palermo.
- [13]. Regione Siciliana, 2000. Piano straordinario per l'assetto idrogeologico. Decreto 4 luglio 2000. Relazione generale. Assessorato Territorio e Ambiente, Palermo.

3. I MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA PERDITA DI SUOLO

3.1 l'analisi isotopica in spettrometria γ

3.1.1. Principi e tecnica analitica

Negli ultimi 30 anni, dal tempo della sua prima applicazione, la metodologia basata sul contenuto in ^{137}Cs nei suoli ha assunto un ruolo importante nella valutazione dell'erosione areale ed è stata ampiamente applicata in una grande varietà di contesti.

Le ipotesi del metodo si basano sul fatto che il ^{137}Cs da fallout sia rapidamente adsorbito dalle particelle di suolo alla superficie del terreno e che ogni successiva ridistribuzione del radioisotopo rifletta il movimento delle particelle stesse. È chiaro che, se si assume una distribuzione iniziale del ^{137}Cs da fallout uniforme, ogni variazione della distribuzione rispetto al valore locale di riferimento rappresenta una ridistribuzione di suolo, avvenuta dal tempo della deposizione del radioisotopo fino al momento della misura. Inoltre se è possibile determinare una relazione di calibrazione tra la perdita e il guadagno di ^{137}Cs e la perdita e il guadagno di suolo allora dalle misure di ^{137}Cs è possibile stimare quantitativamente il tasso di erosione o di deposizione dei suoli.

Nella metodologia appena delineata la conoscenza della quantità totale di ^{137}Cs ricaduta nel sito oggetto di studio riveste un ruolo fondamentale. Poiché, in generale, dati significativi di fallout sono raramente disponibili, si è soliti determinare il valore locale di riferimento attraverso la misura del ^{137}Cs in campioni raccolti in siti che presentano determinate caratteristiche. Un sito di riferimento, per essere considerato tale, deve aver ricevuto l'intero fallout atmosferico e successivamente non deve aver subito processi di perdita o accumulo del radionuclide provocati, per esempio, da fenomeni erosivi. L'unica perdita di ^{137}Cs deve essere quella dovuta al decadimento radioattivo. Dalle misure compiute nel sito così caratterizzato è quindi possibile determinare il valore locale di riferimento che rappresenta l'input totale di ^{137}Cs per unità di superficie, espresso in decadimenti al secondo per unità di superficie (Bq/m^2). Da quanto appena detto si evince l'importanza di una corretta scelta del sito di riferimento per l'applicabilità del metodo. Walling and Quine [43] hanno descritto le caratteristiche ideali di un sito di riferimento: vicinanza all'area di studio e stessa altitudine; sito indisturbato, cioè non sottoposto a rimaneggiamenti ovvero non soggetto a erosione o deposizione; pendenza minima e copertura vegetale per buona parte dell'anno, tanto per citare solo gli aspetti principali. Sebbene queste condizioni siano alquanto restrittive e spesso difficilmente riscontrabili in un unico sito, è comunque cruciale selezionare un'area che soddisfi il maggior numero di queste richieste ai fini di una corretta applicazione della metodologia.

Il ^{137}Cs , come già ricordato, è un isotopo di origine antropogenica prodotto nella fissione nucleare ed immesso nell'ambiente in seguito ai test nucleari avvenuti in atmosfera tra la fine degli anni '50 e la metà degli anni '80. È un isotopo radioattivo, con tempo di dimezzamento pari a 30,2 anni, che decade attraverso un decadimento beta- fino al bario-137 (Ba-137) seguendo diversi schemi di decadimento.

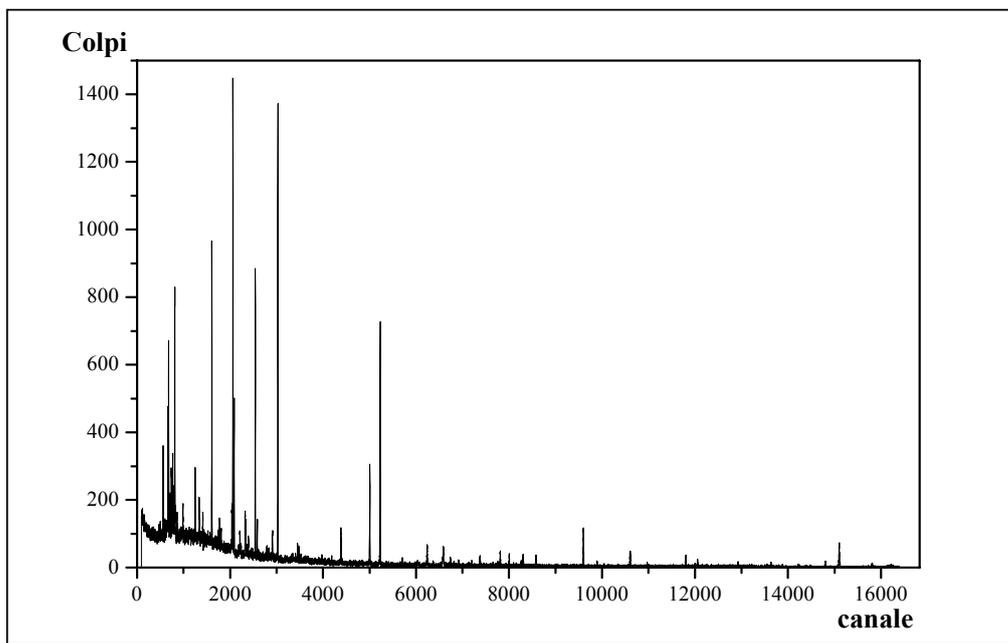
In uno di questi schemi il ^{137}Cs , in seguito al decadimento beta-, produce il bario-137 in uno stato eccitato, con successiva emissione di una radiazione gamma di energia pari a 661,62 keV con branching ratio (probabilità di decadimento) dell'85%. È questa radiazione gamma che viene rivelata sperimentalmente per la determinazione dell'attività dell'isotopo del cesio.

Gli strumenti attualmente più diffusi per la rivelazione di radiazioni gamma sono sicuramente i rivelatori al germanio intrinseco (HPGe, High-Purity Germanium). Vengono fabbricati in tre diverse geometrie: planare, coassiale (che può essere di tipo p o n a seconda delle impurezze presenti nel cristallo) e a pozzetto, termini questi che si riferiscono alla forma del cristallo di germanio e al modo in cui esso viene inserito nel circuito elettrico del rivelatore. Durante il funzionamento è necessario mantenerli alla temperatura dell'azoto liquido.

A causa dell'alta penetrazione dei raggi gamma, i campioni da analizzare devono essere preparati solo con relativamente pochi accorgimenti. È indispensabile in primo luogo essiccare i campioni per togliere tutta l'umidità ed averne il peso al netto dell'acqua. Per avere la stessa geometria di conteggio fra i campioni e gli standard di riferimento, è poi opportuno utilizzare contenitori sempre delle stesse dimensioni e porvi i campioni solo dopo setacciatura con setacci della stessa luce (sono stati utilizzati setacci con luce netta di 2 mm). Il campione così preparato viene posto direttamente a contatto con il rivelatore, che registra quindi una parte dei raggi gamma emessi, in funzione della sua efficienza di conteggio e dell'angolo solido utile. Il rivelatore determina quindi la distribuzione energetica dei fotoni gamma espressa come numero degli impulsi rivelati in funzione dell'energia della radiazione incidente (spettro).

La figura 6 mostra uno spettro gamma di un campione costituito da sabbia di zirconio utilizzato per la calibrazione dei rivelatori. Dall'individuazione nello spettro gamma del picco di ^{137}Cs , a 661,27 keV, e dalla sua analisi, è possibile determinare l'attività del ^{137}Cs . L'analisi deve tenere conto dell'efficienza di conteggio del rivelatore, del tempo di conteggio, del branching ratio, del fondo del rivelatore e di altri parametri che influenzano la forma dello spettro. L'analisi porta alla definizione dell'attività specifica del campione espressa come numero di decadimenti al secondo (Bq) per unità di massa (Bq/kg). Ai fini della determinazione del tasso di erosione è utile esprimere il risultato in termini di attività totale per unità di superficie (Bq/m^2), quantità spesso denominata "inventario".

Figura 6 - Spettro gamma di un campione costituito da sabbia di zirconio. In ascissa le energie (canale) e in ordinata i conteggi registrati dallo strumento



3.1.2. Modelli di conversione

L'utilizzo delle misure di ^{137}Cs nella stima dell'erosione dei suoli si basa sull'ipotesi che sia possibile determinare una relazione quantitativa, affidabile, tra il grado di aumento o perdita di cesio rispetto al valore di riferimento e il grado di perdita o accumulo di suolo.

In letteratura gli approcci fino ad ora utilizzati per la determinazione di queste procedure di calibrazione possono essere suddivisi in due grandi gruppi:

- relazioni empiriche
- modelli teorici.

In generale le relazioni empiriche sono state determinate utilizzando appezzamenti di terreno sperimentali nei quali si è determinato il tasso di erosione con metodi tradizionali e contemporaneamente sono state eseguite misure di ^{137}Cs correlandole con il valore del tasso di erosione e ottenendo quindi una relazione di calibrazione [41] [42] [35]. Altri autori hanno determinato delle relazioni empiriche applicando ai dati di cesio l'equazione universale di perdita di suolo (USLE Universal Soil Loss Equation).

Questo tipo di approccio presenta alcune importanti limitazioni al suo utilizzo, poiché le relazioni empiriche possono essere applicate esclusivamente a situazioni che riproducano quelle dell'appezzamento di prova, soprattutto per quello che riguarda il tipo di suolo e la profondità dell'aratura del terreno. Inoltre, dati di erosione relativi ad appezzamenti di terreno scelti come terreni prova non sono quasi mai disponibili per quello che riguarda il lungo termine (più di 35 anni).

Un ulteriore problema sorge quando le relazioni empiriche vengono utilizzate per ottenere stime puntuali di erosione di suolo. Infatti, poiché le calibrizioni empiriche si ottengono confrontando le perdite del cesio con il tasso netto di erosione calcolato relativamente a tutto il campo di prova, di conseguenza, tali equazioni possono essere applicate per calcoli con dati che riproducano spazialmente questa condizione di prova.

Le limitazioni all'uso delle relazioni empiriche delineate più sopra hanno spinto molti autori a sviluppare modelli teorici, in grado di simulare l'effetto di tutti i processi interessati nella redistribuzione del ^{137}Cs e del suolo. Tra questi modelli, uno dei più utilizzati in letteratura nella stima dell'erosione dei suoli a partire dalle misure di ^{137}Cs , è il modello "proporzionale" [39] [42], applicabile esclusivamente a suoli coltivati.

Le premesse teoriche alla base di questo modello prevedono che il ^{137}Cs da fallout sia completamente mescolato all'interno dello strato di suolo coltivato e che la perdita di suolo, dall'inizio dell'accumulo del cesio nel terreno fino al momento del prelievo del campione, sia direttamente proporzionale alla riduzione del contenuto di cesio nel suolo. Il modello proporzionale può essere espresso matematicamente secondo l'equazione 3.1.2.1:

$$Y = \frac{cBdX}{T} \quad (3.1.2.1)$$

dove :

Y = perdita di suolo media all'anno (t/ha yr)

c = costante dipendente dalle unità di misura utilizzate

d = profondità dello strato coltivato (m)

B = densità del suolo (kg/m^3)

T = tempo intercorso dall'inizio dell'accumulo nel suolo del ^{137}Cs (yr)

X = variazione percentuale dell'inventario di ^{137}Cs rispetto al valore di riferimento definita da:

$$X = \frac{(A_C - A_{\text{RIF}})}{A_{\text{RIF}}} \times 100 \quad (3.1.2.2)$$

dove:

Arif = inventario del sito di riferimento

Ac = inventario del campione

Le ipotesi alla base del modello proporzionale rappresentano tuttavia una semplificazione del reale processo di accumulo del ^{137}Cs nel profilo di suolo. Infatti, l'accumulo del radionuclide avviene in un intervallo temporale ampio e, tra un'aratura e l'altra, il cesio che si è depositato sulla superficie del suolo può essere rimosso per erosione prima di essere incorporato nel profilo dai processi arativi. Si capisce come il modello, non tenendo in considerazione questo aspetto, tenda a sovrastimare il reale tasso di erosione. D'altra parte il modello non considera un ulteriore problema: la diluizione nel tempo del contenuto di cesio all'interno dello strato coltivato. Questo avviene perché un certo quantitativo di suolo proveniente dal livello sottostante l'originale strato coltivato, e quindi non contenente ^{137}Cs , viene progressivamente incorporato nello strato coltivato a causa dell'abbassamento del livello superficiale del terreno dovuto ai processi erosivi. In questo caso dunque il modello, non prevedendo una correzione, tende a fornire risultati che sottostimano in modo significativo i reali tassi erosivi.

I modelli di bilancio di massa [42] [43] [33], anche questi ampiamente usati, rappresentano un tentativo di superare alcune delle limitazioni presenti nel modello proporzionale e appena descritte. Un ulteriore miglioramento di questa tipologia di modelli si ha con il modello di bilancio di massa "raffinato" proposto da Walling and Quine [44] che prende in considerazione sia il meccanismo della rimozione del ^{137}Cs prima della sua incorporazione all'interno dello strato di terreno coltivato sia la selettività in funzione della granulometria associata alla mobilizzazione e al trasporto dei sedimenti.

I diversi modelli di bilancio di massa, se da una parte tentano di rappresentare la complessità dei distinti processi che contribuiscono al fenomeno erosione nella maniera più simile al loro comportamento reale, dall'altra introducono la necessità di conoscere una serie di parametri fisici non sempre facilmente reperibili o misurabili. Tra questi, per fare un esempio, il flusso di deposizione annuale di ^{137}Cs , la composizione granulometrica del suolo originale, prima cioè di subire processi erosivi, la composizione granulometrica del sedimento reso mobile e trasportato dalle acque di ruscellamento ecc.

Nel nostro caso, la mancanza di una serie di dati necessari per poter applicare il modello di bilancio di massa ci ha orientato verso l'utilizzo del più semplice modello proporzionale. Infatti una stima dei parametri mancanti, talvolta arbitraria, avrebbe reso non attendibili i risultati ottenuti e vanificato i vantaggi derivanti dall'applicazione di questi dettagliati modelli di erosione. Il modello proporzionale, nonostante la semplificazione delle sue ipotesi di base, che inevitabilmente portano ad una modellizzazione del problema non completamente aderente alla realtà, necessita della conoscenza di due semplici informazioni, la profondità di aratura e la densità del suolo, parametri questi facilmente ricavabili con un buon grado di affidabilità. La valutazione del tasso di erosione determinata col modello proporzionale fornisce quindi una stima affidabile, ma comunque sempre una approssimazione del tasso reale di erosione dei suoli.

Discorso a parte meritano i suoli indisturbati nei quali l'incorporazione del ^{137}Cs è principalmente dovuta ad un processo diffusivo. Nella maggior parte dei casi la distribuzione di ^{137}Cs lungo il profilo segue un andamento esponenziale, con una diminuzione di ^{137}Cs all'aumentare della profondità, e può essere descritto dalla seguente equazione (eq. 3.1.2.3) [42] [46]:

$$A'(x) = A_{\text{ref}}(1 - e^{-x/h_0}) \quad (3.1.2.3)$$

dove:

x = profondità dalla superficie del terreno (kg/m^2)

$A'(x)$ = inventario di ^{137}Cs al di sopra della profondità x (Bq/m^2)

A_{ref} = valore di inventario di ^{137}Cs di riferimento (Bq/m^2)

h_0 = coefficiente che descrive la forma del profilo (kg/m^2)

Il modello di distribuzione del profilo consente di stimare il tasso di erosione partendo da questa descrizione esponenziale del profilo di ^{137}Cs e ipotizzando che il fallout totale sia avvenuto nel 1963 e che la distribuzione del radionuclide nel profilo di suolo sia indipendente dal tempo. Secondo questo modello il tasso di erosione Y ($\text{t}/\text{ha yr}$) si può esprimere come [42] [46]:

$$Y = \frac{100 h_0}{(t - 1963)} \ln\left(1 - \frac{X}{100}\right) \quad (3.1.2.4)$$

dove :

t = anno della raccolta del campione (yr)

X = variazione percentuale dell'inventario di ^{137}Cs rispetto al valore di riferimento

Anche questo modello rappresenta una semplificazione dei diversi aspetti che entrano in gioco nel processo erosivo dei suoli indisturbati. Tra questi si possono includere la mancanza della dipendenza temporale sia dell'input del ^{137}Cs di fallout sia della potenziale redistribuzione post-deposizionale del ^{137}Cs all'interno del profilo di suolo. Il verificarsi di quest'ultimo evento porterebbe ad un aumento col tempo del fattore h_0 e, conseguentemente, alla sovrastima della velocità di erosione.

La semplicità di questo modello rispetto, per esempio, al modello di bilancio di massa "raffinato", applicabile a suoli indisturbati, e la facilità con la quale sono determinabili i parametri necessari per la sua applicazione, hanno fatto sì che fosse scelto come modello per la valutazione del tasso di erosione dei suoli non coltivati all'interno del bacino del Comunelli.

3.2 La RUSLE

Il modello RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) deriva direttamente dall'originale Universal Soil Loss Equation (USLE) di Wischmeier and Smith [45] a sua volta sviluppata a partire da ricerche svolte fin dagli anni '50 in USA. In effetti, la RUSLE assume la stessa forma del modello originale, da cui si differenzia semplicemente per l'implementazione di procedure assistite dai moderni PC che consentono un calcolo più rigoroso, oltre che più agevole, dei singoli parametri e ne permettono l'applicazione anche a scala di bacino idrografico e non più solo a scala di parcella o di campo, come era nelle intenzioni degli autori. La USLE nacque infatti per soddisfare le esigenze di pianificazione e conservazione nell'uso del suolo a scopo agrario e forestale, ed era particolarmente indirizzata agli agricoltori ed ai tecnici agronomi.

In sintesi, la RUSLE ha la seguente forma:

$$A = R K SL C P \quad (3.2.1)$$

dove A è la stima della perdita annuale di suolo (t ha⁻¹ anno⁻¹) causata dall'erosione ad opera delle acque ruscellanti (sheet e rill erosion);

R è il fattore erosività della pioggia (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ anno⁻¹) e quantifica l'effetto dell'impatto delle gocce di pioggia sul suolo nonché l'intensità del ruscellamento superficiale; la sua espressione matematica è data da:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j \quad (3.2.2)$$

nella quale, E è l'energia cinetica totale dell'evento di pioggia (MJ ha⁻¹), I₃₀ è la massima intensità di pioggia di durata 30 min (mm h⁻¹), k rappresenta il singolo evento erosivo, m è il numero di eventi erosivi in un anno, j rappresenta l'anno di osservazione ed n è il numero totale di anni considerato per il calcolo del valore medio di R [40];

K è il fattore erodibilità del suolo (t h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹), cioè la misura della suscettibilità del suolo all'erosione sotto determinate condizioni, ed è influenzato dalle proprietà mineralogiche e tessiture; esso viene generalmente determinato graficamente, mediante il nomogramma (o abaco) di Wischmeier & Smith [45], o attraverso la seguente formula, basata su dati sperimentali provenienti da 225 tipi di suolo [5], che correla il valore di K alla granulometria del suolo:

$$K = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(Dg) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.2.3)$$

dove $Dg(mm) = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i)$ con Dg = media geometrica delle dimensioni delle particelle di suolo, f_i = % della frazione granulometrica e m_i = media aritmetica degli estremi della frazione granulometrica. Questa relazione è molto utile qualora non si disponga di tutti i dati descrittivi del suolo e/o la composizione tessiturale è fornita in un particolare sistema di classificazione;

LS è il fattore topografico (adimensionale) dato dalla combinazione di acclività e lunghezza del versante, entrambe influenti sull'entità dell'erosione: a valori elevati di queste caratteristiche corrisponde una più alta velocità di flusso del ruscellamento e, quindi, maggiore erosione. Nel calcolo del fattore LS sono possibili due tipi di approcci: misure in sito o derivazione da un modello digitale di elevazione (DEM);

C rappresenta il fattore copertura vegetale e uso del suolo (adimensionale), introdotto per considerare l'effetto delle pratiche agricole sui processi erosivi naturali, rappresentati dai primi tre fattori;

P rappresenta invece il fattore pratiche conservative (adimensionale) ed è il rapporto tra la perdita di suolo che si avrebbe con specifiche tecniche di conservazione e la corrispondente perdita per effetto delle attività di aratura sul versante.

Il modello, evidentemente di tipo empirico, è basato sul concetto di deviazione da uno standard, ossia dalle condizioni date da un campo di lunghezza 22,13 m, acclività uniforme del 9%, sottoposto a maggese e lavorato a rittochino. Conseguentemente, la stima della perdita di suolo derivante dall'applicazione del modello, costituisce il rapporto tra la perdita di suolo sotto le condizioni attuali rispetto a quella registrabile sotto le condizioni di riferimento. Questo rapporto è stato definito sulla base di osservazioni sperimentali in diverse località degli USA.

3.3 L'analisi statistica

Un secondo tipo di approccio per la valutazione dell'erosione a scala di bacino è quello della ricerca delle relazioni statistiche tra dati di trasporto solido fluviale in sospensione, nel seguito definito trasporto torbido (Tu), e parametri idrologici, morfologici e climatici caratteristici dei corsi d'acqua e dei relativi bacini idrografici. Questo fa sì che si possa disporre di un semplice strumento di valutazione indiretta da applicare nei casi in cui le misure dirette non siano disponibili od onerose da svolgere.

In tal senso, la metodologia non va intesa quale sostitutiva di metodi più sofisticati, ma quale valida alternativa quando questi siano di difficile applicazione, per esempio, a causa delle dimensioni territoriali interessate. Ciò assume maggior significato se si considera il trasporto torbido quale indice di erosione dei versanti all'interno del bacino, per cui esso può essere utilizzato in relazione a problematiche ambientali più ampie.

È infatti concordemente ritenuto che il trasporto in sospensione, relativo alla frazione di sedimenti di dimensioni fini (limo-argilla), può rappresentare fino al 90% del trasporto totale, in ambienti morfoclimatici da aridi o semi-aridi ad umidi [28], laddove il substrato geologico sia costituito almeno in parte da rocce di natura terrigena. Ciò si verifica senz'altro in un territorio di recente formazione come quello italiano e, in particolare, come quello siciliano, dove abbondano litotipi arenaceo-sabbiosi e argillosi.

L'efficacia di formule di regressione lineare per esprimere le portate torbide fluviali in funzione di parametri geomorfologici, idrologici e/o climatici di facile acquisizione è stata teorizzata e dimostrata in diversi casi da vari autori, fin dagli anni '50-'60. Fra i primi lavori si possono citare, ad esempio, quelli di Anderson [15], Langbein & Schumm [34], Fournier [30], Douglas (1968), Cooke & Doornkamp [28]. Dello stesso periodo, in Italia sono noti i lavori di Capozza [21], Gazzolo & Bassi [31] [32], Cavazza [22] e, successivamente, di Ciccacci et al. [27]. Una rassegna critica degli studi sull'argomento è contenuta in Ciccacci et al. [25] e in Lupia Palmieri [36]. Nel 1986, ancora Ciccacci et al. [26] mettevano a punto alcune regressioni multiple, basate su un campione di 20 bacini, di cui due ubicati in Sicilia e gli altri nell'Italia continentale, che trovavano successiva applicazione anche in studi relativamente recenti su bacini idrografici italiani [24] [18] [37] [14] [38] [23]. Di seguito si riportano le formulazioni considerate utili ai fini del presente studio:

$$\log Tu = 1,52390 + 0,33708Dd \quad (3.3.1)$$

$$\log Tu = 1,44780 + 0,32619Dd + 0,10247\Delta a \quad (3.3.2)$$

$$\log Tu = 1,47963 + 0,32800Dd + 0,00200 p^2/P \quad (3.3.3)$$

nelle quali, Dd (km/km^2) è la densità di drenaggio, data dal rapporto tra la lunghezza totale delle aste fluviali e la superficie del bacino, Δa è l'indice di anomalia gerarchica, un parametro che dà la misura del grado di organizzazione della rete drenante [16] [17] e p^2/P è l'indice climatico di Fournier [30], dato dal rapporto tra il quadrato della precipitazione del mese più piovoso e la precipitazione totale annua.

Lo stesso approccio statistico, peraltro, veniva adoperato nello stesso periodo da Cannarozzo & Ferro [19] [20], con specifico riferimento al territorio regionale della Sicilia. Sulla base dei dati relativi a 19 bacini idrografici siciliani, essi misero a punto la seguente relazione:

$$Tu = -2860,27 + 14,75L - 1111,52 \ln Ic \quad (3.3.4)$$

dove L è la lunghezza dell'asta principale (in km) e Ic è un indice climatico proposto dagli stessi autori, dato dal rapporto tra il valore medio dello scarto quadratico medio dei valori mensili di precipitazione σ_m ed il valore medio della precipitazione annua P (mm).

Utilizzando lo stesso criterio e sulla base di un più ampio set di parametri, oltre a quelli già considerati dagli autori citati, si è ritenuto opportuno ricercare ed analizzare la connessione statistica con il Tu al fine di elaborare nuove formule e verificarne l'efficacia rispetto a quelle sopra riportate.

Il campione esaminato è costituito da un insieme di 16 bacini idrografici comprendenti corsi d'acqua principali e secondari della Sicilia, selezionati in base alla disponibilità di serie storiche di misure di portata torbida della rete di osservazione nazionale (Tabella I):

Tabella I - Denominazione e dati caratteristici dei bacini esaminati

| Id | Bacini | Nome Stazione | Anni di osservazione | T_u t km⁻² anno⁻¹ | Area km² |
|-----------|---------------|----------------------|--|--|----------------------------|
| 1 | Anapo | S. Nicola | 1972-82;1985-87;1989-90 | 62,04 | 105,41 |
| 2 | Baiata | Sapone | 1969-71;1974-76;1978 | 130,65 | 27,84 |
| 3 | Birgi | Chinisia | 1971-75; 1978-84; 1987 | 143,11 | 343,27 |
| 4 | Cimia | Cerasaro | 1967-69 | 71,09 | 74,37 |
| 5 | Delia | Pozzillo | 1962-69;1971-75;1977-78 | 123,92 | 138,38 |
| 6 | Eleuterio | Risalaimi | 1965-66; 1969-80; 1985-90 | 97,96 | 64,25 |
| 7 | Fastaia | La China | 1972-75; 1978 | 96,91 | 23,65 |
| 8 | Forgia | Lentina | 1973-74; 1976; 1978-79; 1982-83; 1987-88 | 49,10 | 49,93 |
| 9 | Gattano | Zai | 1974-76 | 50,31 | 27,11 |
| 10 | Gornalunga | Secreto | 1962-63; 1965 | 135,19 | 228,67 |
| 11 | Imera | Petralia | 1971-72;1974-82;1984 | 191,52 | 28,5 |
| 12 | Jato | Taurro | 1962-67 | 159,99 | 166,19 |
| 13 | Magazzolo | Corvo | 1972-73; 1975; 1978-79 | 91,04 | 186,65 |
| 14 | San Leonardo | Monumentale | 1966-75; 1977-80 | 329,69 | 504,58 |
| 15 | Sciaguana | Torricchia | 1969; 1971-72;1974-75; 1977 | 57,69 | 69,03 |
| 16 | Torto | Bivio Cerda | 1971; 1973-75; 1977; 1980; 1983 | 325,84 | 415,11 |

Si è considerata una serie di parametri che esprimono i fattori che regolano i processi di produzione e trasporto dei sedimenti (Tabella II). Dal punto di vista concettuale, si è considerata pertanto la necessità di esprimere sia le caratteristiche di erodibilità intrinseca dei materiali affioranti nei bacini esaminati che quelle di erosività climatica; inoltre, dato che i processi di trasporto sono influenzati dai caratteri morfologici e orografici del bacino nonché dalla organizzazione topologica della rete drenante, dai quali dipende l'effettiva quantità di sedimenti che viene recapitata alla stazione di misura, si sono considerati anche quei parametri che esprimono tali caratteristiche. Dato che la finalità è rappresentata dalla messa a punto di una metodologia applicabile in bacini sprovvisti di stazioni di misura idrotorbiometriche, non sono state considerate le variabili che non derivino da serie storiche disponibili o che non siano desumibili dalla cartografia. Per questo motivo non sono state considerate variabili quali la portata liquida o il deflusso superficiale, le cui misure sono disponibili per un numero limitato di corsi d'acqua principali.

Tabella II – Elenco dei parametri utilizzati e relativi simboli

| | |
|-----------------|---|
| Tu | Trasporto torbido unitario medio annuo |
| PM | Perimetro del bacino idrografico |
| A | Area del bacino idrografico |
| H_bas_M AX | Quota massima del bacino idrografico |
| H_bas_Ml N | Quota minima del bacino idrografico |
| H_bas_M EAN | Quota media del bacino idrografico |
| \square H_bas | Variazione di quota del bacino idrografico |
| H_OUT | Quota del punto di foce del reticolo idrografico |
| H_net_farth | Quota del punto più lontano dalla foce del reticolo idrografico |
| Lnet_M X | Massima dimensione del reticolo (massima distanza rispetto alla foce, misurata lungo il reticolo idrografico) |
| Lbas_M X | Massima dimensione del bacino (massima distanza rispetto alla foce, misurata lungo lo spartiacque) |
| \square L_net | Somma delle lunghezze delle aste fluviali |
| Dd | Densità di drenaggio |
| RbARIT | Rapporto di biforcazione (media aritmetica) |
| RbdARIT | Rapporto di biforcazione diretto (media aritmetica) |
| RbPON | Rapporto di biforcazione (media ponderale) |
| RbdPON | Rapporto di biforcazione diretto (media ponderale) |
| RPON | Indice di biforcazione (differenza tra RbPON e RbdPON) |
| NUM_A | Numero di anomalie gerarchiche |
| Ga | Densità di anomalie gerarchiche |
| \square a | Indice di anomalie gerarchiche |
| Re | Rapporto di allungamento |
| Rc | Rapporto di circolarità |
| Rh | Rapporto di rilievo |
| Rh_BAS NET | Rapporto di rilievo calcolato rispetto alla massima dimensione del reticolo idrografico |
| Re_BAS NET | Rapporto di allungamento calcolato rispetto alla massima dimensione del reticolo idrografico |
| Rh_NET | Rapporto di rilievo dato dal rapporto della differenza di quota tra la foce e il punto più lontano da questo e la massima dimensione del reticolo idrografico |
| SQRT_Dd | Rapporto tra la somma delle lunghezze delle aste fluviali e il lato del quadrato avente la stessa area del bacino idrografico |
| F | Indice FAO |
| Px \square | Indice climatico di Ciccacci et al. (1977) |
| \square /P | Indice climatico di Cannarozzo & Ferro (1986) |
| Rclim | Indice di aggressività climatica (Ferro et al., 1991) |
| Lem | Indice di erodibilità |

In conclusione, è stato determinato un totale di 32 parametri idro-geomorfologici, i quali possono essere suddivisi in quattro raggruppamenti: parametri che descrivono i caratteri dimensionali ed orografici del bacino imbrifero (area, perimetro, quote, dislivello, forma); parametri che descrivono i caratteri dimensionali ed orografici riferiti alla sola rete drenante (lunghezza, quote, dislivello); parametri che esprimono il grado di organizzazione del reticolo ed i rapporti dimensionali tra rete drenante e superficie drenata; parametri climatici. I primi tre gruppi costituiscono, nell'insieme, i cosiddetti parametri geomorfici; ad essi ed ai parametri climatici si aggiunge un parametro litologico, specificamente elaborato, definito per esprimere il grado di erodibilità del substrato.

La migliore espressione, in termini di significatività statistica ($R^2 = 0,87$; $F = 0,0000125$), scaturita dall'analisi di correlazione è la seguente:

$$T_u = 114,54 + 1.567 \cdot A - 5.023 \cdot PM + 116,14 \cdot Lem \quad (3.3.5)$$

dove A è l'area del bacino, PM il perimetro e Lem è l'indice di erodibilità.

Bibliografia

- [14]. Agnesi V., Del Monte M., Fredi P., Macaluso T., Messina V., 1996. Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'erosione del suolo nel bacino del fiume Imera settentrionale (Sicilia centro-settentrionale). P.O.P. Sicilia 1990-93, Giornata di Studio "Erosione del Suolo, Gestione dei Sedimenti e Morfologia delle Coste", Palermo, 22 marzo 1996, 101 – 115.
- [15]. Anderson, H. W., 1957. Relating Sediment Yield to Watershed Variables. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 38, No. 6, 921-924.
- [16]. Avena G. C. & Lupia Palmieri E., 1969. Analisi geomorfica quantitativa. In: B. Accordi (ed.), Idrogeologia dell'alto bacino del Liri. Geologica Romana, VIII, pp. 319-378.
- [17]. Avena, G.C., Giuliano G., Lupia Palmieri E. , 1967. Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali. Boll. Soc. Geol. It. 86, 781-796.
- [18]. Battista C., Boenzi F., Pennetta L., 1988. Una valutazione dell'erosione nel bacino idrografico del torrente Arcidiaconata in Basilicata. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., vol. I, 235- 246.
- [19]. Cannarozzo M. & Ferro V., 1985. Un semplice modello regionale per la valutazione del trasporto solido in sospensione nei corsi d'acqua siciliani. Atti Acc. Scienze Lettere e Arti di Palermo, serie V, vol. V, 95-137.
- [20]. Cannarozzo M. & Ferro V., 1986. Alcune considerazioni sulla scelta di una variabile climatica nella valutazione del trasporto solido in sospensione nei corsi d'acqua siciliani. Atti Acc. Scienze Lettere e Arti di Palermo, serie V, vol. VI, 139-157.
- [21]. Capozza F., 1963. Influenza del fattore geomorfologico e litologico sul trasporto solido del Fiume Agri a monte della diga del Pertusillo. Rass. Lav. Pubbl., n. 12, 1235- 1258.
- [22]. Cavazza S., 1972. Contributo al calcolo del potenziale di erosione. Riv. It. Geof., XXI, 27- 32.
- [23]. Ceci D. P., Farroni A., Magaldi D., 1998. Applicazione del codice di calcolo Raizal per la valutazione del rischio di erosione nel bacino del fiume Tavo. GEAM, dicembre, 285-291.
- [24]. Ciccacci, S., D'Alessandro L., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., 1988. Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa allo studio dei processi di denudazione nel bacino idrografico del torrente Paglia. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., vol. I, 171- 188.
- [25]. Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. & Pugliese, F., 1980. Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali. Boll. Soc. Geol. It. 99, 455 - 516.
- [26]. Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. & Pugliese, F., 1986. Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and

- hydrological parameters. *International Geomorphology* p. II (V. Gardiner ed.), J. Wiley & Sons Ltd., 33 - 48.
- [27]. Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., 1977. Rapporti fra trasporto solido e parametri climatici e geomorfici in alcuni bacini idrografici italiani. Atti Convegno "Misura del trasporto solido al fondo nei corsi d'acqua" CNR-Firenze.
- [28]. Cooke R.U. & Doornkamp J.C., 1974. *Geomorphology in Environmental Management. An Introduction*. Clarendon Press, Oxford, 413 pp.
- [29]. Douglas I., 1968. Sediment sources and causes in the humid tropics of northeast Queensland, Australia. In: A. M. Harvey (ed.), *Geomorphology in a Tropical Environment*. Brit. Geom. Res. Group. Occ. Pap. 5, 27-39.
- [30]. Fournier F., 1960. Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Univ. de France, Paris, 201 pp.
- [31]. Gazzolo T. & Bassi G., 1961. Contributo allo studio del grado di erodibilità dei terreni costituenti i bacini montani dei corsi d'acqua italiani. *Min. lav. Pubbl., Giornale del Genio Civile*, 1, 9 - 19.
- [32]. Gazzolo T. & Bassi G., 1964. Relazione tra i fattori del processo di ablazione ed il trasporto solido in sospensione nei corsi d'acqua italiani. *Min. lav. Pubbl., Giornale del Genio Civile*, 6, 377- 395.
- [33]. He Q., and Walling D.E., (1997), The distribution of fallout ¹³⁷Cs and 210Pb in undisturbed and cultivated soils, *Appl. Radiat. Isotopes* 48: 677-690.
- [34]. Langbein W. B. & Schumm S. A., 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 39, No. 6, 1076-1084.
- [35]. Loughran R.C., and Campbell B.L., (1995), The identification of catchment sediment sources, p. 189-205. In I.L.Foster et.al. (ed.) *Sediment and water quality in river catchments*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [36]. Lupia Palmieri E., 1983. Il problema della valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali. *Atti XXIII Congr. Geog. It.*, 2, 143- 176.
- [37]. Lupia Palmieri E., Ciccacci S., Civitelli G., Corda L., D'Alessandro L., Del Monte M., Fredi P., Pugliese F., 1995. Geomorfologia quantitativa e morfodinamica del territorio abruzzese: il bacino idrografico del fiume Sinello. *Geogr. Fis. e Dinam. Quatern.*, vol. 18 (1), 31-46.
- [38]. Massaro M. E., Russo M., Zuppetta A., 1996. Analisi indiretta dell'entità dell'erosione nel bacino del fiume Tammaro. *Geogr. Fis. Dinam. Quatern.*, vol. 19 (2), 381-394.
- [39]. Mitchell J.K., Bubenzer G.D, McHenry J.R., Ritchie J.C., (1980), Soil loss estimation from fallout cesium-137 measurements, p. 393-401. In M. DeBoodt and D. Gabriels (ed.) *Assesment of erosion*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

- [40]. Renard, K.G. and Freimund, J.R., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157, 287-306
- [41]. Ritchie J.C., and McHenry J.R., (1975), Fallout Cs-137: A tool in conservation research, *J. Soil Water Conserv.* 30: 283-286.
- [42]. Walling D.E., and Quine T.A., (1990), Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data, *Land Degrad. Rehab.* 2: 161-175.
- [43]. Walling D.E., and Quine T.A., (1993), Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the caesium-137 technique. Univ. of Exeter, Exeter, UK.
- [44]. Walling D.E., and Quine T.A., (1999), Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements, *J. Environ. Qual.* 28: 611-622.
- [45]. Wischmeier W. H. & Smith D.D., (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook no. 537.
- [46]. Zhang X.B., Higgitt D.L., and Walling D.E., (1990), A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China, *Hydrol. Sci. J.* 35: 267-276.

4. METODOLOGIA DI CAMPIONAMENTO

I punti di campionamento sono stati predefiniti su base cartografica, in ambiente GIS (Geographic Information System), previa acquisizione ed incrocio dei tre strati informativi relativi a pedologia, acclività ed uso del suolo (Figure 7-8-9). A tale scopo, sono state utilizzate le basi cartografiche disponibili: relativamente alla classificazione pedologica, è stata utilizzata la Carta dei Suoli della Sicilia alla scala 1:250.000 (Fierotti et al., 1988); la carta delle acclività è stata elaborata a partire dal DEM 20x20 m della Regione Sicilia; per l'uso del suolo è stata utilizzata la copertura CORINE Land Cover alla scala 1:100.000. I tre strati informativi erano già disponibili in formato numerico e georeferenziati, pertanto è stato possibile utilizzarli in ambiente GIS senza alcuna operazione di digitalizzazione. La sovrapposizione e l'integrazione di questi, operata utilizzando gli appositi strumenti della piattaforma ESRI ArcGIS 9.0, ha permesso di classificare le aree caratterizzate da omogeneità di caratteri fisici, ossia le "unità di paesaggio" (Figura 10), in relazione alla capacità di conservazione o trasferimento del ^{137}Cs .

Figura 7 – 1° strato informativo: classificazione dell'area di studio in base alla tessitura del suolo

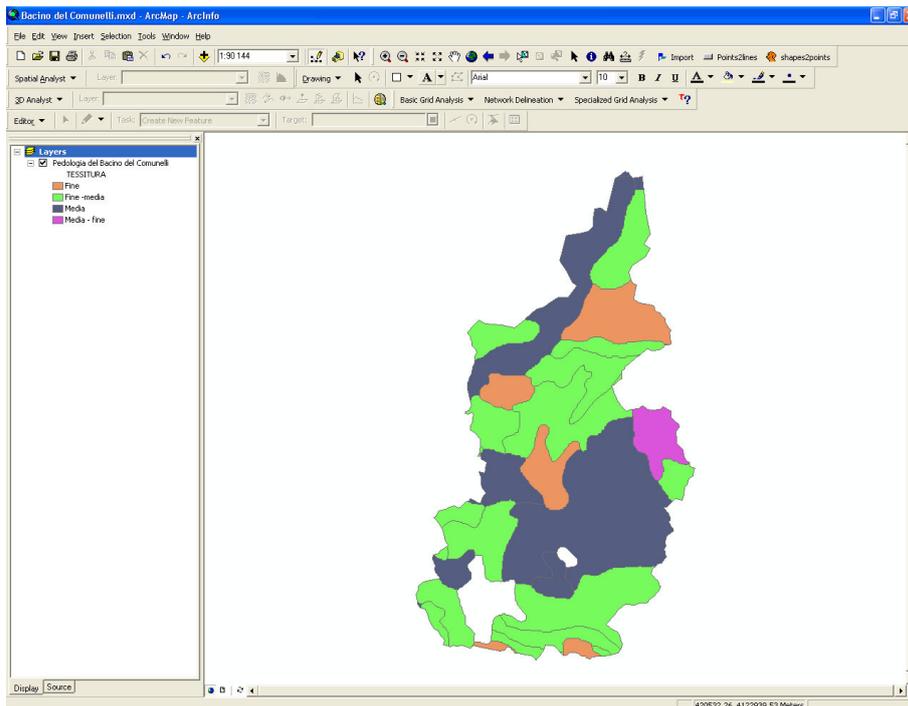


Figura 8 – 2° strato informativo: classificazione dell'area di studio in base all'uso del suolo

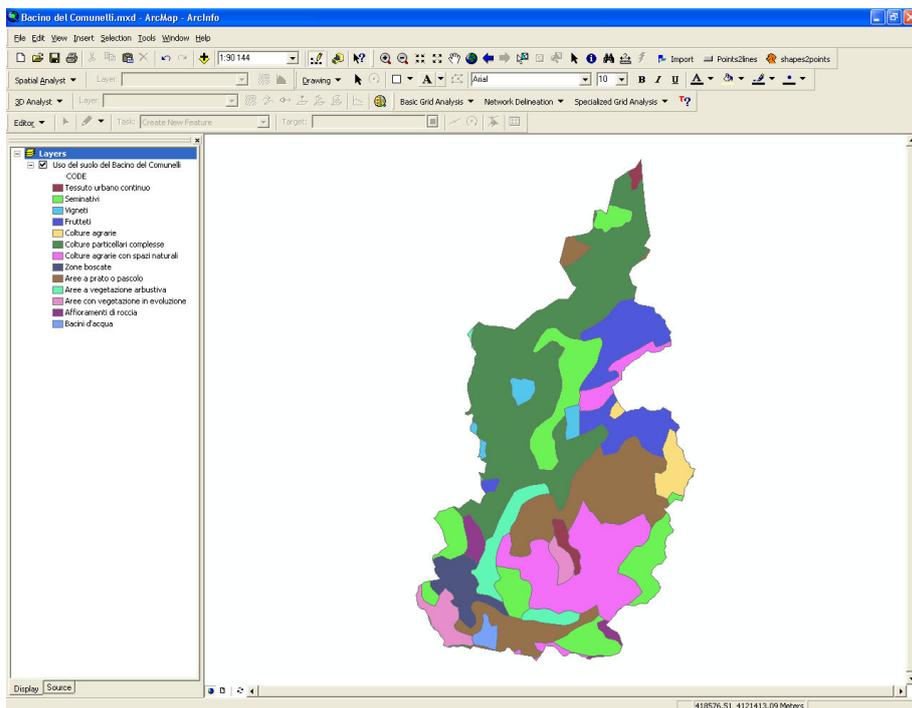


Figura 9 – 3° strato informativo: classificazione dell'area di studio in base all'acclività dei versanti

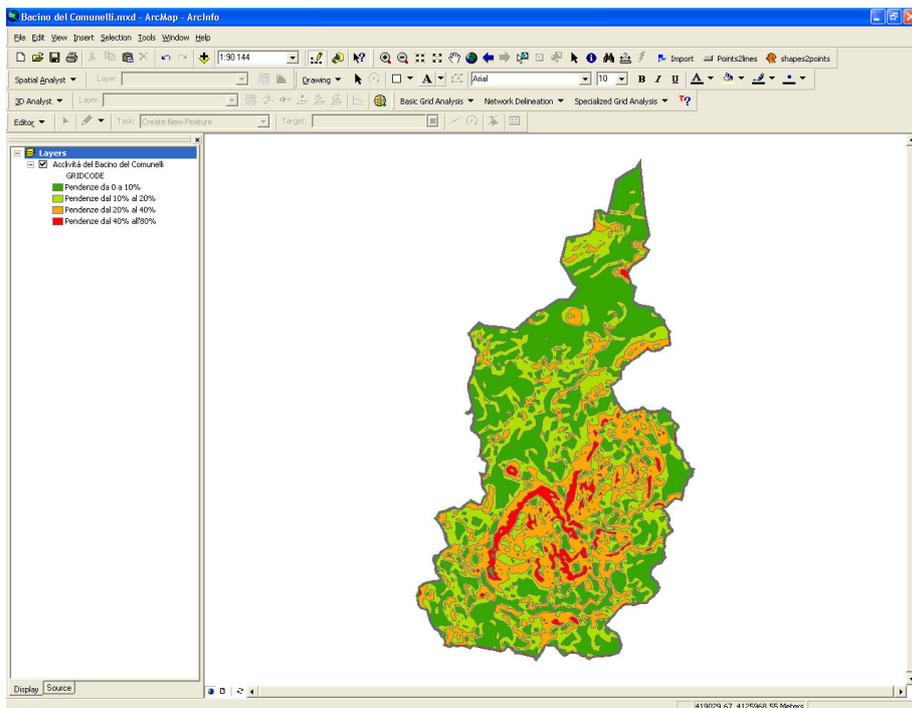
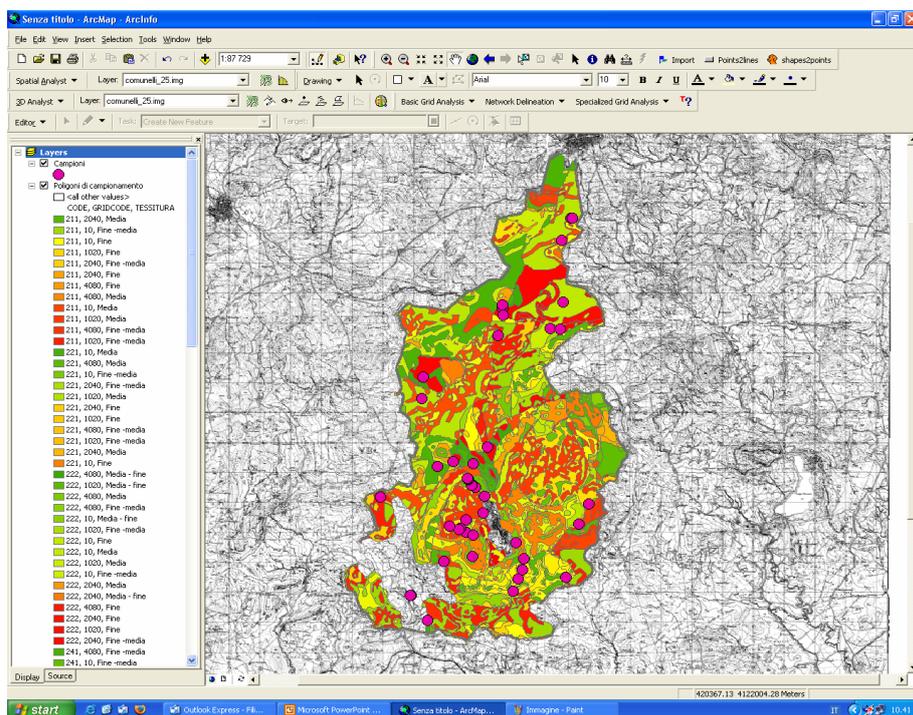


Figura 10 – Overlay degli strati informativi: classificazione dell'area di studio in Unità di Paesaggio e ubicazione punti di campionamento



Infatti la tessitura del suolo, cioè la granulometria, influisce sia sulle capacità di cattura e ritenzione dei radionuclidi, in quanto questi ultimi si legano alla particelle argillose o di sostanza organica, dotate di attività superficiale, sia sull'erosibilità, per cui un suolo argilloso - attraverso il quale, peraltro, non avviene movimento d'acqua se non in misura molto limitata - è capace di conservare il contenuto di radionuclidi da fall-out in misura maggiore rispetto ad un suolo sabbioso, che ha caratteristiche opposte.

L'acclività dei versanti influisce sulla stabilità del suolo e sulla velocità di scorrimento delle acque superficiali, cioè sul potere erosivo di queste: quindi, versanti più acclivi sono soggetti a maggiore erosione, con conseguente maggiore perdita del contenuto di radionuclidi, mentre, al contrario, aree con minor pendenza o piane determinano il rallentamento delle acque superficiali e la conseguente deposizione dei sedimenti ed accumulo del contenuto in ^{137}Cs associato.

La copertura vegetale e l'uso del suolo influiscono, in primis, sulla quantità di radionuclidi che raggiunge effettivamente la superficie del suolo (il fogliame delle coperture boschive o arbustive cattura il fall-out in massima parte), secondariamente, le attività agrarie determinano il rimescolamento degli orizzonti superficiali, quindi una redistribuzione del ^{137}Cs al loro interno, ed influiscono al contempo sui processi erosivi, che si esplicano in maggior misura proprio sui terreni lavorati e privi di adeguata copertura vegetale.

Ogni “unità di paesaggio” risultante è caratterizzata dalle 3 descrizioni relative agli strati informativi di origine, che rimangono registrate nella relativa tabella degli attributi. Le aree con copertura boschiva, i centri urbani e la superficie corrispondente al lago artificiale, sono state definite come “aree di esclusione”. Sono state escluse anche quelle aree caratterizzate da valori di acclività superiori al 70% (circa 35°), in quanto oltre tali valori è inibita la pedogenesi (ossia la formazione del suolo).

L’evidenziazione e la mappatura delle “unità di paesaggio” ha permesso di impostare il piano di campionamento non già secondo il criterio tradizionale dei transetti lineari o della maglia regolare, che, date le dimensioni dell’area da noi esaminata, avrebbe comportato un notevole dispendio economico e di tempo, ma ubicando pochi punti di prelievo nelle aree rappresentative delle diverse condizioni pedologiche, morfologiche e di uso del suolo riscontrabili all’interno dell’area-test.

Inoltre, sovrapponendo ai tematismi così ottenuti lo strato informativo relativo alla rete viaria esistente nell’area, è stato possibile ubicare gran parte dei punti di campionamento in prossimità delle strade, in modo da semplificarne il raggiungimento ed ottimizzare il più possibile questa fase. Gli stessi punti sono stati individuati in campagna mediante posizionamento con GPS.

Sulla base del piano di campionamento così definito, sono state effettuate due campagne di prelievo (maggio e novembre del 2004), nel corso delle quali sono stati raccolti complessivamente 44 campioni di suolo.

I campioni di suolo sono stati prelevati mediante un carotiere appositamente realizzato. Il carotiere consta di due elementi in ferro piegati ad “U” che, mediante battitura, vengono infissi nel terreno uno alla volta, in modo che si incastrino l’uno nell’altro ad isolare un cuneo di suolo fino alla profondità desiderata (Figure 11-12). Nel nostro caso ci si è limitati ad una profondità di 40-50 cm dalla superficie, in modo da “catturare” il contenuto in ^{137}Cs ricaduto al suolo ed eventualmente migrato all’interno del suolo stesso e/o rimescolato in conseguenza delle lavorazioni agrarie.

Una volta estratto e posato sul terreno, il carotiere può essere aperto rimuovendo uno dei due elementi e lasciando indisturbato il cuneo di suolo (“carota”) all’interno dell’altro elemento (Figura 13). È stato così possibile sezionare sul posto le carote raccolte, ai fini della ricostruzione del profilo radiometrico, cioè dell’andamento del contenuto radioisotopico all’interno del suolo, dalla superficie verso gli orizzonti più profondi. Le carote sono state sezionate ogni 5 cm, dando luogo a 6-8 sub-campioni per carota, che sono stati conservati separatamente per le successive analisi di laboratorio (granulometria, mineralogia e attività ^{137}Cs).

Figura 11 – Infissione del carotiere mediante battitura



Figura 12 – Estrazione del carotiere



Figura 13 – Sezionamento della carota e prelievo sub-campioni



Bibliografia

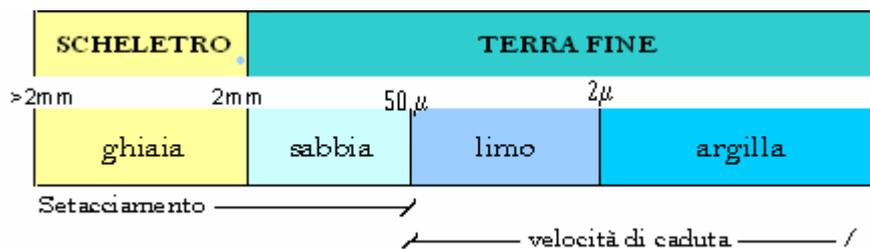
- [47]. Fierotti G., Dazzi C., Raimondi S., 1988. Carta dei Suoli della Sicilia. Regione Siciliana – Università degli Studi di Palermo, Palermo.

5. CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA E MINERALOGICA

Alcune delle proprietà fisiche dei materiali, quali porosità, permeabilità e angolo di riposo (per i materiali sciolti), sono controllate o influenzate dalle proprietà strutturali e tessiture fra cui la granulometria, la classazione, la forma dei grani, nonché dai loro caratteri superficiali e dal loro orientamento durante la deposizione. Esistono, quindi, precise relazioni fra tessitura, struttura e comportamento meccanico dei materiali. La forma e la dimensione delle particelle componenti il suolo sono controllate fortemente dalla composizione mineralogica, originata dalla roccia madre e dal tipo di evoluzione subita. La dimensione e la composizione delle particelle formanti il suolo influiscono inoltre sulla capacità di intrappolamento e ritenzione dei radionuclidi posseduta soprattutto dalle particelle di minerali argillosi e dalla sostanza organica, che di solito costituiscono le frazioni più fini.

Pertanto, si è ritenuto opportuno effettuare la caratterizzazione granulometrica e mineralogica al fine di verificare l'eventuale correlazione tra contenuti in ^{137}Cs e proprietà fisiche dei suoli campionati.

Nel campo dei suoli i limiti dimensionali delle particelle consentono di separarle in due categorie: lo "scheletro", con particelle di diametro superiore ai 2 mm (ghiaia), e la "terra fine", con diametro inferiore a 2 mm (sabbia, limo ed argilla):



Le particelle con diametro superiore a 50μ vengono separate con metodo meccanico tramite setacciatura con l'utilizzo di una pila di setacci a diametro decrescente, mentre le frazioni inferiori a 50μ vengono analizzate per sedimentazione (MIPA, 2000). Lo strumento utilizzato per questo lavoro è il sedigrafo. Il principio di funzionamento si basa sulla differente velocità di caduta di particelle di varia grandezza in un mezzo liquido a viscosità nota e temperatura costante, come descritto dalla legge di Stokes.

Il campione disperso viene introdotto in una camera di mescolamento dove è mantenuto in agitazione fino al momento dell'analisi per favorirne l'omogeneizzazione; a quel punto viene trasferito in una cella avente pareti piatte e trasparenti dove ha inizio la sedimentazione gravitativa delle particelle. La cella è collocata tra una sorgente ed un rilevatore di raggi X, per cui, quando un fascio di sottili raggi paralleli viene collimato sul detector, esso passerà anche attraverso la cella, ad una determinata altezza, e sarà intercettato dalle particelle in caduta. Ciascuna particella percorrerà quindi una distanza nota compresa tra la sommità della cella e il punto in cui si trova il fascio di raggi X, in un tempo che viene misurato direttamente dallo strumento, assumendo come istante iniziale l'inizio della sedimentazione.

Il calcolo della velocità di caduta permette di determinare il diametro equivalente (poiché particelle differenti hanno forme diverse, la misura dimensionale viene riportata come Diametro Sferico Equivalente, vale a dire il diametro di una sfera avente la stessa composizione e la stessa velocità di caduta della particella analizzata) delle particelle analizzate e contemporaneamente la frequenza percentuale delle classi granulometriche relative.

I principali vantaggi di questa tecnica analitica risiedono nei brevi tempi di analisi e in una buona riproducibilità; di contro è richiesta una relativamente elevata quantità (1,5-2,5 g) di materiale per l'analisi.

L'analisi granulometrica dà come risultati la suddivisione in quattro classi (ghiaia, sabbia, limo, argilla); per la classificazione vengono usati dei grafici triangolari che riportano sui lati le percentuali relative delle frazioni appartenenti a sabbia, limo e argilla. La classificazione utilizzata è quella prevista dal metodo USDA (United States Department of Agriculture, Soil Taxonomy, 1999).

La diffrattometria a raggi X è un'analisi comunemente utilizzata per l'individuazione delle fasi minerali componenti rocce, suoli e sedimenti. Le indicazioni analitiche ottenute mediante questa tecnica sono stime semiquantitative della percentuale di ogni singola fase cristallina presente nei campioni di polveri. Essa si fonda sulla proprietà che hanno le sostanze cristalline di diffrangere i raggi X con un angolo legato alle dimensioni del reticolo e, quindi, caratteristico della sostanza stessa; misurando tale angolo e l'intensità dei raggi X diffratti, è possibile identificare la sostanza e stimarne l'abbondanza nel campione.

Il diffrattometro è composto da un generatore di raggi X, un sistema goniometrico di altissima precisione che consente di orientare il campione rispetto alla sorgente di raggi X ed un rivelatore per misurare l'intensità dei raggi diffratti. Il fascio incidente viene emesso da un tubo radiogeno: dopo aver "colpito" il campione, posto in opportune condizioni geometriche, il fascio subisce una diffrazione (scattering) e arriva ad uno scintillatore che trasforma il segnale in intensità di radiazioni ricevute ad ogni angolo.

La XRD fornisce una stima semiquantitativa del contenuto mineralogico del campione e permette di individuare le fasi cristalline che siano presenti in una percentuale di almeno il 5%.

Bibliografia

[48]. Ministero per le Politiche Agricole, 2000. Metodi di analisi fisica del suolo. Ed. Franco Angeli.

[49]. USDA, 1999. Soil Taxonomy.

6. RILIEVI IN LAGHI ARTIFICIALI

6.1 Dati tecnici degli invasi

La diga sul torrente Comunelli, realizzata nel 1961-1968, è del tipo in terra con nucleo verticale, con una lunghezza al coronamento di 680,00 m. ed un'altezza (ai sensi della L. 584/1994) di 29,00 m per un volume di $1,35 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Figure 14-15).

Le acque invase vengono utilizzate, da parte del Consorzio di Bonifica 5-Gela, per l'irrigazione nell'area dei Comuni di Gela e Butera.

La superficie dello specchio liquido alla quota di massimo invaso è di $0,94 \text{ km}^2$ per un volume di invaso (ai sensi della L. 584/1994) di $7,80 \times 10^6 \text{ m}^3$ ed una relativa capacità morta (cioè il volume destinato all'interrimento) pari a $1,8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Nel 1988, una ditta incaricata dal Consorzio di Bonifica effettuò un primo rilievo sullo stato del fondo del serbatoio, mediante una ripresa aerofotogrammetrica con restituzione alla scala 1:2000. Tale rilievo, confrontato con la precedente cartografia del 1968, restituita alla stessa scala, permise di valutare un volume di interrimento, relativo ad un ventennio di esercizio, di poco più di $2,00 \times 10^6 \text{ m}^3$, con spessore massimo dei sedimenti di circa 12 m in corrispondenza dello scarico di fondo ed uno spessore medio di circa 4,70 m.

Già nel 1988, dunque, il volume di interrimento ipotizzato in progetto era stato abbondantemente superato. Successivamente, nel settembre del 1998, veniva registrato un ulteriore aumento dello spessore del materiale solido, in corrispondenza dello scarico di fondo, che raggiungeva un valore di 17 m. A causa di ciò, attualmente, lo scarico di fondo risulta del tutto ostruito ed in buona parte lo è anche la presa per la derivazione.

Figura 14 – Diga Comunelli



Figura 15 – Vista dell’invaso Comunelli da monte



Inoltre, a seguito della diminuzione tendenziale delle precipitazioni nel corso degli ultimi decenni, con riguardo, in particolare, alle precipitazioni massime di lunga durata e che si realizza soprattutto in termini di prolungamento dei periodi siccitosi [48], la conseguente estrema variabilità degli apporti idrici all’invaso fa sì che quest’ultimo rimanga spesso in gran parte asciutto, e che i sedimenti depositati al fondo vengano portati alla luce. Ciò ha sicuramente influenza sul grado di compattazione dei sedimenti e sull’effettivo quantitativo di materiale depositato, in termini di peso.

La diga di S. Rosalia, costruita nel 1976-1981, presenta una struttura analoga alla precedente, in terra con nucleo verticale, lunga 348,00 m al coronamento, per un’altezza (ai sensi della L. 584/1994) di 53,50 m ed un volume di $1,536 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Figure 16-17).

L’opera è gestita dall’ Ente di Sviluppo Agricolo (ESA) della Sicilia, mentre le reti irrigue ed acquedottistiche collegate sono di competenza del Consorzio di Bonifica 8-Ragusa. Le acque invasate sono destinate ad uso irriguo e potabile per il fabbisogno civile e degli insediamenti rurali situati nei comuni di Ragusa, Modica e Scicli.

La superficie dello specchio liquido alla quota di massimo invaso è di $1,45 \text{ km}^2$, per un volume di invaso (ai sensi della L. 584/1994) pari a $20 \times 10^6 \text{ m}^3$. Il volume di progetto destinato all’interrimento è di $1,70 \times 10^6 \text{ m}^3$.

In questo serbatoio non sono mai stati effettuati rilievi specifici sull’interrimento, anche perché, nel corso dell’esercizio, non si sono mai verificate anomalie nelle disponibilità dei volumi idrici rispetto alle previsioni di progetto, queste ultime supportate dalla presunta bassa erodibilità del bacino afferente e dal conseguente limitato apporto solido potenziale del corso d’acqua interessato.

Figura 16 – Diga di S. Rosalia



Figura 17 – Vista dell'invaso di S. Rosalia verso monte



6.2 I rilievi batimetrici

6.2.1. Risorse impiegate

Per l'esecuzione dei rilievi è stata impiegato un gommone con fondo in vetroresina, della lunghezza di 4,50 m (Figura 18), con idonee caratteristiche di pescaggio e manovrabilità, tali cioè da consentire l'esecuzione di misure anche in prossimità del bordo del bacino.

L'acquisizione digitale dei dati è stata effettuata mediante un sistema integrato basato su Personal Computer, al quale sono stati interfacciati i sistemi di bordo (DGPS ed ecoscandaglio), e gestito da un software di acquisizione/navigazione (Figure 19-20). Il sistema adoperato consente di definire, in fase di pianificazione della campagna, e quindi di eseguire, in fase operativa, tutte le procedure atte alla gestione ed acquisizione dei dati strumentali. In particolare, fornisce tutte le informazioni grafiche e numeriche di ausilio al comando dell'imbarcazione, acquisisce e memorizza i dati misurati dai vari sensori ad esso collegati, genera fix sequenziali per la sincronia dei record digitali ed analogici tenendo conto della posizione dei vari sensori ed operando le relative correzioni in base ai rispettivi offset.

Per il posizionamento di precisione del natante è stato impiegato un sistema satellitare con metodologia differenziale DGPS, interfaccia RS-232C e comunicazione nello standard NMEA-0183, che consente di ottenere, nelle migliori condizioni operative, una precisione sub-metrica nel dato di posizione.

Le misure di profondità sono state acquisite tramite ecoscandaglio a doppio canale (frequenze del segnale: 33-200 kHz), con risoluzione di 1 cm ed accuratezza pari, rispettivamente, a $1 \text{ cm} \pm 0,1 \%$ del valore di profondità, in alta frequenza, e $5 \text{ cm} \pm 0,1 \%$ del valore di profondità, in bassa frequenza.

Figura 18 – Imbarcazione utilizzata per i rilievi batimetrici



Figura 19 – Strumentazione di bordo (PC portatile ed ecoscandaglio)



Figura 20 – Antenna GPS per il posizionamento di precisione dei rilievi

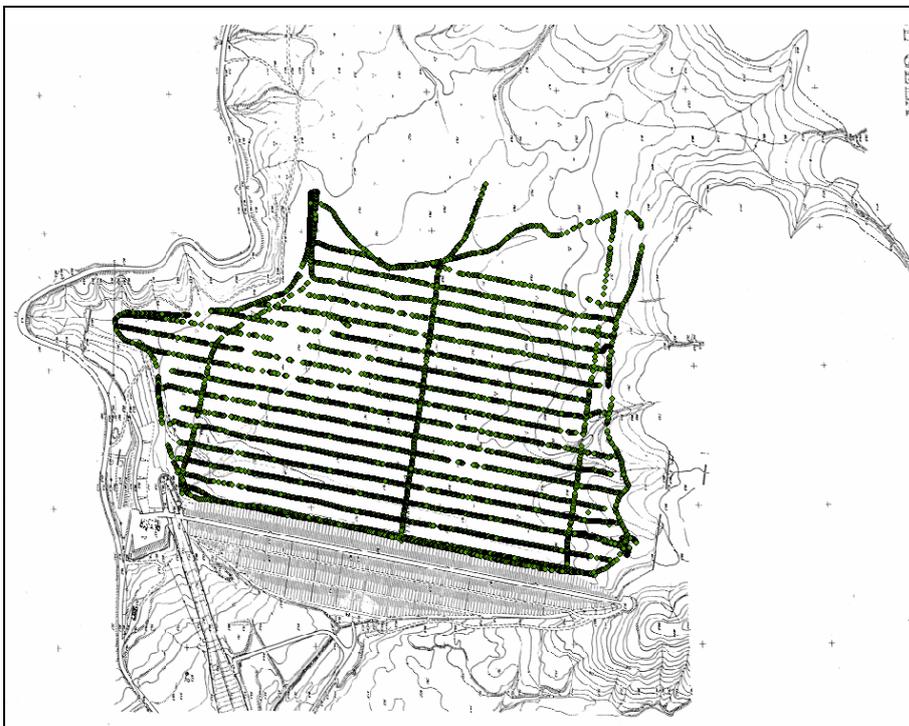


6.2.2. Pianificazione e svolgimento dei rilievi

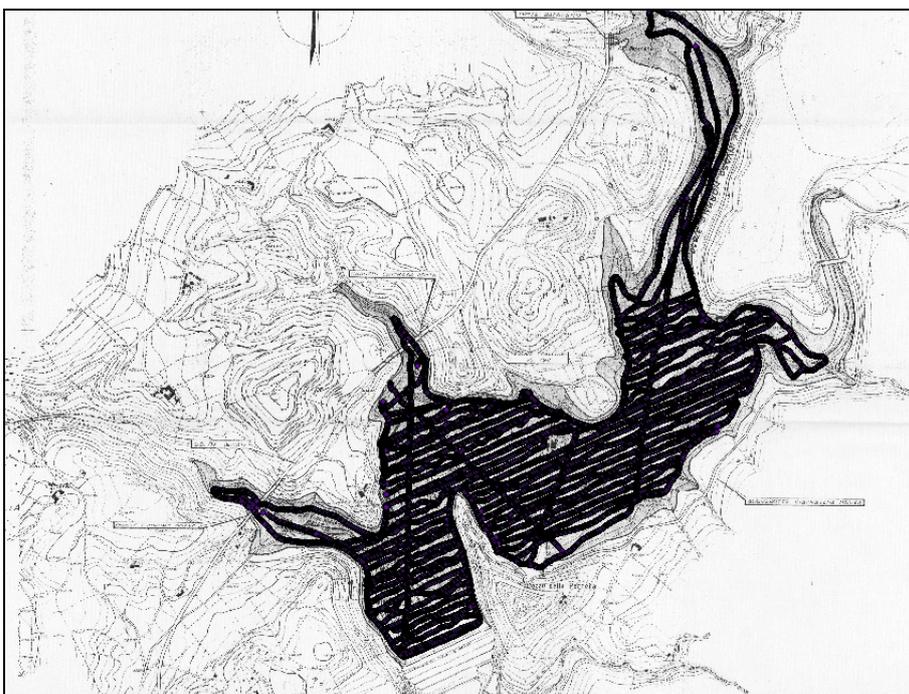
In base alle informazioni ricavate in sito e alla cartografia disponibile, il rilievo batimetrico è stato pianificato definendo le linee di navigazione sulla carta (Figura 21).

Figura 21 – Linee di navigazione eseguite nei rilievi batimetrici

a) invaso Comunelli



b) invaso S. Rosalia



La base cartografica è costituita, nel caso del Comunelli, dall'aerofotorestituzione dell'area di invaso alla scala 1:2000 eseguita nel 1988, gentilmente messa a disposizione dal Consorzio di Bonifica di Gela. Nel caso del S. Rosalia, la base cartografica è costituita dalla planimetria del serbatoio in scala 1:5000, allegata agli atti di collaudo della diga stessa.

In fase di pianificazione della campagna si è provveduto anche ad un controllo sulla uniformità del dato cartografico con quello ricavato dal DGPS. Già dal primo sopralluogo è risultato evidente, ad esempio, che, nel serbatoio Comunelli, una rilevante porzione dell'invaso non sarebbe stata investigabile a causa della presenza di vegetazione che avrebbe impedito la navigazione e l'uso di sensori acustici.

La prima operazione compiuta con l'imbarcazione in acqua, in entrambe le campagne, è stata la verifica quotidiana della velocità del suono tramite bar-check. La trasmissione dell'onda acustica emessa dall'ecoscandaglio è infatti influenzata dalla temperatura e dalla densità del mezzo liquido attraversato, pertanto questi parametri vanno verificati all'inizio di ogni rilievo. Questa operazione consiste nel calare ad una profondità nota una superficie riflettente e nel verificare la taratura dell'ecoscandaglio.

In entrambi i serbatoi, il rilievo è stato eseguito, secondo pianificazione, lungo linee di navigazione parallele alla diga e con una equidistanza di 25 metri. Inoltre, si è eseguito il rilievo lungo tutto il bordo navigabile dell'invaso e lungo linee di controllo ortogonali alle precedenti linee di navigazione.

Attraverso il sistema strumentale integrato sono state acquisite contemporaneamente ed in forma digitale tutte le informazioni necessarie. In particolare, i records contenenti tutte le informazioni (data, ora, n° di linea, n° di fix, posizione, profondità ecc.) sono stati acquisiti con una cadenza di 2 secondi. Tale configurazione ha consentito di ottimizzare tutte le operazioni di rilievo e di ottenere allo stesso tempo un set di dati di elevata affidabilità e precisione. I dati batimetrici sono stati acquisiti anche in formato cartaceo ed utilizzati come copia di sicurezza e per dirimere eventuali dubbi in fase di elaborazione.

6.2.3. *Processamento ed elaborazione dei dati*

I dati raccolti sono stati sottoposti a verifica e controllo utilizzando un software dedicato. L'intero rilievo batimetrico è stato programmato ed eseguito lungo linee di navigazione ben definite, denominate Guidance Object (GO). Ogni GO è stato verificato, processato ed esportato secondo un medesimo standard. Una volta verificata l'integrità e la continuità del set di dati, si è ricavata la quota del fondale attraverso il confronto delle due frequenze di rilievo. In questa fase si è proceduto alla eliminazione degli spikes e alla correzione di zone anomale. La più frequente causa di spikes è la vegetazione che riflette i segnali acustici impedendo di fatto il riconoscimento del fondale. I dati anomali più diffusi sono dovuti a motivi tecnici: talvolta l'ecoscandaglio individua il fondale non sul primo segnale di ritorno, ma su un multiplo di esso. Ogni GO processato è stato salvato ed esportato in formato x-y-z.

L'interpolazione con il metodo Kriging dei dati processati ha consentito la creazione di un grid batimetrico con risoluzione di 10 metri. Tale risoluzione è apparsa la più adeguata alle specifiche del rilievo (strumentazione e metodologia di acquisizione dati). Per quanto riguarda il Comunelli i calcoli sono stati effettuati all'interno di un'area delimitata dall'isopisa 88 metri (Figura 22a), considerata quindi come fault line. Per il S. Rosalia si è scelta la più ampia area navigabile (Figura 22b) e, data l'estensione del rilievo, due aree di maggior dettaglio. I grid possono essere visualizzati mediante modelli bi- e tridimensionali.

Il primo passo dell'elaborazione è stata un'ulteriore verifica della bontà dei dati, utilizzando le linee di controllo opportunamente programmate ed eseguite. I dati di profondità sono stati riferiti ai livelli altimetrici assoluti forniti dalle stazioni di misura poste in prossimità delle dighe. In questa fase non sono state rilevate anomalie e i dati raccolti sono risultati perfettamente coerenti tra loro.

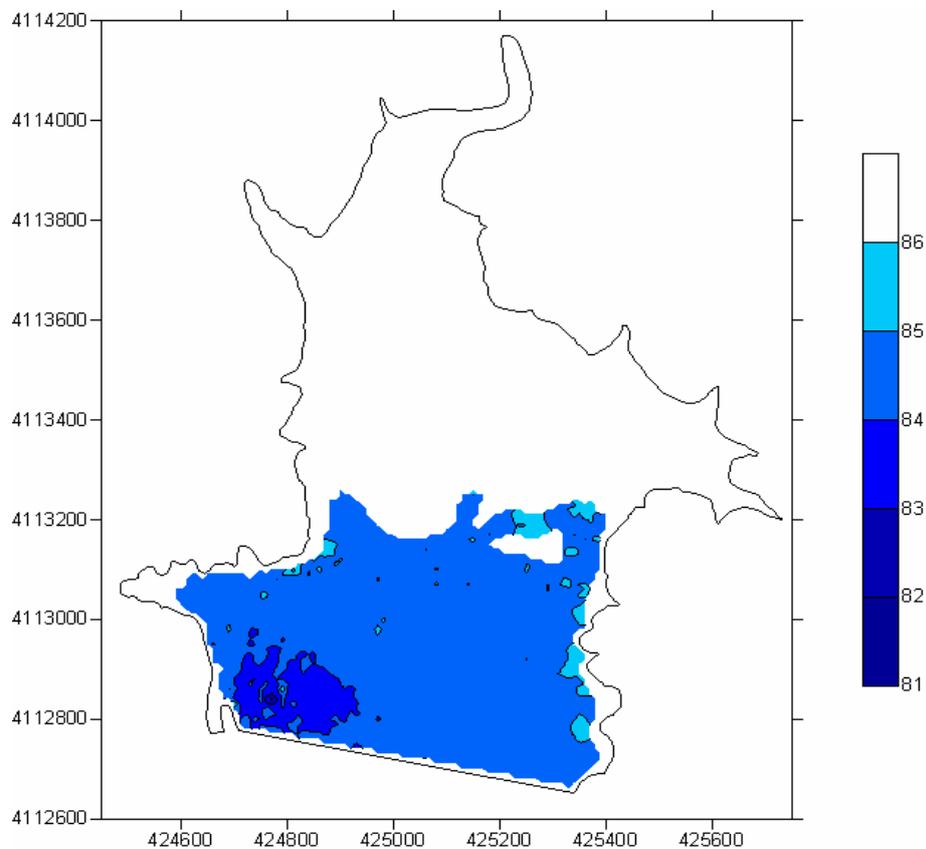
I dati ottenuti sono stati restituiti in formato cartaceo alla scala 1:2000 e in forma digitale nei formati più comuni (.grd, .img, .asc). Il calcolo volumetrico dei sedimenti depositati al fondo degli invasi si è basato sul confronto altimetrico fra la superficie rilevata mediante le misure batimetriche e quella pregressa risultante dalle cartografie di riferimento. Si è proceduto, quindi, alla digitalizzazione delle informazioni altimetriche ricavate dalle isopipse e dai punti quotati contenuti nelle cartografie citate (Figure 23a-b).

Tali informazioni sono state elaborate tramite lo stesso programma di interpolazione ed alla stessa risoluzione geometrica adoperati per i dati batimetrici, allo scopo di fornire un grid topografico equivalente a quello batimetrico descritto precedentemente. Il software impiegato, così come molti applicativi GIS, ha infatti la possibilità di sovrapporre grid georiferiti al fine di calcolare i volumi che da tale sovrapposizione scaturiscono.

Il grid batimetrico è stato impostato come superficie superiore. Mediante lo strumento Cut & Fill Volumes viene evidenziato un volume positivo (Cut Volume), laddove la superficie superiore si trova al di sopra di quella inferiore, per effetto della deposizione di sedimenti sulla superficie originaria. Quando, invece, la superficie superiore si trova al di sotto di quella inferiore, risulta un volume negativo (Fill Volume), che indica, al contrario, che si è verificata erosione o comunque perdita di materiale (Figure 24a-b).

Figura 22 – Carte batimetriche degli invasi

a) invaso Comunelli



b) invaso S. Rosalia

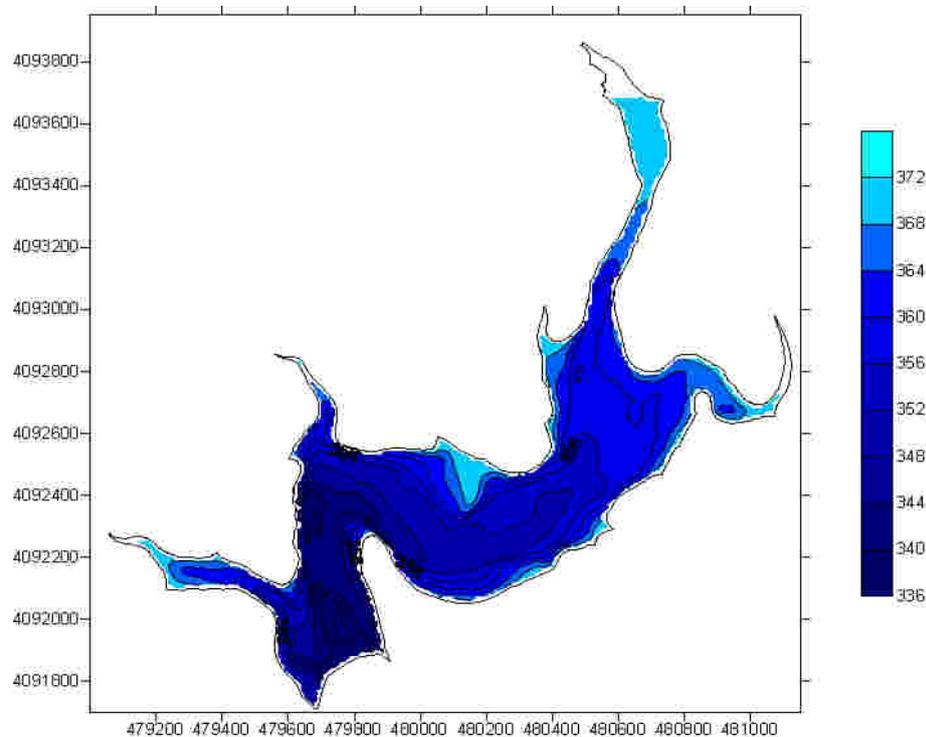
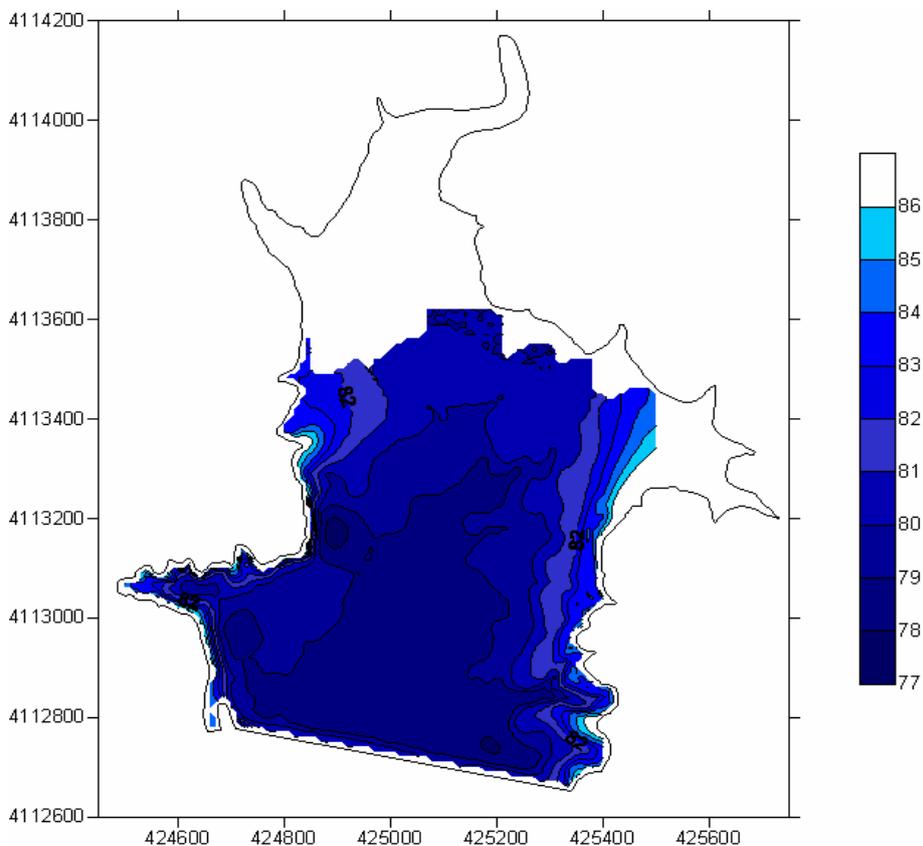


Figura 23 – Carte delle quote topografiche antecedenti alla realizzazione degli invasi

a) invaso Comunelli



b) invaso S. Rosalia

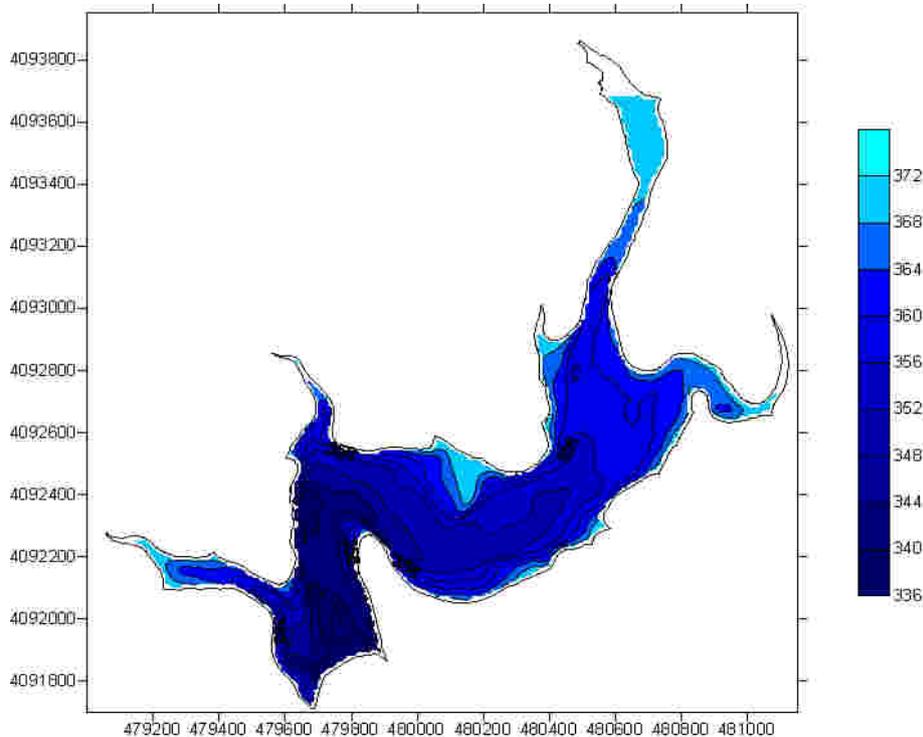
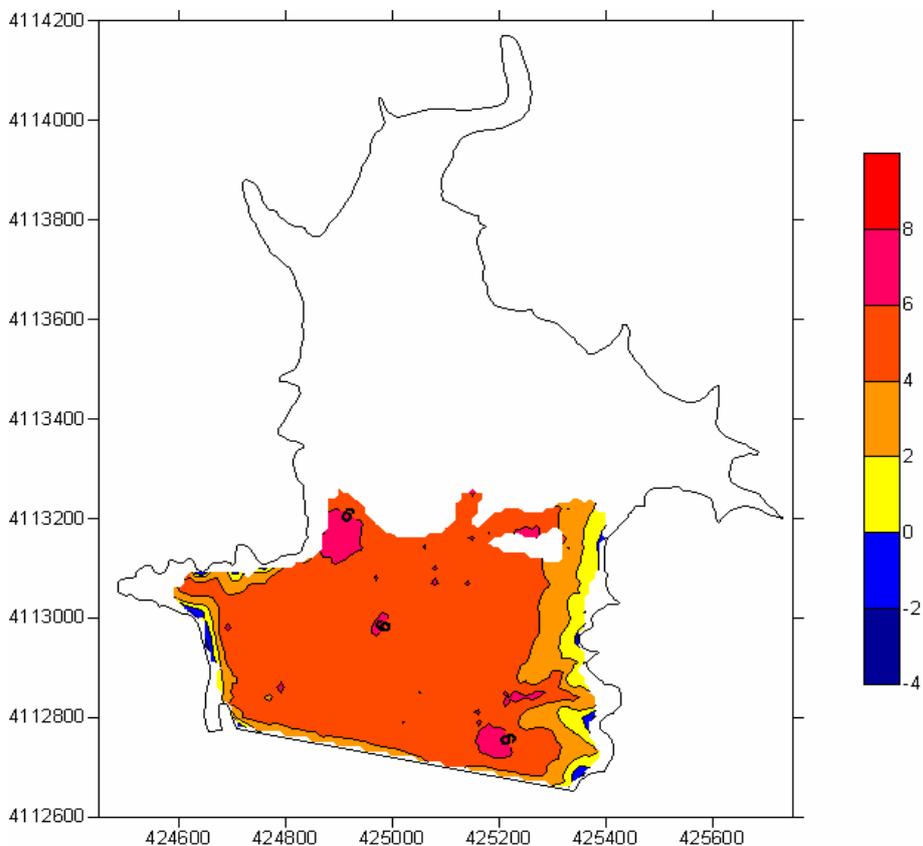
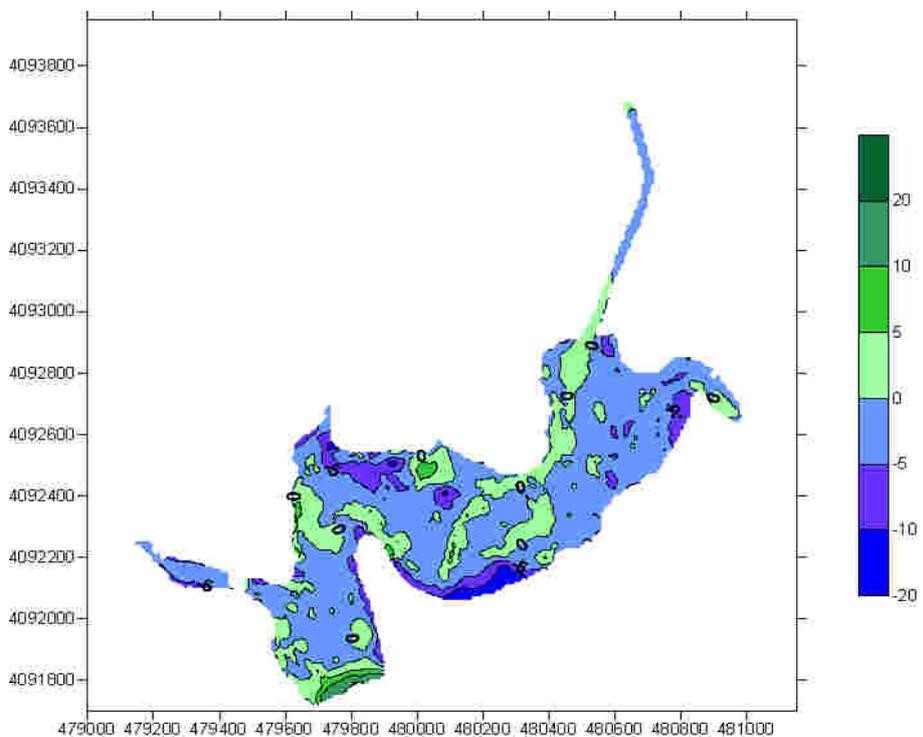


Figura 24 – Carta degli spessori di sedimento all'interno degli invasi

a) invaso Comunelli



b) invaso S. Rosalia



Bibliografia

- [50]. Agnese C., Bagarello V., Baiamonte G., Corrao C., Crescimanno G., D'asaro F., Di Stefano C., Ferro V., Giordano G., Iovino M., Minacapilli M., Provenzano G., Pumo D. (2003). Processi idrologici e rischio di desertificazione. Dipartimento di Ingegneria e Tecnologie Agro-Forestali, Università degli Studi di Palermo, 47 pp.

7. RISULTATI

7.1. Analisi granulometriche e mineralogiche

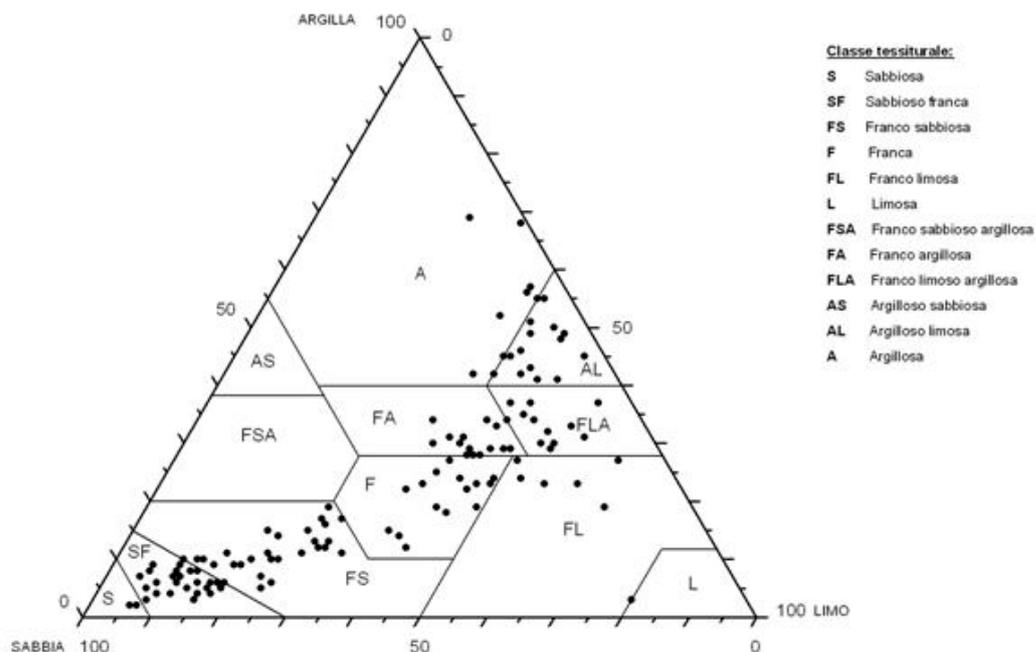
Per le analisi granulometriche e mineralogiche è stato utilizzato un numero selezionato di campioni dopo che l'analisi delle prime carote aveva evidenziato una ridottissima variabilità all'interno della stessa carota. Sono stati quindi analizzati 3 campioni per ogni carota, corrispondenti allo strato superficiale (top soil) a quello intermedio a quello più profondo.

I campioni di suolo sono stati essiccati in stufa termoventilata ad una temperatura di 40° C e successivamente quartati; dopodiché, per ognuno di essi, è stata prelevata una aliquota pari a 50 g, immersa in una soluzione di acqua distillata e sodio esametafosfato allo 0,05 % vol., per favorire la dispersione e impedire la flocculazione delle particelle fini, e successivamente trattata con H₂O₂ per l'eliminazione della sostanza organica.

La dispersione così ottenuta è stata stacciata a umido tramite un setaccio da 50µ; la frazione superiore è stata essiccata e setacciata, mentre la frazione inferiore è stata analizzata tramite il sedigrafo.

Le analisi hanno evidenziato una ampia variabilità fra i campioni analizzati, con una leggera prevalenza della classe sabbiosa. I campioni ricadono infatti prevalentemente nei campi dei suoli sabbiosi, sabbioso franchi e franco sabbiosi (coarse texture, secondo la classificazione FAO) e nei campi di composizione intermedia quali franco, franco argilloso, franco limoso argilloso (medium texture) (Figura 25 e Tabella III).

Figura 25 – Classificazione granulometrica dei campioni di suolo (USDA)



L'analisi mineralogica è stata effettuata su pasticche ottenute dai campioni essiccati e finemente polverizzati in un mortaio di agata. Le polveri ottenute sono state analizzate al Diffratometro Philips PW 1710, con anodo di rame (Cu K α), in condizione di tensione e corrente rispettivamente di 40 kV e 40 mA, con angoli compresi fra 4 e 80°.

Dal punto di vista mineralogico, i campioni si sono rivelati molto omogenei: i minerali principali sono risultati, per tutti, il quarzo, la calcite e i feldspati (K-feldspati e/o plagioclasti), con i minerali argillosi quali minerali secondari a volte scarsamente rappresentati. In alcuni campioni si è rilevata la presenza di dolomite o gesso (Tabella III). Le associazioni mineralogiche identificate hanno mostrato sempre una buona correlazione con la composizione mineralogica delle formazioni geolitologiche affioranti nelle aree di campionamento.

7.2. Valutazione della sedimentazione negli invasi artificiali

Il calcolo dei volumi, nel serbatoio del Comunelli, indica un notevole accumulo di sedimenti diffuso in maniera pressoché uniforme in tutto l'invaso. Infatti, su una superficie indagata di circa 32 ha, di poco inferiore alla superficie dello specchio liquido di progetto alla quota minima di regolazione (35 ha), si è evidenziato un innalzamento medio del fondale di 4,93 metri rispetto alla superficie rilevata nel 1988 che, ricordiamo, era a sua volta sollevata mediamente, rispetto al fondovalle originario, di 4,70 m. La scarsissima "erosione", data da piccole differenze di segno negativo localizzate in alcuni settori del bordo dell'invaso, è verosimilmente dovuta a piccoli fenomeni gravitativi di sponda innescati dalle variazioni del livello idrico del lago.

La differenza altimetrica rispetto alla superficie del 1988 corrisponde ad un bilancio netto di circa $1,6 \times 10^6$ metri cubi di materiale che, sommato al bilancio precedente, dà luogo ad un volume totale di interrimento, relativo all'intero periodo 1968-2004, pari a $3,78 \times 10^6$ metri cubi. Tale valore rappresenta circa la metà della capacità utile dell'invaso, ben oltre il volume di interrimento stimato da progetto.

A tale volume corrisponde un tasso di sedimentazione medio di 105.000 m^3 l'anno. È interessante notare che il tasso medio relativo al primo periodo 1968-88 ($109.000 \text{ m}^3/\text{anno}$) è di poco superiore rispetto a quello relativo al periodo 1988-2004 ($100.000 \text{ m}^3/\text{anno}$). Ciò può essere in parte spiegato con l'effetto di attenuazione dell'interrimento, dovuto alla messa in opera di una vasca di sedimentazione in coda all'invaso negli anni '80, ma soprattutto col fatto che il rilievo del 2004 non si è potuto spingere oltre una certa quota, come già detto.

Adoperando un peso-volume secco (γ_d) pari a $1,067 \text{ t/m}^3$, determinato sul campione medio di sedimento prelevato nell'invaso [52], il tasso di sedimentazione scaturito dalle misure, si traduce in un apporto solido proveniente dal bacino idrografico a monte pari ad almeno circa $1330 \text{ t/km}^2/\text{anno}$.

Tale valore attesta l'elevata erodibilità dei litotipi affioranti nel bacino idrografico che alimenta l'invaso nonché l'intensità dei processi erosivi idrometeorici, da mettere in relazione anche con le diffuse lavorazioni agrarie e la scarsa copertura vegetale.

Tabella III - Classificazione media granulometrica e mineralogica dei campioni di suolo

| Id | CLASSIFICAZIONE SECONDO USDA | | | | Classif. FAO | COMPOSIZIONE MINERALOGICA |
|----|------------------------------|------------|---------------|-------------------------|--------------|--|
| | SABBIA > 50 µ | SILT < 2 µ | ARGILLA < 2 µ | Classi Tessiture | | |
| 1 | 15 | 66 | 19 | FRANCO LIMOSA | M | Calcite, quarzo, gesso, minerali argillosi |
| 2 | 13 | 56 | 31 | FRANCO LIMOSO ARGILLOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio), minerali argillosi |
| 3 | 70 | 25 | 6 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati |
| 4 | 80 | 16 | 4 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati (microclino), plagioclasti |
| 5 | 84 | 12 | 4 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati |
| 6 | 89 | 8 | 3 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati (ortoclasio), plagioclasti (albite) |
| 7 | 63 | 25 | 12 | FRANCO SABBIOSA | M | Quarzo, calcite, K-feldspati (ortoclasio), plagioclasti (albite) |
| 8 | 4 | 44 | 52 | ARGILLOSO LIMOSA | F | Quarzo, calcite, K-feldspati (ortoclasio), minerali argillosi, plagioclasti (albite) |
| 9 | 76 | 17 | 7 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio), microclino, plagioclasti (albite), calcite |
| 10 | 78 | 14 | 8 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio), microclino, plagioclasti (albite), calcite |
| 11 | 20 | 53 | 27 | FRANCO LIMOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), minerali argillosi |
| 12 | 23 | 45 | 32 | FRANCO ARGILLOSA | M | Calcite, quarzo, plagioclasti (albite) |
| 13 | 31 | 38 | 30 | FRANCO ARGILLOSA | M | Calcite, quarzo, plagioclasti (albite) |
| 14 | 31 | 39 | 30 | FRANCO ARGILLOSA | M | Calcite, quarzo, plagioclasti (albite), minerali argillosi |
| 15 | 7 | 43 | 49 | ARGILLOSO LIMOSA | F | Calcite, quarzo, plagioclasti (albite) |
| 16 | 55 | 27 | 17 | FRANCO SABBIOSA | M | Calcite, quarzo, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio) |
| 17 | 28 | 44 | 28 | FRANCO SABBIOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio) |
| 18 | 29 | 48 | 23 | FRANCA | M | Quarzo, calcite, K-feldspati, plagioclasti |
| 19 | 35 | 39 | 26 | FRANCA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite) |
| 20 | 49 | 38 | 12 | FRANCA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite) |
| 21 | 41 | 41 | 19 | FRANCA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio) |
| 22 | 22 | 46 | 32 | FRANCO ARGILLOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), K-feldspati (ortoclasio) |
| 23 | 28 | 48 | 23 | FRANCO LIMOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite) |
| 24 | 18 | 47 | 35 | FRANCO LIMOSO ARGILLOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), minerali argillosi |
| 25 | 24 | 46 | 30 | FRANCO ARGILLOSA | M | Calcite, quarzo |
| 26 | 65 | 25 | 10 | FRANCO SABBIOSA | C | Calcite, quarzo |
| 27 | 15 | 57 | 27 | FRANCO LIMOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti (albite), minerali argillosi |
| 28 | 9 | 58 | 34 | FRANCO LIMOSO ARGILLOSA | M | Calcite, quarzo |
| 29 | 81 | 14 | 5 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati, plagioclasti |
| 30 | 77 | 17 | 6 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati, plagioclasti |
| 31 | 55 | 32 | 13 | FRANCO SABBIOSA | M | Quarzo, calcite, plagioclasti, K-feldspati, minerali argillosi, dolomite |
| 32 | 81 | 11 | 8 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti, dolomite, minerali argillosi |
| 33 | 83 | 9 | 8 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati, plagioclasti |
| 34 | 87 | 6 | 7 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati, plagioclasti |
| 35 | 4 | 34 | 62 | ARGILLOSA | F | Quarzo, K-feldspati, plagioclasti, calcite, minerali argillosi |
| 36 | 68 | 21 | 11 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, calcite, gesso, K-feldspati, plagioclasti, minerali argillosi |
| 37 | 66 | 21 | 13 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, calcite, K-feldspati |
| 38 | 85 | 8 | 7 | SABBIOSO FRANCA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti |
| 39 | 65 | 24 | 11 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, K-feldspati, calcite, plagioclasti |
| 40 | 77 | 13 | 10 | FRANCO SABBIOSA | C | Quarzo, calcite, plagioclasti, K-feldspati |
| 41 | 13 | 40 | 48 | ARGILLOSA | F | Quarzo, K-feldspati, calcite |
| 42 | 1 | 44 | 47 | ARGILLOSO LIMOSA | F | Quarzo, calcite, plagioclasti, dolomite, plagioclasti, minerali argillosi |
| 43 | 9 | 42 | 41 | ARGILLOSO LIMOSA | F | Quarzo, calcite, plagioclasti, minerali argillosi |
| 44 | 5 | 42 | 53 | ARGILLOSO LIMOSA | F | Quarzo, calcite, gesso, K-feldspati, plagioclasti, minerali argillosi |

Per quanto riguarda il secondo serbatoio preso in esame, quello di S. Rosalia, la situazione è risultata completamente diversa, sia riguardo all'entità dell'interrimento che alla distribuzione dei sedimenti entro l'invaso.

Il computo dei volumi derivante dalla differenza altimetrica delle superfici di riferimento indica un volume di sedimentazione netto, relativo al periodo 1981-2004, di $0,219 \times 10^6 \text{ m}^3$ pari a meno del 13% del volume destinato da progetto all'interrimento, con una distribuzione disomogenea dei sedimenti all'interno dell'invaso.

Gli accumuli sedimentari appaiono infatti fortemente influenzati dagli apporti fluviali: l'accumulo più cospicuo ricalca l'andamento del vecchio alveo del fiume Irminio, mentre altri depositi si rinvergono in corrispondenza delle due principali confluenze, entrambe ubicate sulla sponda destra dell'invaso. A ridosso della diga non si apprezza un accumulo significativo, contrariamente allo schema teorico che prevede il massimo spessore, dato dai sedimenti di granulometria fine, proprio nella porzione finale dell'invaso, per effetto delle correnti di torbida che si formano all'interno del corpo d'acqua.

Il corrispondente deflusso torbido unitario medio annuo, attribuibile al fiume Irminio e relativamente alla porzione di bacino sottesa dall'invaso, assumerebbe un valore pari a circa $107 \text{ t/km}^2/\text{anno}$.

A differenza del Comunelli, il volume negativo (Fill Volume), che rivela erosione o perdita di materiale, risultante in alcuni punti dell'originario fondovalle alluvionale del fiume Irminio, per la presenza della superficie "antica" a quote superiori rispetto a quella attuale del fondale, assume qui un valore significativo, pari a circa $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Ciò trova una spiegazione nel fatto che l'originario profilo topografico ha subito alterazioni dovute ai movimenti di terra effettuati durante la costruzione della diga, testimoniati sia dal personale operante presso la diga che dalle immagini fotografiche, documentanti le fasi dei lavori, messe a disposizione del pubblico sul sito web (<http://www.digasantarosalia.it>).

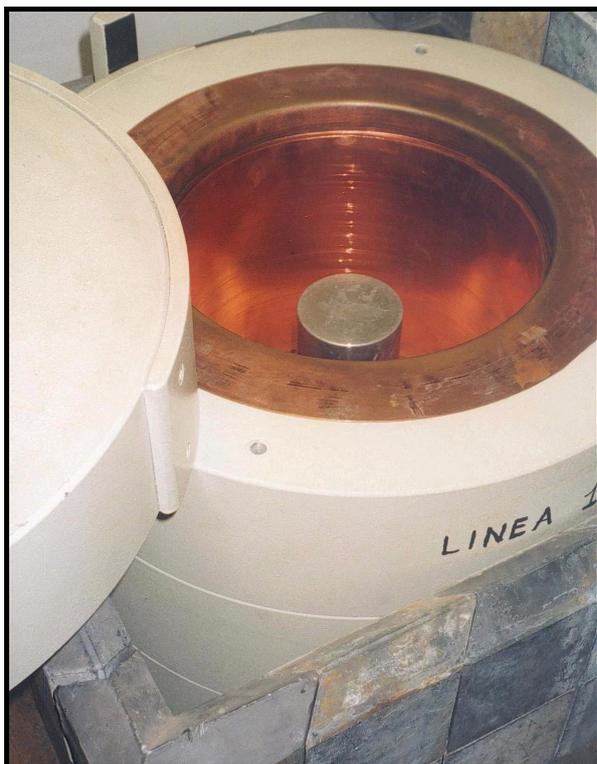
I dati volumetrici relativi ai materiali impiegati nel corpo-diga, dettagliatamente documentati, rendono conto di un quantitativo di materiale alluvionale, prelevato direttamente in alveo ed utilizzato per i rinfilanchi di monte e di valle della diga, di entità pari a $2/3$ del volume negativo risultante. Inoltre, la realizzazione dello scarico di superficie ha comportato una profonda modifica del profilo del versante alle spalle della casa di guardia, con uno sbancamento di notevole entità, valutabile in almeno $300.000-400.000 \text{ m}^3$. Tale riscontro ci permette di affermare che, seppure le modifiche altimetriche non siano documentate cartograficamente e con la precisione richiesta, il bilancio di sedimentazione qui definito sia sufficientemente attendibile.

Non si hanno dati storici e notizie precise circa l'andamento delle portate del fiume Irminio, tuttavia, dalla valutazione dell'interrimento e dalle altre considerazioni svolte nella descrizione del bacino idrografico, emerge un quadro, relativamente alla dinamica esogena, certamente diverso rispetto a quello descritto per il Comunelli e caratterizzato quanto meno dall'assenza di spiccati eventi erosivi e comunque dalla diversa risposta del substrato geolitologico, meno vulnerabile all'erosione e al dissesto.

7.3. Misure in spettrometria γ e valutazione dell'erosione

La strumentazione utilizzata consiste di 3 rivelatori HPGe coassiali di tipo p con efficienze relative del 10, 20 e 30% rispettivamente, chiamati nell'ordine Bikini, Apache e Cuba. La Figura 26 mostra Bikini visto dall'alto e aperto.

Figura 26 - Il rivelatore Bikini visto dall'alto e aperto



Per l'acquisizione e l'elaborazione degli spettri gamma è stato utilizzato il software GammaVision (versione 5.10) della ditta EG&G Ortec. I tempi di acquisizione dati sono stati mediamente di 80.000 secondi.

Complessivamente sono stati analizzati 253 campioni di suolo facenti parti delle 44 carote prelevate durante le due campagne di raccolta campioni. Le carote sono state suddivise in situ ad intervalli di 5 cm di profondità, ottenendo un numero variabile di sub-campioni relativi a ciascuna carota. Un'aliquota di circa 100 grammi di ogni sub-campione è stata utilizzata per la determinazione dell'attività del ^{137}Cs con la tecnica d'indagine della spettrometria gamma. Non in tutti i campioni è stata raggiunta la stessa profondità e in alcuni casi il contenuto in ^{137}Cs non è stato rilevabile. In alcuni casi si è reso necessario cumulare due livelli del profilo al fine di riuscire ad effettuare la misura. I risultati delle analisi sono riportati in Tabella IV, mentre in Figura 27 è mostrata la mappa della distribuzione del ^{137}Cs all'interno del bacino del Comunelli, ottenuta mediante interpolazione dei dati puntuali.

Figura 27 – Carta della distribuzione del ^{137}Cs nel bacino del torrente Comunelli

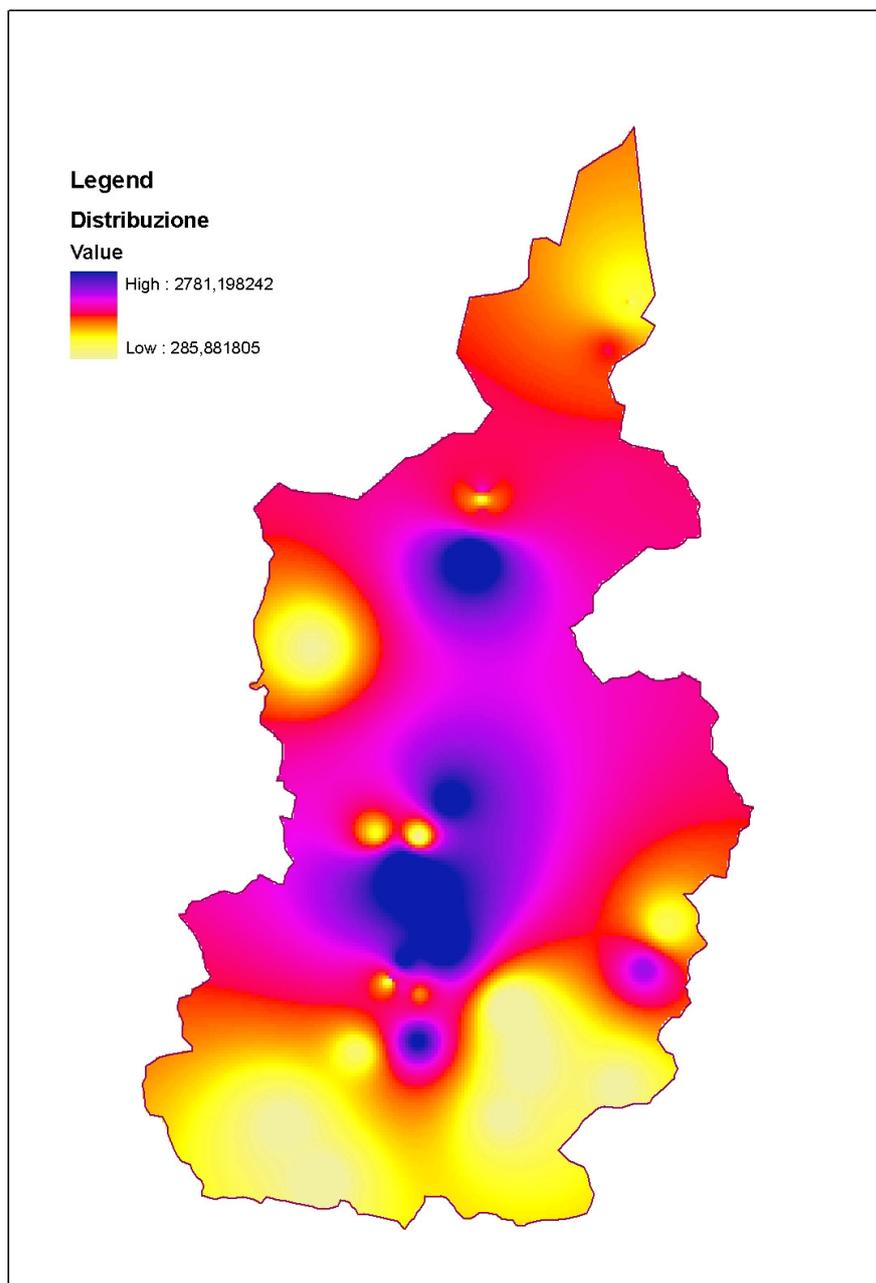


Tabella IV - Risultati analisi in spettrometria gamma (^{137}Cs)

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 1 | 0-5 | CN21-1 | 4,9 ± 0,6 | 200 ± 30 |
| | 5-10 | AN21-2 | 2,9 ± 0,5 | 140 ± 30 |
| | 10-15 | CN21-3 | 1,3 ± 0,5 | 100 ± 30 |
| | 15-20 | BN21-4 | 0,3 ± 0,6 | 20 ± 40 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 460 ± 60 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 3 | 0-5 | CN31-1 | 12,4 ± 1,0 | 460 ± 40 |
| | 5-10 | CN31-1 | 12,4 ± 0,9 | 690 ± 50 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 1150 ± 60 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 5 | 0-5 | CN20-1 | 7,7 ± 0,7 | 270 ± 30 |
| | 5-10 | BN20-2 | 10,2 ± 1,2 | 680 ± 80 |
| | 10-15 | CN20-3 | 7,8 ± 0,8 | 630 ± 70 |
| | 15-20 | CN20-4 | 3,4 ± 0,5 | 250 ± 40 |
| | 20-25 | AN20-5 | 1,0 ± 0,5 | 90 ± 40 |
| | 25-30 | BN20-6 | 0,3 ± 0,4 | 40 ± 50 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 1970 ± 130 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 7 | 0-5 | AN3-1 | 2,1 ± 0,8 | 100 ± 40 |
| | 5-10 | CN3-2 | 2,1 ± 0,3 | 140 ± 20 |
| | 10-15 | CN3-3 | 2,5 ± 0,6 | 270 ± 60 |
| | 15-20 | BN3-4 | 1,4 ± 0,6 | 130 ± 50 |
| | 20-25 | AN3-5 | nr | nr |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 640 ± 90 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 2 | 0-5 | CN13-1 | 3,3 ± 0,6 | 150 ± 30 |
| | 5-10 | CN13-2 | 3,3 ± 0,5 | 190 ± 30 |
| | 10-15 | CN13-3 | 3,7 ± 0,5 | 210 ± 30 |
| | 15-20 | BN13-4 | 4,0 ± 0,8 | 230 ± 50 |
| | 20-25 | AN13-5 | 3,9 ± 0,5 | 300 ± 40 |
| | 25-30 | AN13-6 | 3,8 ± 0,4 | 220 ± 30 |
| | 30-35 | CN13-7 | 2,4 ± 0,8 | 170 ± 60 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 1450 ± 100 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 4 | 0-5 | CN27-1 | 8,6 ± 0,8 | 490 ± 50 |
| | 5-10 | AN27-2 | 8,0 ± 0,7 | 620 ± 50 |
| | 10-15 | CN27-3 | 10,4 ± 1,0 | 720 ± 70 |
| | 15-20 | AN27-4 | 6,8 ± 0,4 | 500 ± 30 |
| | 20-25 | AN27-5 | 1,2 ± 0,5 | 90 ± 40 |
| | 25-30 | CN27-6 | 0,9 ± 0,5 | 80 ± 40 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 2510 ± 120 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 6 | 0-5 | AN35-1 | 7,1 ± 0,4 | 560 ± 30 |
| | 5-10 | CN35-2 | 6,3 ± 0,8 | 450 ± 50 |
| | 10-15 | CN35-3 | 6,8 ± 0,9 | 550 ± 70 |
| | 15-20 | CN35-4 | 3,1 ± 0,4 | 220 ± 30 |
| | 20-25 | CN35-5 | 0,1 ± 0,2 | 7 ± 12 |
| <i>VALORE TOTALE (Bq/m²)</i> 1770 ± 100 | | | | |

segue →

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 8 | 0-5 | CN19-1 | 1,8 ± 0,5 | 80 ± 20 |
| | 5-10 | CN19-2 | 2,4 ± 0,3 | 126 ± 15 |
| | 10-15 | AN19-3 | 2,3 ± 0,5 | 130 ± 30 |
| | 15-20 | BN19-4 | 2,1 ± 0,5 | 120 ± 30 |
| | 20-25 | BN19-5 | 0,5 ± 1,0 | 30 ± 50 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 480 ± 70 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 10 | 0-5 | AN12-1 | 3,6 ± 0,5 | 190 ± 20 |
| | 5-10 | CN12-2 | 3,3 ± 0,6 | 220 ± 40 |
| | 10-15 | CN12-3 | 1,9 ± 0,4 | 140 ± 30 |
| | 15-20 | BN12-4 | 0,3 ± 0,3 | 30 ± 20 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 580 ± 60 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 12 | 0-10 | CN23-1 | 1,3 ± 0,3 | 140 ± 40 |
| | 10-15 | AN23-2 | 1,1 ± 0,2 | 67 ± 15 |
| | 15-20 | AN23-3 | 1,4 ± 0,5 | 120 ± 40 |
| | 20-25 | AN23-4 | 1,5 ± 0,7 | 100 ± 50 |
| | 25-30 | AN23-5 | 1,2 ± 0,3 | 90 ± 20 |
| | 30-35 | BN23-6 | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 510 ± 80 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 14 | 0-5 | CN5-1 | 3,5 ± 0,7 | 240 ± 50 |
| | 5-10 | CN5-2 | 3,4 ± 0,4 | 250 ± 30 |
| | 10-15 | CN5-3 | 3,6 ± 0,8 | 310 ± 70 |
| | 15-20 | AN5-4 | 3,8 ± 0,5 | 280 ± 40 |
| | 20-25 | CN5-5 | 3,5 ± 0,6 | 270 ± 50 |
| | 25-30 | CN5-6 | 3,3 ± 0,5 | 250 ± 40 |
| | 30-35 | BN5-7 | 4,0 ± 1,0 | 270 ± 70 |
| | 35-40 | CN5-8 | 4,0 ± 0,6 | 320 ± 50 |
| | 40-45 | BN5-9 | 3,6 ± 0,5 | 190 ± 30 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 2380 ± 140 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 9 | 0-5 | AN11-1 | 14,4 ± 0,9 | 820 ± 50 |
| | 5-10 | CN11-2 | 7,1 ± 1,5 | 380 ± 80 |
| | 10-15 | CN11-3 | 2,4 ± 0,6 | 170 ± 40 |
| | 15-20 | CN11-4 | 0,3 ± 0,4 | 20 ± 30 |
| | 20-25 | BN11-5 | 0,4 ± 0,5 | 40 ± 40 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1420 ± 120 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 11 | 0-5 | CN15-1 | 1,0 ± 0,5 | 50 ± 30 |
| | 5-10 | CN15-2 | 1,1 ± 0,2 | 72 ± 15 |
| | 10-15 | CN15-3 | 1,1 ± 0,4 | 100 ± 30 |
| | 15-20 | BN15-4 | 2,1 ± 0,6 | 180 ± 50 |
| | 20-25 | AN15-5 | 0,1 ± 0,2 | 10 ± 20 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 410 ± 70 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 13 | 0-5 | AN1-1 | 6,6 ± 1,5 | 280 ± 60 |
| | 5-10 | CN1-2 | 8,4 ± 1,2 | 690 ± 100 |
| | 10-15 | CN1-3 | 7,6 ± 0,8 | 490 ± 50 |
| | 15-20 | CN1-4 | 5,7 ± 0,7 | 440 ± 60 |
| | 20-25 | CN1-5 | 1,9 ± 0,5 | 20 ± 40 |
| | 25-30 | CN1-6 | 0,3 ± 0,4 | 30 ± 30 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 2070 ± 150 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 15 | 0-5 | CN14-1 | 2,2 ± 1,1 | 140 ± 70 |
| | 5-10 | BN14-2 | 2,6 ± 0,8 | 150 ± 40 |
| | 10-15 | CN14-3 | 2,7 ± 0,5 | 170 ± 30 |
| | 15-20 | BN14-4 | 1,9 ± 0,7 | 150 ± 50 |
| | 20-25 | BN14-5 | 1,4 ± 0,4 | 90 ± 30 |
| | 25-30 | BN14-6 | 1,9 ± 0,7 | 160 ± 60 |
| | 30-35 | CN14-7 | 1,9 ± 0,4 | 160 ± 40 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 1020 ± 130 | | | |

segue→

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 16 | 0-5 | AN4-1 | 1,6 ± 0,5 | 140 ± 40 |
| | 5-10 | CN4-2 | 1,7 ± 0,3 | 120 ± 20 |
| | 10-15 | BN4-3 | 2,0 ± 0,7 | 150 ± 50 |
| | 15-20 | AN4-4 | 2,3 ± 0,5 | 200 ± 50 |
| | 20-25 | AN4-5 | 1,9 ± 0,6 | 150 ± 50 |
| | 25-30 | AN4-6 | 2,3 ± 0,5 | 180 ± 40 |
| | 30-35 | CN4-7 | 1,1 ± 0,4 | 100 ± 40 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1050 ± 110 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 18 | 0-10 | CN28-1 | 1,7 ± 0,4 | 240 ± 60 |
| | 10-15 | AN28-2 | 0,5 ± 0,5 | 40 ± 40 |
| | 15-20 | BN28-3 | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 280 ± 70 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 20 | 0-5 | CN25-1 | 0,4 ± 0,3 | 30 ± 30 |
| | 5-10 | BN25-2 | 0,1 ± 0,5 | 10 ± 30 |
| | 1015 | BN25-3 | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 40 ± 40 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 22 | 0-5 | CN9-1 | 1,7 ± 0,4 | 110 ± 30 |
| | 5-10 | CN9-2 | 2,2 ± 0,5 | 130 ± 30 |
| | 10-15 | CN9-3 | 2,4 ± 0,7 | 160 ± 50 |
| | 15-20 | AN9-4 | 1,6 ± 0,4 | 130 ± 30 |
| | 20-25 | BN9-5 | 1,9 ± 0,6 | 160 ± 50 |
| | 25-30 | BN9-6 | 2,6 ± 0,5 | 220 ± 40 |
| | 30-35 | BN9-7 | 2,5 ± 1,1 | 200 ± 90 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 1110 ± 130 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 17 | 0-10 | CN10-1 | 2,3 ± 0,5 | 300 ± 70 |
| | 10-15 | CN10-2 | 2,5 ± 0,5 | 180 ± 40 |
| | 15-20 | BN10-3 | 4,0 ± 0,4 | 360 ± 40 |
| | 20-25 | BN10-4 | 3,2 ± 0,7 | 210 ± 50 |
| | 25-30 | BN10-5 | 2,2 ± 1,0 | 220 ± 100 |
| | 30-35 | CN10-6 | 4,2 ± 0,4 | 330 ± 30 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1590 ± 140 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 19 | 0-10 | CN26-1 | 1,1 ± 0,4 | 150 ± 50 |
| | 10-15 | AN26-2 | 0,6 ± 0,2 | 45 ± 15 |
| | 15-20 | AN26-3 | 0,1 ± 0,4 | 5 ± 30 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 200 ± 60 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 21 | 0-10 | CN36-1 | 1,5 ± 0,4 | 190 ± 50 |
| | 10-15 | CN36-2 | 0,5 ± 0,4 | 30 ± 30 |
| | 15-20 | AN36-3 | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 220 ± 60 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 23 | 0-10 | CN8-1 | 4,3 ± 0,6 | 500 ± 80 |
| | 10-15 | CN8-2 | 3,7 ± 0,8 | 160 ± 40 |
| | 15-20 | BN8-3 | 5,3 ± 0,9 | 430 ± 70 |
| | 20-25 | AN8-4 | 7,6 ± 0,4 | 620 ± 40 |
| | 25-30 | BN8-5 | 7,9 ± 1,1 | 550 ± 80 |
| | 30-35 | CN8-6 | 7,8 ± 1,2 | 640 ± 100 |
| | 35-40 | CN8-7 | 2,5 ± 0,4 | 190 ± 30 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 3090 ± 170 | | | | |

segue→

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 24 | 0-5 | CN7-1 | 0,8 ± 0,4 | 60 ± 30 |
| | 5-10 | AN5-2 | 0,8 ± 0,4 | 50 ± 30 |
| | 10-15 | CN7-3 | 1,2 ± 0,3 | 77 ± 18 |
| | 15-20 | BN7-4 | 1,1 ± 0,6 | 90 ± 50 |
| | 25-30 | BN7-5 | 1,0 ± 0,8 | 70 ± 50 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 340 ± 90 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 25 | 0-10 | CN24-1 | 3,9 ± 0,4 | 440 ± 50 |
| | 10-15 | AN24-2 | 3,4 ± 0,6 | 330 ± 50 |
| | 15-20 | BN24-3 | 2,3 ± 0,4 | 340 ± 50 |
| | 20-25 | CN24-4 | 5,4 ± 0,9 | 400 ± 70 |
| | 25-30 | BN24-5 | 0,7 ± 0,2 | 100 ± 30 |
| | 30-35 | CN24-6 | 0,4 ± 0,4 | 30 ± 30 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1350 ± 100 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 26 | 0-5 | BN27A-N | 2,4 ± 0,7 | 180 ± 50 |
| | 5-10 | AN27B-N | 2,6 ± 0,5 | 200 ± 40 |
| | 10-15 | CN27C-N | 2,5 ± 0,5 | 210 ± 40 |
| | 15-20 | BN27D-N | 3,5 ± 0,8 | 310 ± 70 |
| | 20-25 | BN27E-N | 0,5 ± 0,5 | 35 ± 35 |
| | 25-30 | VN27F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 930 ± 110 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 27 | 0-5 | BN28A-N | 2,5 ± 0,4 | 180 ± 30 |
| | 5-10 | AN28B-N | 2,8 ± 0,3 | 210 ± 20 |
| | 10-15 | CN28C-N | 3,0 ± 0,3 | 260 ± 30 |
| | 15-20 | VN28D-N | nr | nr |
| | 20-25 | VN28E-N | nr | nr |
| | 25-30 | VN28F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 640 ± 50 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 28 | 0-5 | BN29A-N | 1,5 ± 0,6 | 80 ± 30 |
| | 5-10 | AN29B-N | 1,0 ± 0,5 | 70 ± 30 |
| | 10-15 | CN29C-N | 0,9 ± 0,4 | 70 ± 30 |
| | 15-20 | AN29D-N | 0,9 ± 0,2 | 80 ± 20 |
| | 20-25 | BN29E-N | 1,6 ± 0,6 | 120 ± 50 |
| | 25-30 | VN29F-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 420 ± 80 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 29 | 0-5 | BN30A-N | 13,3 ± 1,6 | 890 ± 110 |
| | 5-10 | AN30B-N | 8,0 ± 0,8 | 590 ± 60 |
| | 10-15 | CN30C-N | 2,5 ± 0,5 | 175 ± 35 |
| | 15-20 | CN30D-N | 1,5 ± 0,2 | 118 ± 18 |
| | 20-25 | AN30E-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1770 ± 130 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) | |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|--|
| N. 30 | 0-5 | BN31A-N | 3,1 ± 0,8 | 200 ± 50 | |
| | 5-10 | AN31B-N | 2,0 ± 0,6 | 165 ± 45 | |
| | 10-15 | CN31C-N | 1,0 ± 0,5 | 80 ± 40 | |
| | 15-20 | AN31D-N | 1,4 ± 0,3 | 120 ± 20 | |
| | 20-25 | CN31E-N | 3,7 ± 0,4 | 299 ± 30 | |
| | 25-30 | AN31F-N | 2,6 ± 0,5 | 220 ± 40 | |
| | 30-35 | VN31H-N | 4,1 ± 2,4 | 340 ± 200 | |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 1430 ± 220 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 31 | 0-5 | BN32A-N | 3,0 ± 0,7 | 150 ± 40 |
| | 5-10 | AN32B-N | 2,0 ± 0,5 | 120 ± 30 |
| | 10-15 | CN32C-N | 1,3 ± 0,4 | 90 ± 20 |
| | 15-20 | BN32D-N | 0,6 ± 0,6 | 40 ± 40 |
| | 20-25 | AN32E-N | 6,2 ± 0,5 | 500 ± 45 |
| | 25-30 | CN32F-N | 10,2 ± 0,9 | 840 ± 80 |
| | 30-35 | VN32G-N | 4,7 ± 1,7 | 400 ± 140 |
| | 35-40 | VN32H-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 2140 ± 180 | | | |

segue →

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 32 | 0-5 | BN33A-N | 8,5 ± 1,1 | 620 ± 80 |
| | 5-10 | AN33B-N | 10,0 ± 0,8 | 830 ± 70 |
| | 10-15 | CN33C-N | 9,2 ± 0,9 | 760 ± 70 |
| | 15-20 | CN33D-N | 7,8 ± 0,6 | 670 ± 50 |
| | 20-25 | CN33E-N | 2,0 ± 0,4 | 170 ± 30 |
| | 25-30 | CN33F-N | 1,2 ± 0,3 | 100 ± 30 |
| | 30-35 | BN33G-N | 0,7 ± 0,5 | 70 ± 50 |
| | 35-40 | CN33H-N | 2,1 ± 0,6 | 230 ± 60 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 3450 ± 160 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 33 | 0-5 | BN34A-N | 6,2 ± 1,0 | 360 ± 60 |
| | 5-10 | AN34B-N | 7,1 ± 0,7 | 630 ± 60 |
| | 10-15 | CN34C-N | 5,4 ± 0,6 | 440 ± 50 |
| | 15-20 | AN34D-N | 0,8 ± 0,5 | 70 ± 40 |
| | 20-25 | BN34E-N | 0,3 ± 0,3 | 30 ± 20 |
| | 25-30 | VN34F-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 1520 ± 110 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|---|------------|---------------------------|--|
| N. 34 | 0-5 | BN35A-N | 9,9 ± 1,4 | 500 ± 70 |
| | 5-10 | AN35B-N | 9,4 ± 0,9 | 710 ± 70 |
| | 10-15 | CN35C-N | 7,9 ± 0,8 | 650 ± 70 |
| | 15-20 | CN35D-N | 4,8 ± 0,7 | 400 ± 60 |
| | 20-25 | CN35E-N | 0,7 ± 0,3 | 60 ± 30 |
| | 25-30 | CN35F-N | 0,2 ± 0,3 | 20 ± 30 |
| | 30-35 | VN35G-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 2330 ± 130 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|--|------------|---------------------------|--|
| N. 35 | 0-5 | BN36A-N | 2,1 ± 0,7 | 60 ± 20 |
| | 5-10 | AN36B-N | 2,2 ± 0,5 | 140 ± 30 |
| | 10-15 | CN36C-N | 1,6 ± 0,4 | 110 ± 30 |
| | 15-20 | BN36D-N | 1,8 ± 1,1 | 120 ± 80 |
| | 20-25 | AN36E-N | 1,0 ± 0,5 | 60 ± 30 |
| | 25-30 | CN36F-N | 0,8 ± 0,4 | 60 ± 30 |
| | 30-35 | VN36G-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 560 ± 100 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|--|------------|---------------------------|--|
| N. 36 | 0-5 | BN20A-N | 2,6 ± 0,5 | 170 ± 30 |
| | 5-10 | CN20B-N | 2,8 ± 0,5 | 220 ± 40 |
| | 10-15 | CN20C-N | 3,5 ± 0,5 | 270 ± 40 |
| | 15-20 | AN20D-N | 4,3 ± 0,5 | 380 ± 50 |
| | 20-25 | AN20E-N | 2,5 ± 0,5 | 210 ± 40 |
| | 25-30 | CN20F-N | nr | nr |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 1230 ± 90 | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ^{137}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/m ²) |
|---------------|--|------------|---------------------------|--|
| N. 37 | 0-5 | BN19A-N | 3,2 ± 0,8 | 220 ± 50 |
| | 5-10 | AN19B-N | 2,9 ± 0,5 | 220 ± 40 |
| | 10-15 | BN19C-N | 3,0 ± 0,6 | 230 ± 50 |
| | 15-20 | CN19D-N | 2,0 ± 0,4 | 160 ± 30 |
| | 20-25 | BN19E-N | 0,8 ± 0,5 | 76 ± 45 |
| | 25-30 | CN19F-N | 0,1 ± 0,2 | 10 ± 20 |
| | VALORE TOTALE (Bq/m²) 920 ± 100 | | | |

segue→

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 38 | 0-5 | CN21A-N | 3,1 ± 0,5 | 200 ± 30 |
| | 5-10 | BN21B-N | 2,4 ± 0,7 | 180 ± 50 |
| | 10-15 | CN21A-N | 2,0 ± 0,4 | 180 ± 40 |
| | 15-20 | BN21D-N | 4,0 ± 0,7 | 320 ± 60 |
| | 20-25 | CN21E-N | 5,6 ± 0,6 | 510 ± 60 |
| | 25-30 | CN21F-N | 0,4 ± 0,2 | 40 ± 10 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1420 ± 110 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 40 | 0-5 | AN23A-N | 17,7 ± 1,6 | 1140 ± 100 |
| | 5-10 | CN23BN | 15,4 ± 1,6 | 1280 ± 130 |
| | 10-15 | BN23CN | 5,3 ± 0,9 | 450 ± 70 |
| | 15-20 | AN23DN | 3,4 ± 0,5 | 300 ± 50 |
| | 20-25 | CN23EN | 3,1 ± 0,5 | 280 ± 40 |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 3440 ± 190 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 42 | 0-5 | BN25A-N | 4,4 ± 0,6 | 180 ± 20 |
| | 5-10 | AN25B-N | 3,7 ± 0,3 | 250 ± 20 |
| | 10-15 | CN25C-N | 3,8 ± 0,4 | 300 ± 30 |
| | 15-20 | BN25D-N | 3,6 ± 0,5 | 330 ± 45 |
| | 20-25 | BN25E-N | 0,6 ± 0,6 | 50 ± 50 |
| | 25-30 | VN25F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 1100 ± 80 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 44 | 0-5 | BN37A-N | 2,1 ± 0,8 | 90 ± 30 |
| | 5-10 | AN37B-N | 1,9 ± 0,6 | 120 ± 40 |
| | 10-15 | CN37C-N | 1,9 ± 0,5 | 140 ± 30 |
| | 15-20 | BN37D-N | 2,1 ± 0,7 | 150 ± 50 |
| | 20-25 | VN37E-N | nr | nr |
| | 25-30 | VN37F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 500 ± 80 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 39 | 0-5 | BN22A-N | 0,7 ± 0,5 | 40 ± 30 |
| | 5-10 | AN22B-N | 0,8 ± 0,5 | 50 ± 30 |
| | 10-15 | CN22C-N | 1,0 ± 0,4 | 50 ± 20 |
| | 15-20 | AN22D-N | 1,0 ± 0,6 | 120 ± 80 |
| | 20-25 | CN22E-N | 0,8 ± 0,3 | 80 ± 30 |
| | 25-30 | CN22F-N | 0,8 ± 0,3 | 70 ± 30 |
| | 30-35 | VN22G-N | nr | nr |
| | 35-40 | VN22H-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 410 ± 100 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|---|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 41 | 0-5 | BN24A-N | 2,5 ± 0,7 | 110 ± 30 |
| | 5-10 | AN24B-N | 2,1 ± 0,5 | 125 ± 30 |
| | 10-15 | CN24C-N | 2,0 ± 0,5 | 160 ± 40 |
| | 15-20 | CN24D-N | 0,7 ± 0,3 | 50 ± 30 |
| | 20-25 | VN24E-N | nr | nr |
| | 25-30 | VN24F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 450 ± 60 | | | | |

| Nome Campione | Prof. (cm) | Sigla Lab. | ¹³⁷ Cs (Bq/kg) | ¹³⁷ Cs (Bq/m ²) |
|--|------------|------------|---------------------------|--|
| N. 43 | 0-5 | BN26A-N | 3,7 ± 0,5 | 160 ± 20 |
| | 5-10 | AN26B-N | 2,1 ± 0,6 | 120 ± 30 |
| | 10-15 | CN26C-N | 2,4 ± 0,5 | 190 ± 40 |
| | 15-20 | BN26D-N | 2,9 ± 0,7 | 220 ± 50 |
| | 20-25 | BN26E-N | 3,3 ± 0,7 | 280 ± 60 |
| | 25-30 | VN26F-N | nr | nr |
| VALORE TOTALE (Bq/m²) 970 ± 100 | | | | |

nr = attività non rilevabile, al di sotto della soglia strumentale

La valutazione dell'erosione areale col metodo del ^{137}Cs presuppone la conoscenza del valore di riferimento locale cioè dell'input totale del fallout nell'area di studio, dal tempo della prima ricaduta, anno 1953, ad oggi. La sua determinazione, in mancanza di dati diretti, avviene attraverso l'individuazione di un sito di riferimento e la misura del suo contenuto di cesio. La scelta del sito di riferimento, come descritto nel paragrafo 3.1.1, rappresenta un punto cruciale per la corretta applicazione della metodologia e molto spesso la verifica della bontà delle sue caratteristiche necessita di una valutazione direttamente sul campo. Durante le campagne di raccolta campioni è stata individuata un'area potenzialmente idonea per costituire il sito di riferimento per il nostro studio. L'area è situata in posizione quasi centrale all'interno del bacino, su un rilievo denominato M.te S. Maria dell'Alto, a circa 450 m di quota, 1-2 km a NE dell'abitato di Butera. Si tratta di una spianata sommitale, adibita a prato/pascolo e la sua posizione, leggermente sopraelevata rispetto alla zona circostante, la rende idealmente al riparo dai fenomeni erosivi e di accumulo. Alcune delle caratteristiche ideali dei siti di riferimento, sono quindi verificate: adiacenza all'area di studio, stessa altitudine, minima pendenza e copertura a prato. Sull'uso pregresso del suolo e quindi su un eventuale rimaneggiamento dell'area non è stato possibile trarre conclusioni in assenza di informazioni attendibili. La morfologia dell'area si è invece mostrata chiaramente favorevole all'assenza di processi erosivi e/o deposizionali. Nel sito sono state prelevate complessivamente 5 carote di suolo, la n. 30 e la n. 31 a pochi metri l'una dall'altra, e la n. 32, la n. 33 e la n. 34, anch'esse a poca distanza l'una dall'altra, ma a distanza di circa 300 metri dalle due precedenti. In base alle considerazioni che verranno illustrate nel seguito, in realtà solo le carote n. 32, n. 33 e n. 34 sono state tenute in conto per la valutazione del valore radioisotopico di riferimento per il bacino. Quest'ultimo è stato determinato, come proposto in letteratura, prendendo la media dei valori dei campioni raccolti nel sito di riferimento (Tabella V). Il valore medio, pari a 2430 Bq/m^2 , costituisce quindi il valore di riferimento del bacino del Comunelli. Per la determinazione del tasso di erosione nelle zone di bacino identificate come aree indisturbate (cioè non coltivate) è stato utilizzato il modello di distribuzione del profilo descritto nel paragrafo 3.1.2 e riassunto nell'equazione 3.1.2.4.

Tabella V – Valori degli inventari del sito di riferimento

| Carota | Valore di Cs-137 (Bq/m²) |
|---|---|
| N. 32 | 3454 ± 163 |
| N. 33 | 1516 ± 106 |
| N. 34 | 2333 ± 134 |
| Valore di riferimento medio (Bq/m²): 2430 ± 80 | |

Il valore del parametro h_0 , che descrive la forma del profilo di distribuzione di un dato campione di riferimento, è stato ricavato effettuando un adattamento con i minimi quadrati alla relazione 3.1.2.3, già introdotta nel paragrafo 3.1.2, ed utilizzando come campione di riferimento il campione n. 34. Il valore di h_0 ottenuto è di 188 kg/m^2 .

Per i suoli coltivati o comunque rimaneggiati, è stato utilizzato il modello proporzionale esprimibile secondo l'equazione 3.1.2.1 e descritto in dettaglio nel paragrafo 3.1.2. Il parametro B, densità del suolo, è stato misurato sperimentalmente per ciascun campione, mentre il parametro d, profondità dello strato coltivato, è stato determinato dai profili di distribuzione del ^{137}Cs .

In Tabella VI sono riportati i valori di erosione/accumulo, espressi come $\text{t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, ottenuti per singolo punto di campionamento a partire dal valore cumulato di attività misurata lungo il profilo e rapportato al valore di riferimento. I dati sono stati raggruppati in base alla tipologia di uso del suolo (suoli coltivati e suoli non coltivati). Nella maggior parte dei casi, in entrambi i raggruppamenti, il contenuto di ^{137}Cs misurato rende conto di un tasso netto di perdita di suolo. Solo in quattro casi è risultato un valore corrispondente ad accumulo.

Come si vede, non risulta una marcata differenza tra i valori medi di perdita di suolo relativi ai due gruppi (rispettivamente: $4474 \text{ t/ km}^2/\text{anno}$ e $3885 \text{ t/ km}^2/\text{anno}$). Nel totale dei campioni esaminati, si constata una forte dispersione dei dati di erosione per cui non si ravvisa alcuna correlazione con i caratteri distintivi delle diverse unità di paesaggio corrispondenti (acclività, tessitura ed uso del suolo).

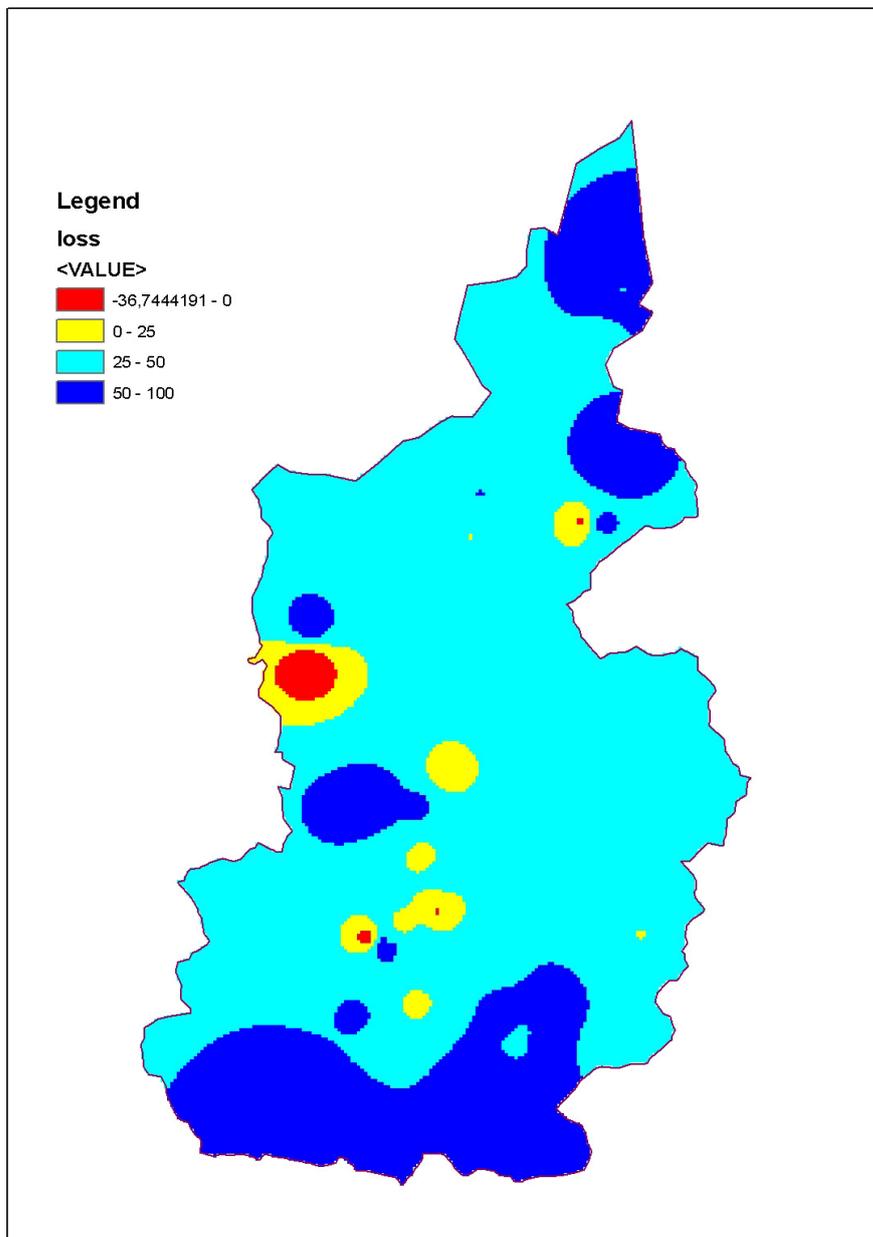
Assumendo i dati, così acquisiti, come rappresentativi dell'intera area di studio, attraverso l'interpolazione dei dati puntuali ed attribuendo un valore di perdita di suolo ad ogni cella elementare, delle dimensioni di $50 \times 50 \text{ m}$, in cui è stata suddivisa la superficie del bacino, è stato possibile elaborare la carta della perdita di suolo relativa all'intero bacino del Comunelli sotteso dall'invaso artificiale (Figura 28). Inoltre, si è potuto pervenire ad un valore complessivo, attribuibile al bacino idrografico nella sua interezza, sommando i contributi di ogni singola cella. In questo modo si è ottenuto un valore totale pari a $4191 \text{ t/ km}^2/\text{anno}$.

Tale valore non è molto diverso da quello che si otterrebbe, molto più semplicemente, calcolando il valore medio dei dati puntuali, da cui risulterebbe un tasso di erosione medio, a scala di bacino, pari a $4308 \text{ t/ km}^2/\text{anno}$.

Tabella VI – Stima del tasso di erosione sulla base del contenuto di ¹³⁷Cs: valori positivi indicano erosione, valori negativi accumulo (in corsivo sono evidenziati i casi “anomali”, cfr. testo del rapporto)

| | Id. | Acclività | Tessitura | Uso del suolo | A (t/ km ² /anno) |
|--|--------------|---------------|---------------|------------------------|---------------------------------|
| Suoli non coltivati | N. 1 | 10-20% | Fine-media | Pascolo | 7660 |
| | N. 3 | 40-80% | Media | Pascolo | 3431 |
| | N. 4 | 20-40% | Media | Pascolo | -138 |
| | N. 5 | 10-20% | Media | Pascolo | 983 |
| | N. 18 | 20-40% | Fine-media | Pascolo | 9995 |
| | N. 21 | 0-10% | Media | Pascolo | 10954 |
| | N. 29 | 40-80% | Media | Pascolo | 1457 |
| | N. 35 | 0-10% | Fine | Pascolo | 6788 |
| | N. 40 | 20-40% | Media | Pascolo | -1594 |
| | <i>N. 9</i> | <i>0-10%</i> | <i>Media</i> | <i>Colture agrarie</i> | <i>2461</i> |
| | <i>N. 13</i> | <i>0-10%</i> | <i>Fine</i> | <i>Seminative</i> | <i>739</i> |
| | | | Media: | 3885 | |
| Suoli coltivati | N. 2 | 10-20% | Fine-media | Seminative | 3283 |
| | N. 7 | 0-10% | Media | Seminative | 5496 |
| | N. 8 | 10-20% | Fine-media | Colt.agrarie | 3757 |
| | N. 11 | 10-20% | Fine | Orti-colt.part. | 5813 |
| | N. 12 | 20-40% | Media | Orti-colt.part. | 7566 |
| | N. 14 | 0-10% | Fine-media | Frutteti | -233 |
| | N. 15 | 10-20% | Fine-media | Frutteto | 5905 |
| | N. 16 | 0-10% | Fine | Frutteti | 7444 |
| | N. 17 | 0-10% | Fine-media | Colture agrarie | 4148 |
| | N. 19 | 20-40% | Fine-media | Colt.agrarie | 4543 |
| | N. 20 | 20-40% | Media | Colt.agrarie | 3357 |
| | N. 22 | 0-10% | Media | Orti-colt.part. | 6613 |
| | N. 23 | 0-10% | Fine-media | Orti-colt.part. | -3696 |
| | N. 24 | 0-10% | Fine | Orti-colt.part. | 6660 |
| | N. 25 | 20-40% | Fine-media | Orti-colt.part. | 2485 |
| | N. 26 | 20-40% | Fine-media | Oliveto | 4734 |
| | N. 27 | 0-10% | Fine-media | Colt-semin | 4185 |
| | N. 28 | 20-40% | Fine-media | Colt-semin | 7238 |
| | N. 36 | 10-20% | Media | Colt-agrarie | 4503 |
| | N. 37 | 20-40% | Media | Colt-agrarie | 4666 |
| | N. 39 | 0-10% | Media | Colt-agrarie | 9705 |
| | N. 41 | 10-20% | Fine-media | Colt-semin | 4217 |
| | N. 42 | 20-40% | Fine-media | Colt-semin | 3832 |
| | N. 43 | 0-10% | Fine-media | Colt-semin | 5089 |
| | <i>N. 6</i> | <i>0-10%</i> | <i>Media</i> | <i>Pascolo</i> | <i>1235</i> |
| | <i>N. 10</i> | <i>0-10%</i> | <i>Media</i> | <i>Pascolo</i> | <i>3564</i> |
| | <i>N. 38</i> | <i>10-20%</i> | <i>Media</i> | <i>Pascolo</i> | <i>3857</i> |
| | <i>N. 44</i> | <i>0-10%</i> | <i>Fine</i> | <i>Pascolo</i> | <i>5319</i> |
| | | | Media: | 4474 | |
| Valore di erosione medio sul bacino A (t/ km²/anno): | | | | | 4308 |

Figura 28 – Carta della perdita/accumulo di suolo nel bacino del torrente Comunelli, elaborata sulla base dei dati puntuali di ¹³⁷Cs (unità in t/ha/anno)



Se a questi dati viene rapportato il valore di net erosion corrispondente al volume di sedimentazione misurato nel serbatoio Comunelli (1330 t/ km²/anno), ne scaturisce un valore di SDR (coefficiente di resa solida o sediment delivery ratio) pari a 0,32. Tale valore appare compatibile con quello ottenibile utilizzando la formula di correlazione di Bagarello et al. [51] per la stima del SDR nei bacini siciliani:

$$SDR = 5,37 \text{ Sup}-0,69 \quad (7.3.1)$$

Il valore teorico relativo al bacino idrografico del Comunelli sarebbe infatti pari a 0,25.

In breve, considerando il possibile errore della stima, sia relativo alle modalità con le quali si è pervenuti al tasso medio di perdita di suolo a scala di bacino (metodologia di campionamento e formule di conversione attività ¹³⁷Cs /peso di materiale), sia per come è stato determinato il valore in peso di net erosion a partire dal dato volumetrico della sedimentazione nell'invaso artificiale, si può concludere che i due dati appaiono congruenti, quanto meno rispetto al valore teorico di SDR che è possibile ricavare in base alle osservazioni di Bagarello et al. [51].

7.4 Applicazione della RUSLE

Il modello RUSLE è stato applicato in ambiente GIS attraverso una procedura di sovrapposizione degli strati informativi relativi, rispettivamente, ai primi tre fattori della formula: R, K e LS. A causa della scarsa disponibilità di dati riguardanti le pratiche gestionali e conservative, i fattori C e P sono stati posti uguali ad 1. Ciò significa che si è considerata un'uniforme copertura dell'area di studio a maggese con aratura a rittochino ed in assenza di pratiche conservative, dal che consegue che la stima di perdita di suolo ottenuta esprime in realtà un valore di erosione potenziale. Questo implica, altresì, che la stima stessa possa risultare sovrastimata e che, come tale, rappresenti piuttosto uno scenario di erosione precauzionale, preliminare ad un'ulteriore e più dettagliata analisi.

Ai fini della determinazione del fattore R, la mancanza di registrazioni pluviografiche, indispensabili per poter calcolare il valore dei prodotti EI30, ha reso necessario il ricorso a formule di correlazione. Questo è un approccio seguito da molti autori in diverse regioni del mondo, in base ai diversi tipi di dati di precipitazione disponibili [50] [55] [40] [53] [49] [54]. A tale proposito, si è scelto di utilizzare la formula semplificata proposta da Diodato [54] per l'area mediterranea, grazie alla quale il prodotto EI30 può essere ricavato indirettamente tramite tre variabili generalmente disponibili negli Annali Idrologici:

$$EI_{30\text{-annual}} = 12.142(abc)^{0.6446} \quad (\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}) \quad (7.4.1)$$

dove a, b, c esprimono rispettivamente, in cm, la precipitazione totale annua, la massima precipitazione giornaliera annua e la massima precipitazione oraria annua.

La prima rappresenta l'effetto cumulativo delle precipitazioni meno erosive sul lungo periodo; le altre due variabili descrivono invece gli effetti, molto più erosivi, degli eventi intensi ed estremi di breve durata. A tale scopo, sono stati raccolti i dati relativi a nove stazioni pluviometriche ubicate nei dintorni dell'area di studio (Figura 29, Tabella VII) per un periodo complessivo di 42 anni di osservazioni (dal 1959 al 2000).

Figura 29 – Ubicazione delle stazioni pluviometriche

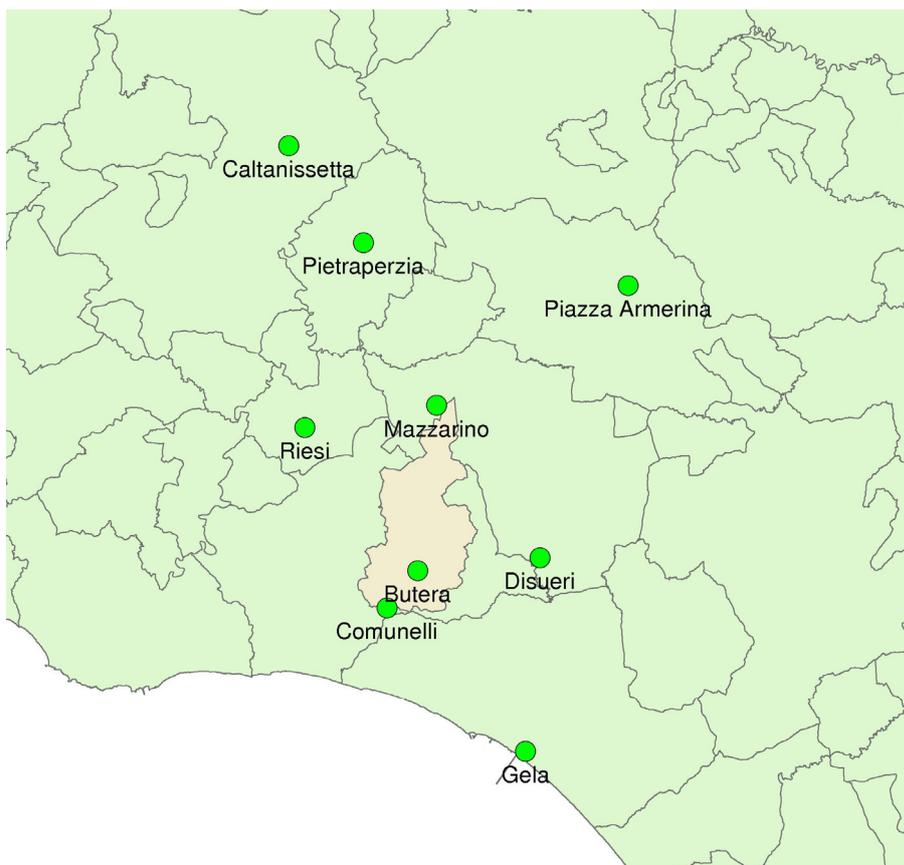


Tabella VII – Dati caratteristici delle stazioni pluviometriche

| Raingauge Station | Province | X | Y | Altitude | R | R_mod | N_Years | N_Mod |
|-------------------|----------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|
| Butera | CL | 427362 | 4115604 | 402,00 | 605,95 | 1078,79 | 10 | 29 |
| Caltanissetta | CL | 417326 | 4149034 | 570,00 | 1007,79 | 1007,79 | 35 | 35 |
| Gela | CL | 435745 | 4101445 | 45,00 | 743,81 | 712,83 | 35 | 38 |
| Mazzarino | CL | 428835 | 4128544 | 560,00 | 858,84 | 1031,06 | 19 | 27 |
| Riesi | CL | 418579 | 4126834 | 369,00 | 1091,65 | 1130,78 | 11 | 12 |
| Piazza Armerina | EN | 443751 | 4137986 | 721,00 | 1124,36 | 1126,90 | 25 | 30 |
| Pietraperzia | EN | 423137 | 4141364 | 525,00 | 1101,19 | 1056,24 | 30 | 34 |
| Comunelli | CL | 424961 | 4112692 | 94,00 | 764,77 | 778,14 | 15 | 16 |
| Disueri | EN | 436891 | 4116616 | 149,00 | 419,01 | 412,16 | 15 | 17 |

Sfortunatamente, non è stato possibile utilizzare i dati provenienti da tutte le stazioni, a causa delle lacune presenti nei singoli data-set. Innanzitutto, ai fini della significatività della relazione, è necessario che il fattore R sia riferito ad un periodo di lunga durata (almeno 20 anni). Pertanto, solo quattro delle stazioni considerate (Caltanissetta, Gela, Piazza Armerina e Pietraperzia, che, fra l'altro, risultano le più distanti dall'area di studio) si sono rivelate utili. Tuttavia, al fine di arricchire il data-set, si è cercato di ovviare alla mancanza di dati, almeno in alcune stazioni, ricavando i dati mancanti tramite l'analisi di correlazione tra i dati di precipitazione massima giornaliera e quelli di massima precipitazione oraria ed applicando la relativa formula di regressione lineare. Il valore di R risultante è stato definito R_mod (modificato). In questo modo, è stato possibile aumentare fino a sei il numero di stazioni da poter prendere in considerazione, con il vantaggio di inserire due delle stazioni ricadenti nell'area di studio (Butera e Mazzarino). Sono rimaste pertanto escluse le stazioni di Riesi, Disueri e Comunelli (diga).

Il risultato del riempimento dei dati mancanti è sicuramente influenzato dalla tecnica utilizzata, infatti, il valore medio di R, nelle due stazioni "recuperate", varia da 605,95 e 858,84, rispettivamente, a quello medio di R_mod pari a 1078,79 e 1031,06 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), mentre nelle altre quattro stazioni, meno lacunose delle prime, il valore di R_mod non differisce sensibilmente da quello di R. Quindi, sulla base delle due serie di valori, l'una riferita a quattro stazioni, l'altra riferita al data-set allargato, sono stati realizzati due distinti grid, a copertura dell'intera area di studio, nei quali, a ciascuna delle celle di dimensioni 20x20 m, è stato assegnato, rispettivamente, un valore di R e di R_mod mediante interpolazione Kriging dei valori relativi alle stazioni considerate (Figure 30 e 31).

Come si può vedere nelle figure, il numero delle stazioni di riferimento influisce sensibilmente, oltre che sul valore medio finale di R, anche sul pattern dei valori distribuiti nei grid: la distribuzione dei valori, che scaturisce considerando solo quattro stazioni, è molto influenzata dalla localizzazione delle stazioni stesse (Gela posta più a sud, le altre tutte a nord), per cui c'è un aumento graduale di R dalla parte bassa a quella alta del bacino; mentre, nel caso delle sei stazioni, l'ubicazione di Butera e Mazzarino in posizione centrale rispetto alle altre, ha permesso una distribuzione dei valori meno "polarizzata", per cui i valori più alti si concentrano nella parte centro-occidentale del bacino.

Il valore medio a scala di bacino, che scaturisce dalla spazializzazione dei dati puntuali, è risultato 938,5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ per R e 1052,7 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ per R_Mod.

Il fattore erodibilità del suolo K è stato determinato mediante la formula 3.2.3 per ognuno dei sub-campioni individuati lungo il profilo di ciascuna carota di suolo ed utilizzati ai fini della caratterizzazione granulometrica e mineralogica, cioè il campione superficiale, quello medio e quello più profondo.

Il valore medio di questi è stato utilizzato per la spazializzazione a scala di bacino, mediante interpolazione Kriging e attribuzione di un valore K a ciascuna delle celle 20x20 m del grid. I valori così ottenuti variano da 0,0076 a 0,0439 t h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (valore medio = 0,0294).

Figura 30 – Distribuzione del fattore R – erosività della pioggia (4 stazioni)

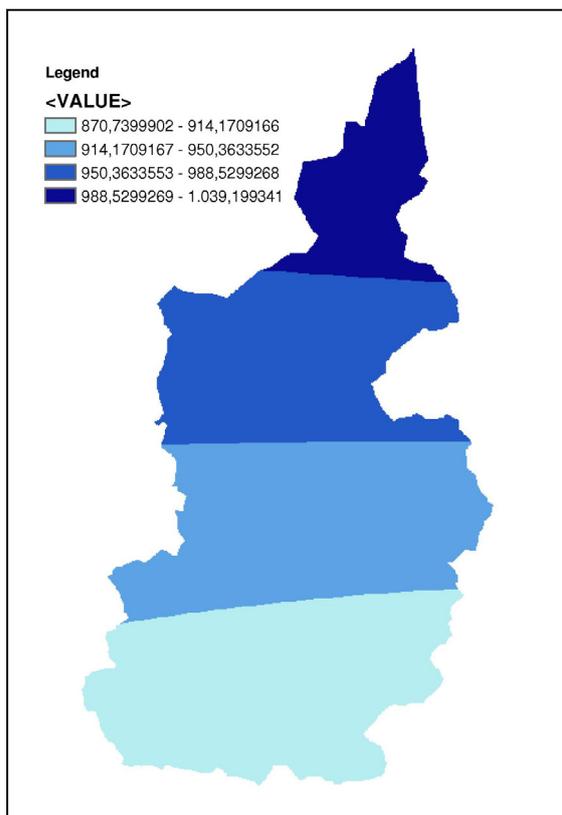


Figura 31 – Distribuzione del fattore R_mod – erosività della pioggia (6 stazioni)

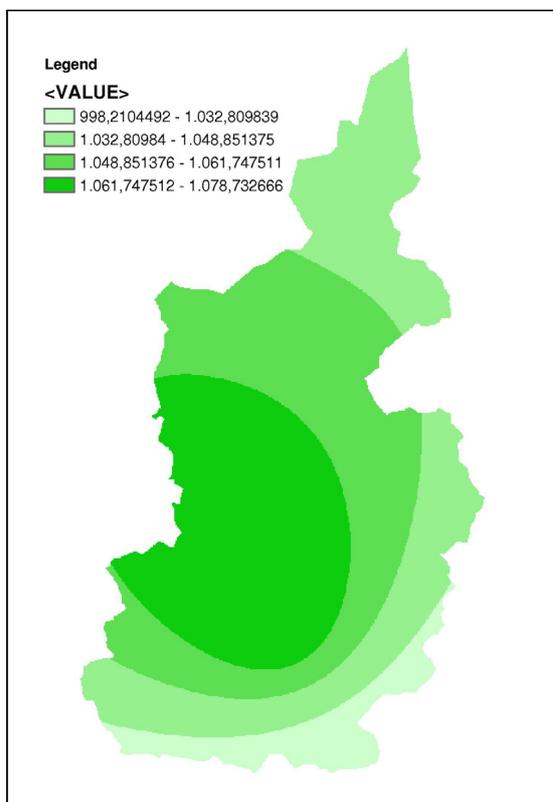
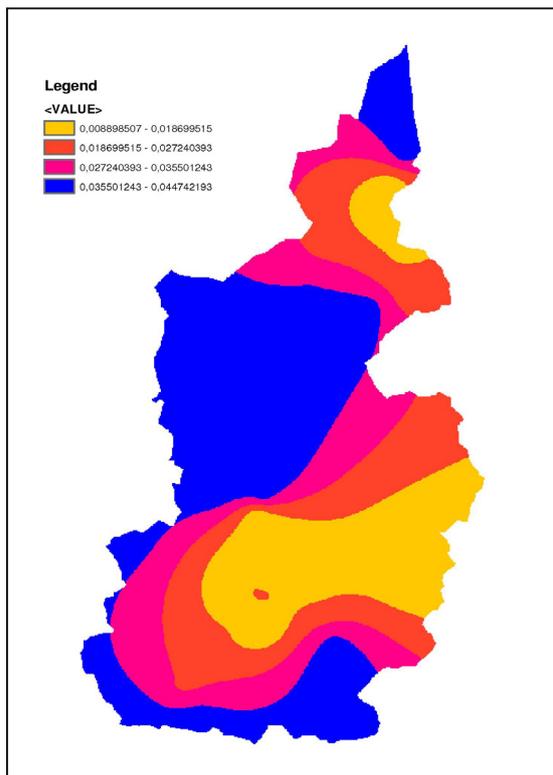


Figura 32 – Distribuzione del fattore K – erodibilità



La relativa carta dell'erosibilità (Figura 32) mostra che i valori più elevati di K sono localizzati nella parte alta, in quella centro-occidentale e nella porzione più meridionale del bacino; mentre i valori più bassi caratterizzano la parte sud-orientale e nord-orientale.

I valori di erodibilità K mostrano una buona corrispondenza con la Carta dei Suoli della Sicilia [47]. Infatti, i valori più bassi si riferiscono tutti ad una singola classe di suoli: *typic xerorthents* a tessitura media (class. FAO); mentre i valori più alti sono prevalentemente associati a *typic xerorthents* a tessitura fine-media o a *typic chromoxererts* e/o *typic pelloxererts* a tessitura fine.

Per la determinazione del fattore topografico LS, date le dimensioni dell'area di studio, la misura diretta era ovviamente improponibile. Avendo a disposizione il DEM 20x20 m, si è utilizzata la metodologia di calcolo sviluppata da Van Remortel et al. [56]. Anche in questo caso il risultato grafico è un grid con maglia di 20 m nel quale ad ogni cella è assegnato un valore LS.

In Figura 33 è rappresentata la distribuzione del fattore topografico all'interno del bacino idrografico del Comunelli, da cui si evidenzia che i valori più elevati si riscontrano nella porzione centrale del bacino, caratterizzata da una maggiore articolazione dal punto di vista morfologico (grande variabilità di quote e versanti molto acclivi). L'entità dei valori di LS varia da 0,05, nelle zone a morfologia piatta, ad un massimo di 62,22, in corrispondenza di un lungo versante molto acclive ubicato nel settore centrale del bacino.

Figura 33 – Distribuzione del fattore LS – topografico

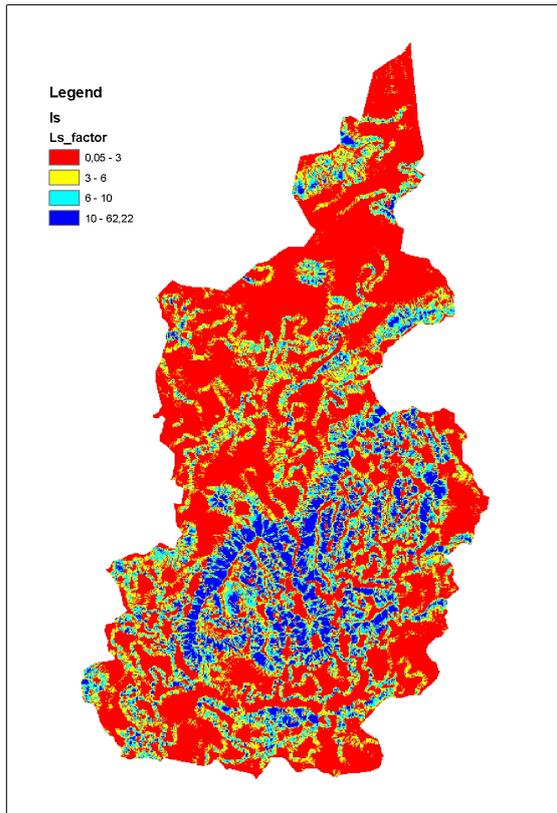
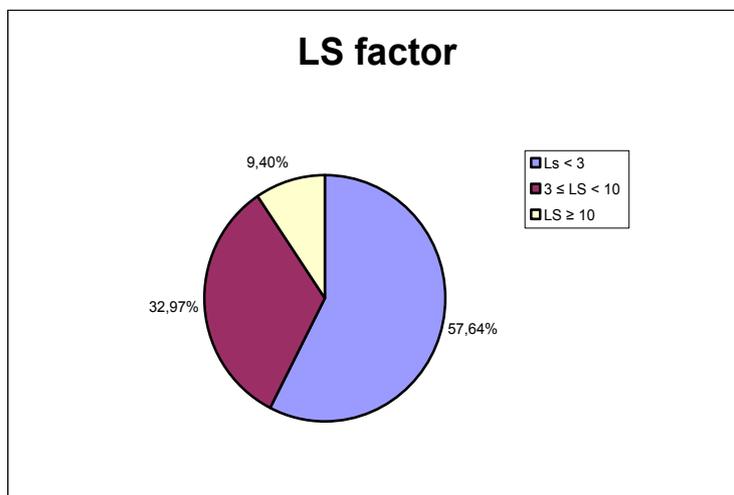


Figura 34 – Frequenza delle classi di valori del fattore LS



È da rimarcare che circa il 57% delle celle contengono un valore LS inferiore a 3, circa il 33% un valore da 3 a 10 e solo meno del 10 % contengono un valore superiore a 10 (Figura 34). Di conseguenza, il valore medio risultante è relativamente poco elevato (3,9).

Ai fini dell'influenza sul tasso di erosione, tuttavia, ciò che conta è il grado di variabilità attorno a questo valore. Infatti Renard et al. [5] riportano che la perdita di suolo media, da un versante dal profilo irregolare, può essere fino al 30% maggiore di quella registrabile da un versante con la stessa pendenza, ma con profilo uniforme. Ciò è stato verificato dagli autori su un versante con pendenza non uniforme, della lunghezza di circa 122 m, il cui valore LS complessivo risultava pari a 3,76.

I risultati della sovrapposizione degli strati informativi relativi ai fattori appena descritti sono riportati in due grid distinti che tengono conto, rispettivamente, del fattore R ed R_mod (Figure 35 e 36). I valori più elevati sono in corrispondenza delle aree più acclivi, anche se bisogna sottolineare che solo il 15% circa delle celle posseggono un valore superiore a 200 t ha-1y-1.

I valori di perdita di suolo variano da 0,44 a 1059,63 t ha-1anno-1 con un valore medio di 95,13 t ha-1 anno-1, mentre i valori riferiti a R_mod variano da 0,52 a 1204,41 t ha-1anno-1 con un valore medio di 107,45 t ha-1anno-1. Dai due grid, rispettivamente, si ottiene un valore totale di perdita di suolo di 799027,5 t y-1 e 902552,35 t y-1. Rapportando questi valori alla superficie dell'area di studio, si ottiene un valore specifico di erosione pari, rispettivamente, a 94,76 t ha-1anno-1 e 107,03 t ha-1 anno-1. In Tabella VIII sono riassunti i valori ottenuti per i singoli fattori della RUSLE e per la perdita di suolo.

Tabella VIII – Valori dei fattori RUSLE e della perdita di suolo relativi al bacino del torrente Comunelli

| | R | R_Mod | K | LS | Loss | Loss_Mod |
|----------------|----------|--------------|----------|-----------|-------------|-----------------|
| Min | 870,7 | 998,2 | 0,0076 | 0,05 | 0,44 | 0,52 |
| Max | 1038,5 | 1078,4 | 0,0439 | 62,22 | 1059,63 | 1204,41 |
| Mean | 938,5 | 1052,7 | 0,0294 | 3,9 | 95,13 | 107,45 |
| Std Dev | 38,8 | 13,8 | 0,01 | 4,54 | 105,05 | 119,38 |

Figura 35 – Distribuzione dei valori di perdita di suolo in base al fattore R

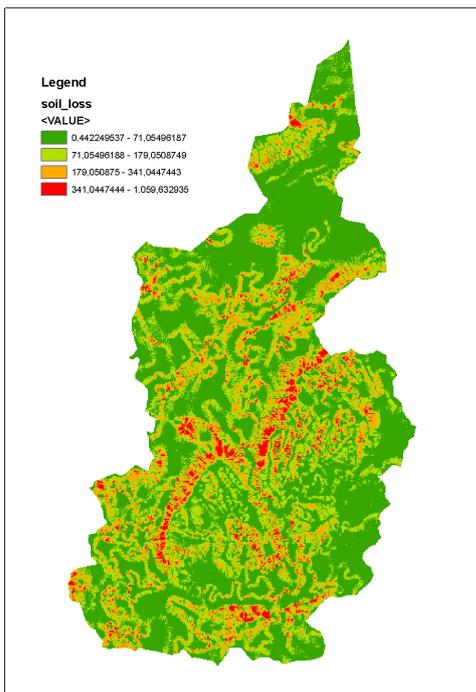
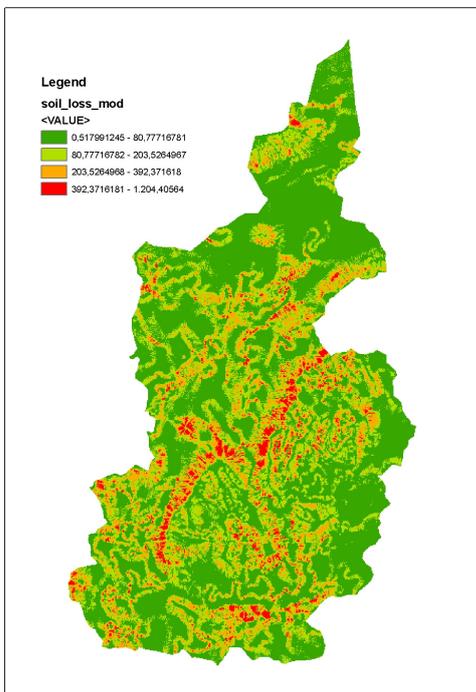


Figura 36 – Distribuzione dei valori di perdita di suolo in base al fattore R_mod



7.5 Applicazione delle formule di regressione multipla

Attraverso l'applicazione delle formule di regressione si è inteso verificare l'efficacia del modello statistico nella previsione dell'entità della net erosion riscontrata mediante i volumi di sedimentazione nei due invasi studiati.

Le eqq. 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3 [26], prese tal quali, non hanno fornito risultati soddisfacenti, avendo dato luogo a scarti tra i valori previsti e quelli osservati mediamente superiori al 60%, nel caso del Comunelli, e dall'80% circa fino al 185%, nel caso dell'Irminio. Le stesse formule, ricalibrate in base all'analisi di correlazione statistica tra i dati torbiometrici relativi al campione di 16 bacini siciliani da noi considerato ed i relativi parametri geomorfici, hanno prodotto un peggioramento per il Comunelli, nel quale gli scarti medi sono aumentati fin oltre il 90%, mentre, nel caso dell'Irminio, hanno fornito risultati decisamente migliori (dal 10 al 17%).

Lo stesso è avvenuto con l'applicazione della formula di Cannarozzo & Ferro (3.3.4): anche in questo caso, la formula originale ha fornito pessimi risultati (scarti: 78% Comunelli, 100% Irminio), mentre la stessa formula ricalibrata ha prodotto un ulteriore peggioramento nel Comunelli (91%) ed un deciso miglioramento nell'Irminio (9%).

La formula 3.3.5, da noi elaborata, ha invece prodotto scarti molto elevati in entrambi i casi esaminati (97% nel Comunelli, 48% nell'Irminio).

La miglior capacità di previsione, relativamente ai due bacini idrografici esaminati, è quindi risultata da parte del modello "siciliano" di Cannarozzo & Ferro (3.3.4) e da quello rappresentato dalla terza equazione di Ciccacci et al. (3.3.3), entrambi debitamente ricalibrati. I dati di T_u risultanti dall'applicazione delle suddette formule sono riportate nella tabella IX.

Tabella IX – Valori del T_u ottenuti con le formule statistiche e relativi scarti % rispetto ai dati osservati

| | Comunelli - T_u osservato: 1328,69 t/ km ² /anno | | | | Irminio - T_u osservato: 107,92 t/ km ² /anno | | | |
|-----------|--|----------|---------------------|----------|---|----------|---------------------|----------|
| | Formule originali | | Formule ricalibrate | | Formule originali | | Formule ricalibrate | |
| | T_u pred. | Scarto % | T_u pred. | Scarto % | T_u pred. | Scarto % | T_u pred. | Scarto % |
| Eq. 3.3.1 | 460,50 | 65 | 112,00 | 92 | 213,56 | 98 | 125,89 | 17 |
| Eq. 3.3.2 | 426,82 | 68 | 90,93 | 93 | 193,56 | 79 | 92,68 | 14 |
| Eq. 3.3.3 | 565,39 | 57 | 118,56 | 91 | 307,31 | 185 | 118,22 | 10 |
| Eq. 3.3.4 | 299,31 | 77 | 119,75 | 91 | 215,82 | 100 | 98,30 | 9 |
| Eq. 3.3.5 | | | 42,55 | 97 | | | 55,60 | 48 |

Bibliografia

- [51]. Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A., 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97, 295-308.
- [52]. Arnoldus, H.M.J., 1977. Methodology used to determinate the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Assessing Soil Degradation. FAO Soil Bulletin* 34, 8-9
- [53]. Bagarello V., Ferro V., Giordano G. (1991). Contributo alla valutazione del fattore di deflusso di Williams e del coefficiente di resa solida per alcuni bacini idrografici siciliani. *Riv. di Ing. Agr.*, 4, 238-251.
- [54]. Consorzio Di Bonifica 5 Gela - Ufficio Tecnico (1999). Diga sul torrente Comunelli. Lavori di ripristino della funzionalità dello scarico di fondo (Progetto di massima). Prove geotecniche di laboratorio. Gela, dicembre 1999.
- [55]. De Santos Loureiro, N. & de Azavedo Coutinho, M., 2001. A new procedure to estimate the Rusle EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *Journal of Hydrology* 250, 12-18.
- [56]. Diodato, N., 2004. Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology & Earth System Sciences* 8, 103-107.
- [57]. Ferro V., Giordano G., Iovino M., 1991. Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 36, is. 6, 549-564.
- [58]. Van Remortel, R., Hamilton, M., and Hickey, R., 2001. Estimating the LS Factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data. *Cartography* 30, 27-35

8. DISCUSSIONE

8.1 Analisi isotopiche

Per quanto riguarda la metodologia di valutazione dell'erosione attraverso le analisi isotopiche, che costituisce l'oggetto principale della ricerca condotta, di seguito si commentano i risultati con riferimento, da una parte, alla rispondenza del criterio di campionamento adoperato e, dall'altra, all'efficacia delle analisi isotopiche stesse e del modello di conversione utilizzato, in termini di capacità di stima dell'erosione rispetto al dato osservato.

La misura del contenuto in ^{137}Cs ed il suo andamento lungo il profilo pedologico indagato nei singoli campioni, rispetto ai profili-tipo, di per sé definisce una certa tipologia di suolo, permettendo di identificare siti disturbati e indisturbati. In questo modo è stato possibile verificare, in prima analisi, la correttezza o meno di alcune ipotesi formulate circa la scelta del sito di riferimento. Con lo stesso criterio, è stato possibile verificare anche la rispondenza con la classificazione dell'area di studio in Unità di Paesaggio. Questa è stata operata, ricordiamo, sulla base di cartografie disponibili a piccola scala (1:100.000 e 1:250.000) e quindi è da considerare come una classificazione teorica, sia per i limiti insiti nella scala cartografica, che presenta margini di incertezza soprattutto in termini di definizione geometrica-spaziale nelle aree di confine tra le classi, sia per i contenuti tematici che possono essere non veritieri o comunque non tenere conto delle reali dinamiche territoriali che possono essersi succedute nel corso dei decenni, a partire dalla prima deposizione dei radioisotopi da fall-out.

A tale proposito, in effetti, sono scaturite alcune incongruenze: ad esempio, per quanto riguarda il sito di riferimento (come tale determinato in campagna, in base alle caratteristiche morfologiche e di altitudine ed all'attuale uso del suolo) sono state prelevate in tutto 5 carote, contraddistinte dagli id. 30, 31, 32, 33, 34; i profili radiometrici relativi alle carote n. 30 e n. 31, prelevate a pochi metri di distanza l'una dall'altra ed entrambe ad una distanza di circa 300 metri dalle altre 3 carote, in realtà non si sono rivelati corrispondenti a quello di un sito indisturbato (andamento di tipo esponenziale), ma entrambi presentano invece delle anomalie date da un aumento del tenore di ^{137}Cs nella parte inferiore. In questo caso l'attribuzione del profilo è dubbia, essendo il profilo stesso probabilmente influenzato da un rimaneggiamento antropico del suolo (es.: un riporto di terreno in quella zona dell'area, fatto che spiegherebbe tra l'altro l'aumento di cesio al crescere della profondità); pertanto, le due carote sono state escluse dalla stima. La figura 37 mostra il profilo relativo al campione n. 30.

Le rimanenti carote (nn. 32, 33, 34) mostrano invece un profilo tipico dei suoli indisturbati, come si può vedere dalla Figura 38 che riporta il profilo del campione n. 34. Pertanto, sono state considerate come rappresentative del sito di riferimento ed i risultati ottenuti dall'analisi in spettrometria gamma sono stati utilizzati per calcolare l'attività di riferimento per tutto il bacino, ai fini della stima dell'erosione.

Figura 37 - Profilo di cesio-137 relativo al campione n. 30

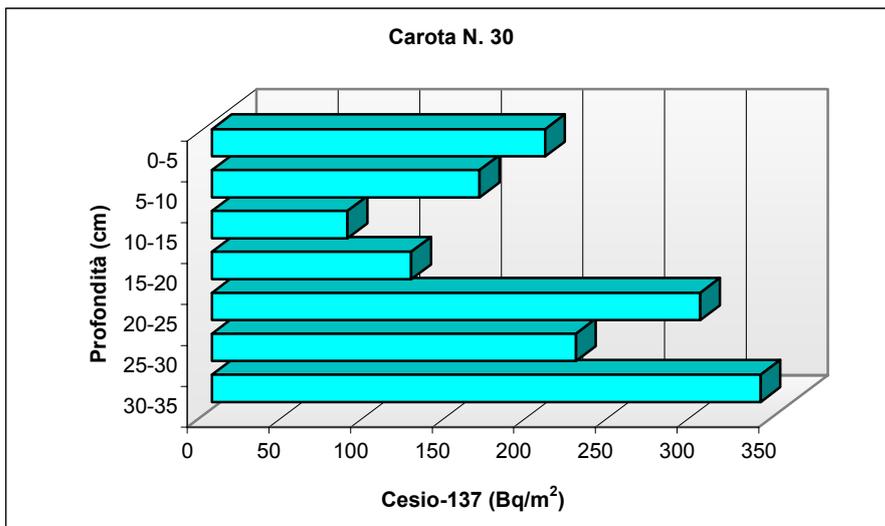
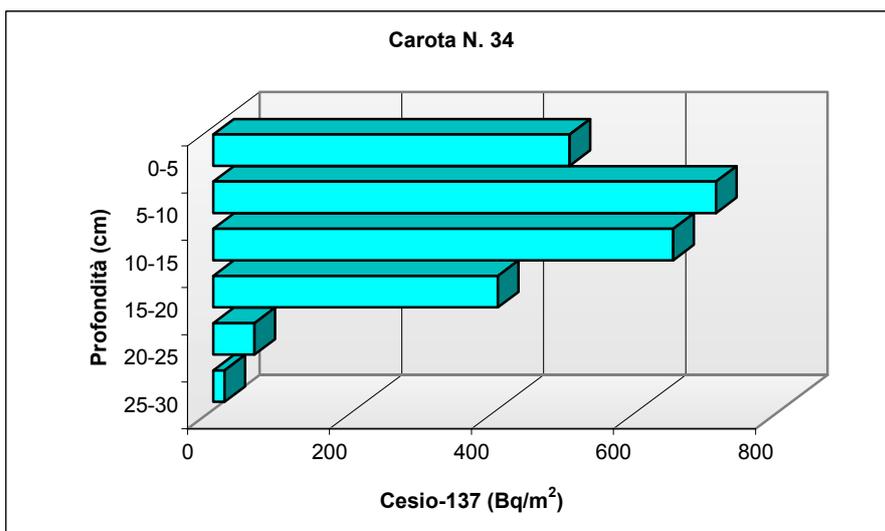


Figura 38 - Profili di cesio-137 relativo al campione n. 34



Per quanto riguarda le carote appartenenti a suoli non coltivati (prato/pascolo), è noto come i suoli indisturbati, mai adibiti ad attività agrarie, presentino un profilo di distribuzione del cesio che diminuisce con l'aumentare della profondità in modo esponenziale. La figura 39 riporta il profilo del campione n. 29 che in fase di studio era stato identificato come un sito indisturbato. L'osservazione del profilo, chiaramente di tipo esponenziale, permette di confermare l'ipotesi di partenza. Le carote n. 6 (Figura 40) e n. 10 mostrano invece un profilo compatibile con quello di un suolo coltivato: ciò comproverebbe la discrepanza tra le reali dinamiche di uso del suolo avvenute nei decenni trascorsi, testimoniate dall'andamento del contenuto in ^{137}Cs , e la cartografia adoperata per la classificazione, che attesta invece un uso del suolo, riferito ad oggi o all'epoca della redazione della carta (anni '80-'90), diverso.

Figura 39 - Profilo tipico di un sito indisturbato (carota n. 29)

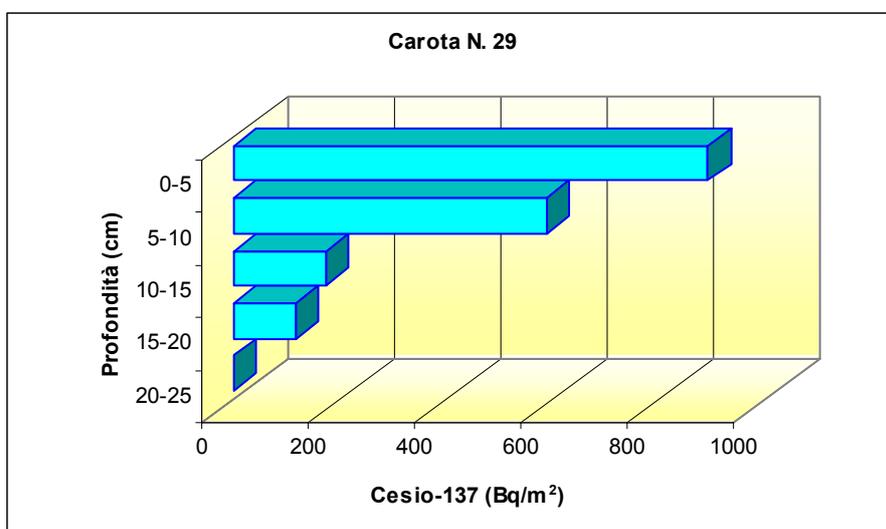
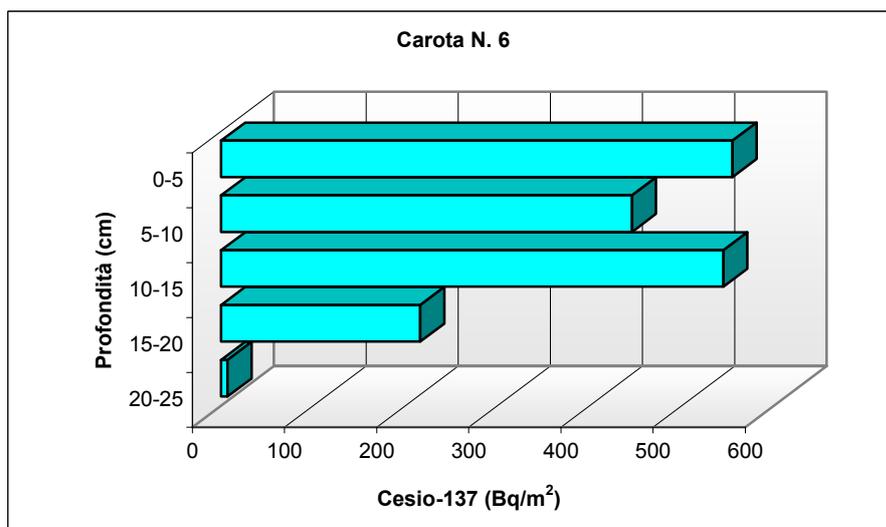


Figura 40 - Profilo del campione n. 6



Le carote n. 38 (Figura 41) e n. 44 mostrano un aumento del contenuto in ^{137}Cs con la profondità: è un profilo anomalo di dubbia interpretazione, ma che sicuramente non è attribuibile ad un suolo indisturbato (cioè che non ha subito lavorazioni agrarie), pertanto queste carote sono state annoverate tra quelle relative a suoli coltivati. Le altre carote mostrano le caratteristiche tipiche dei suoli non coltivati.

I suoli soggetti a pratiche agricole sono caratterizzati invece da un profilo estremamente diverso: gli strati più superficiali presentano un'uniformità di contenuto di cesio, dovuta al rimescolamento del terreno durante le fasi di aratura, mentre gli strati inferiori mostrano un basso contenuto di cesio fino ad arrivare, spingendosi ancora più in profondità, ad un valore nullo. L'andamento tipico dei suoli coltivati è illustrato in Figura 42 e mostra il profilo relativo al campione n. 37, identificato in fase di studio come suolo adibito a colture agrarie.

Figura 41 - Profilo del campione n. 38

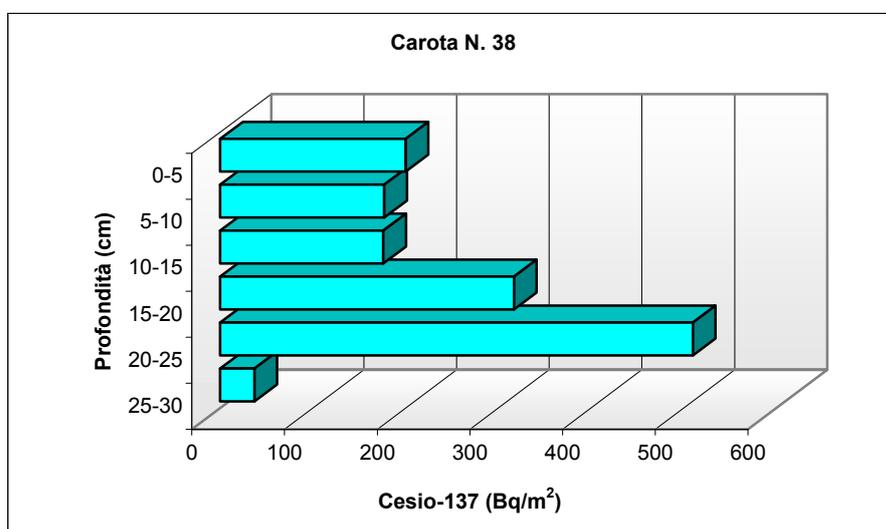
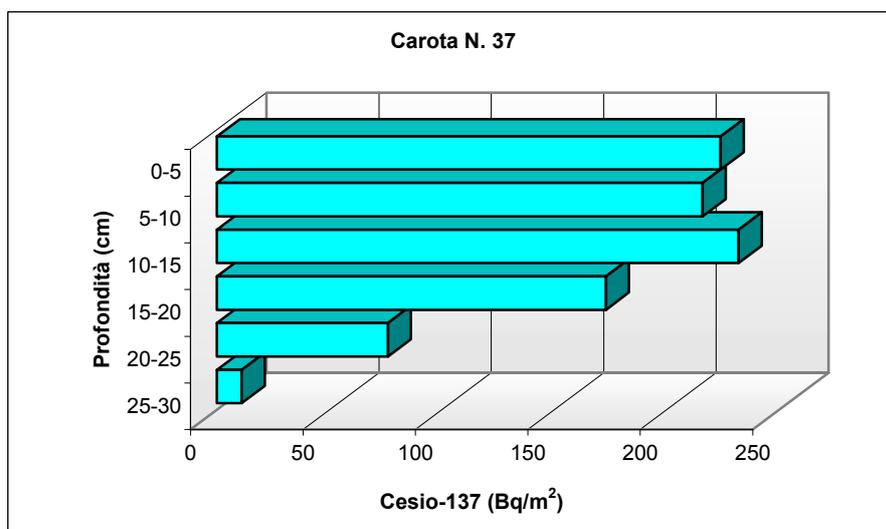


Figura 42 - Profilo tipico di un suolo coltivato (carota n. 37)



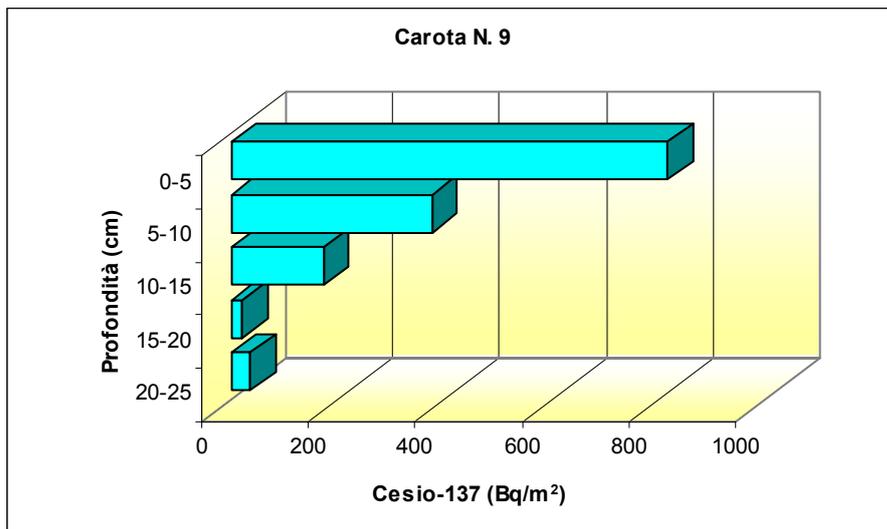
Rispetto a questo profilo-tipo, le carote n. 9 (Figura 43) e n. 13 presentano invece un profilo tipico di un suolo indisturbato, sicuramente non attribuibile ad un terreno sottoposto a coltivazione agraria; pertanto, nella stima dell'erosione, sono state annoverate tra quelle rappresentative dei suoli indisturbati (cioè a prato/pascolo).

Per le carote nn. 19 e 20 non è stato possibile fare un'analisi completa del profilo di ^{137}Cs poiché al di sotto dei 10 cm di profondità l'attività non era più rilevabile. Entrambe sono comunque state considerate come appartenenti a suoli coltivati.

Una particolare anomalia è stata rilevata nel profilo della carota n. 23, che presenta prima una diminuzione del ^{137}Cs , poi un aumento e quindi ancora una diminuzione. Tale carota è stata comunque considerata come suolo coltivato.

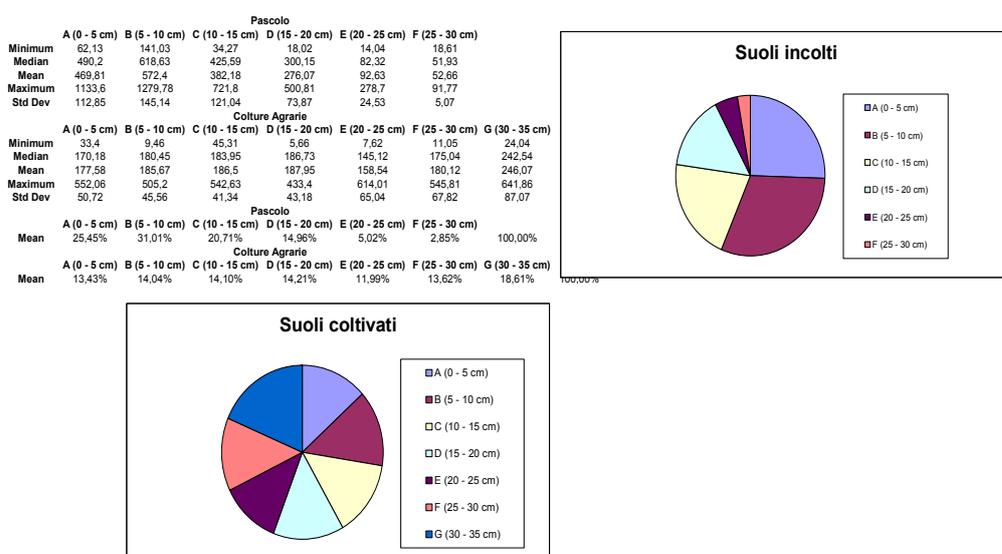
Tutte le altre carote prelevate in suoli coltivati hanno mostrato un profilo di ^{137}Cs compatibile con l'uso del suolo teorico.

Figura 43 - Profilo del campione n. 9



Per quanto riguarda il quantitativo assoluto di cesio riscontrato nei vari campioni, in generale, le carote di suolo esaminate presentano un'elevata variabilità, indipendentemente dalla classe di appartenenza, sia in riferimento alle Unità di Paesaggio che alle singole caratteristiche di base (acclività, uso del suolo, tessitura). Prima di analizzare le correlazioni con tali caratteristiche, è interessante osservare i dati statistici relativi alla distribuzione del ^{137}Cs alle varie profondità dei profili di suolo esaminati, che confermano quanto finora considerato. La Figura 44 mostra chiaramente le differenze tra le distribuzioni di ^{137}Cs nelle due principali tipologie di suoli (indisturbati e coltivati). In particolare, è evidente che, all'interno dei suoli coltivati, si è verificata una ridistribuzione omogenea del ^{137}Cs , mentre nei suoli indisturbati il contenuto radioisotopico è concentrato nei primi 15 cm del profilo.

Figura 44 – Distribuzione del ¹³⁷Cs lungo i profili di suolo nei suoli coltivati e non coltivati



È stata tentata una normalizzazione dei valori di ¹³⁷Cs rispetto alle classi tessiturali sabbia e argilla, ma i risultati ottenuti non forniscono alcuna indicazione utile per i nostri scopi. Nelle figure 45 e 46 sono riportati i diagrammi di distribuzione del contenuto radioisotopico in funzione delle percentuali di sabbia e di argilla misurato, rispettivamente, nei campioni provenienti dai suoli non coltivati e da quelli coltivati. Nei suoli non coltivati, nei quali si è esaminato separatamente lo strato più superficiale (0-5 cm), nel quale si registra generalmente la più alta concentrazione del ¹³⁷Cs, da quello complessivo fino ad una profondità di 20 cm, si assiste ad una discreta correlazione tra contenuto in ¹³⁷Cs e granulometria se si considera la frazione sabbiosa, mentre se si analizza la frazione fine (argilla o limo + argilla), la correlazione diminuisce sensibilmente.

Nel caso dei suoli coltivati, invece, nei quali si è direttamente considerato uno spessore di suolo di 20 cm, dato l'effetto di rimescolamento dovuto alle lavorazioni agrarie, la correlazione non si osserva, il che attesta l'elevato grado di dispersione dei dati. In ogni caso, da tutti i diagrammi si evidenzerebbe un andamento certamente anomalo per quanto riguarda il tasso tendenziale del contenuto di ¹³⁷Cs in relazione alle classi tessiturali. Infatti, come è stato dimostrato anche in prove sperimentali, il tenore radioisotopico dovrebbe aumentare col contenuto di argilla e, viceversa, diminuire con quello di sabbia, in conseguenza della variazione del grado di permeabilità del suolo e della capacità di adsorbimento con il variare delle reciproche percentuali granulometriche. I diagrammi riportati sembrerebbero attestare il contrario, anche se, data la correlazione estremamente bassa tra le variabili considerate, l'andamento non può essere considerato significativo. La determinazione del contenuto di sostanza organica nei suoli esaminati potrà consentire di fare delle considerazioni esaustive su tale comportamento. Questa variabile, infatti, concorre in maniera importante sulla capacità di cattura dei radionuclidi nel suolo e potrebbe spiegare certi allontanamenti dalla norma.

Figura 45 – Andamento del contenuto in ^{137}Cs in funzione della % di sabbia e di argilla nei suoli non coltivati

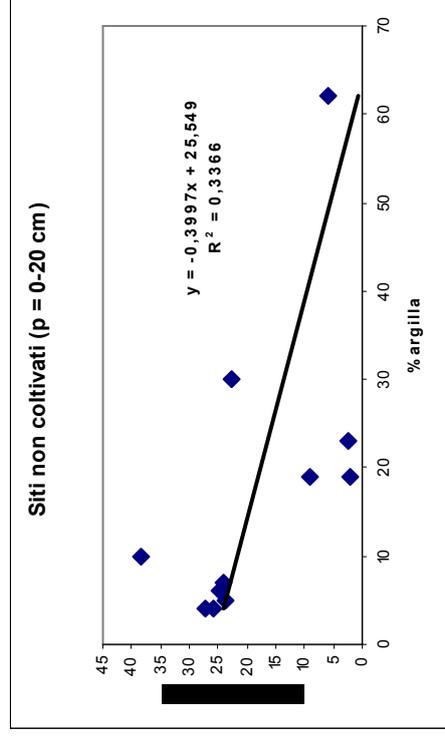
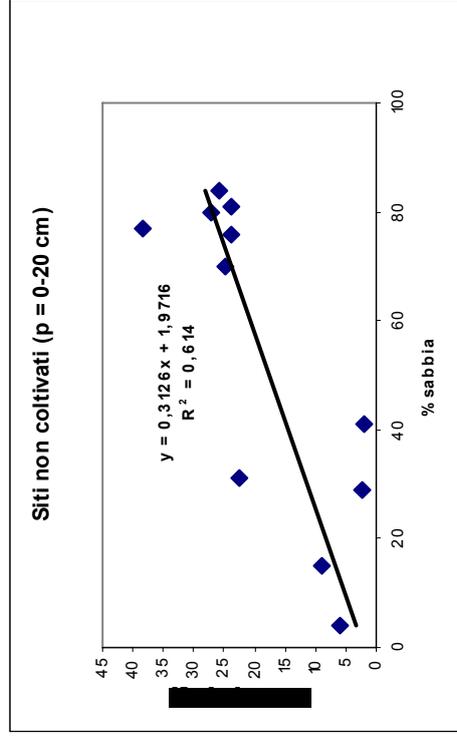
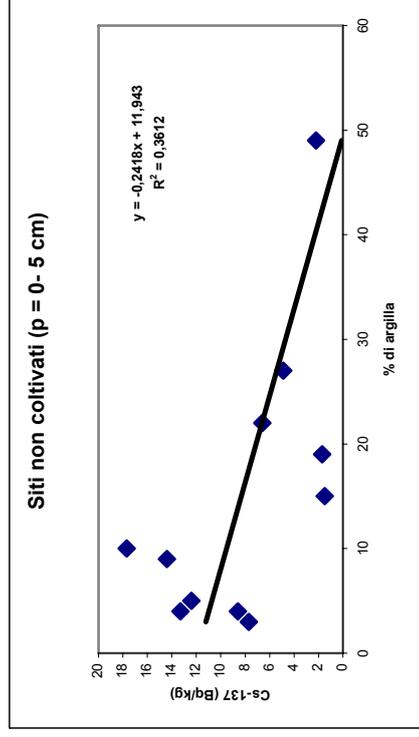
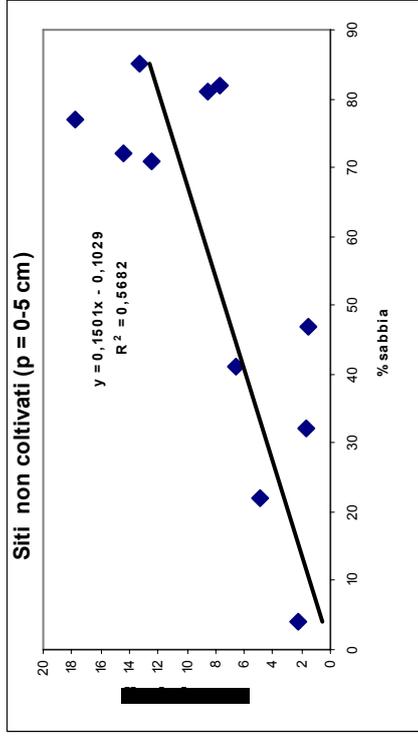
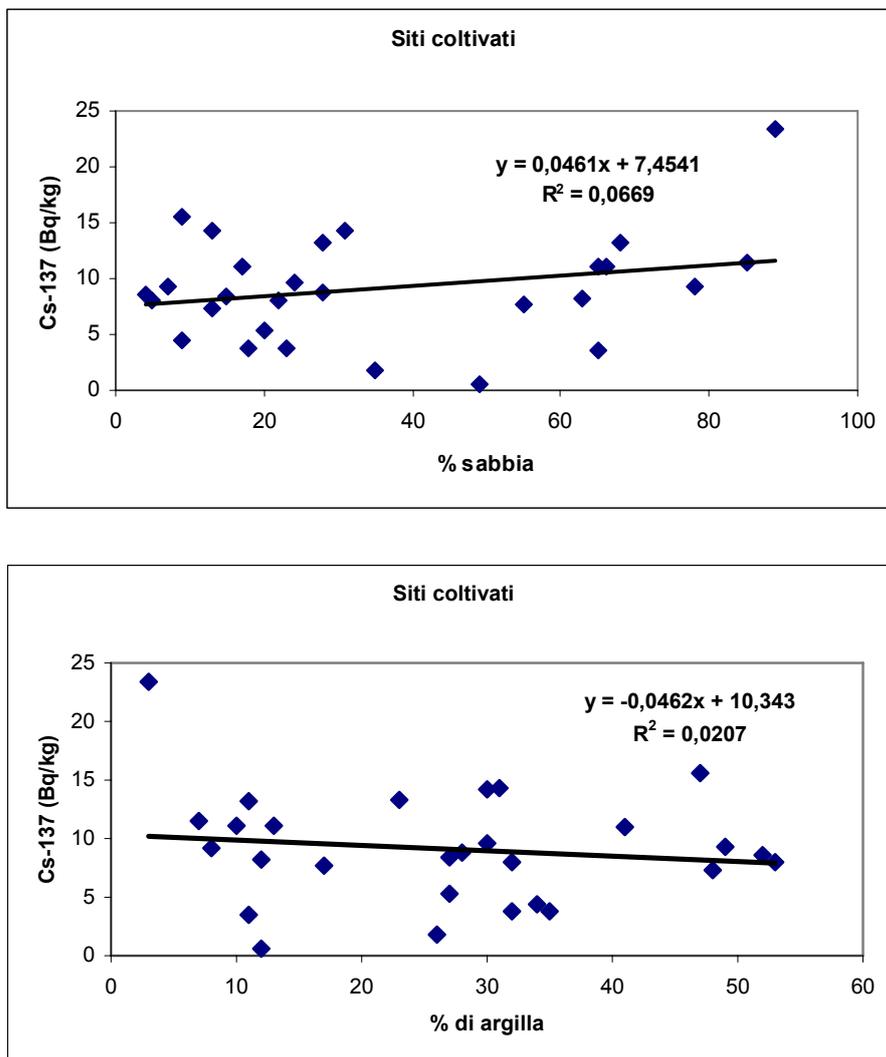


Figura 46 – Andamento del contenuto in ^{137}Cs in funzione della % di sabbia e argilla nei suoli coltivati



In Figura 47 sono riportati i valori del tasso di erosione in funzione delle classi di pendenza: a parte la classe 4 (40-80%), rappresentata da soli due punti, tutte presentano un'ampia variabilità intorno al valore medio. I valori più elevati si riscontrano nella prima (0-10%) e nella terza classe (20-40%).

Analogamente, in Figura 48 sono riportati i valori del tasso di erosione in funzione delle classi di uso del suolo. In questo caso, il gruppo dei suoli coltivati viene descritto in maggior dettaglio, con la distinzione nelle tre classi: orti e colture particellari, oliveti-frutteti e seminativi. Anche in questo caso si riscontra un'ampia variabilità intorno al valore medio, con i valori più elevati nella prima (pascoli) e seconda classe (colture particellari).

Anche con la composizione mineralogica, peraltro rivelatasi molto uniforme, non si è evidenziata nessuna correlazione.

Nonostante i problemi appena evidenziati, alla luce dei risultati ottenuti la metodologia radioisotopica ha comunque consentito di pervenire ad una stima della perdita di suolo a scala di bacino congruente con il dato osservato.

Figura 47 – Distribuzione dei valori di erosione nelle singole classi di pendenza

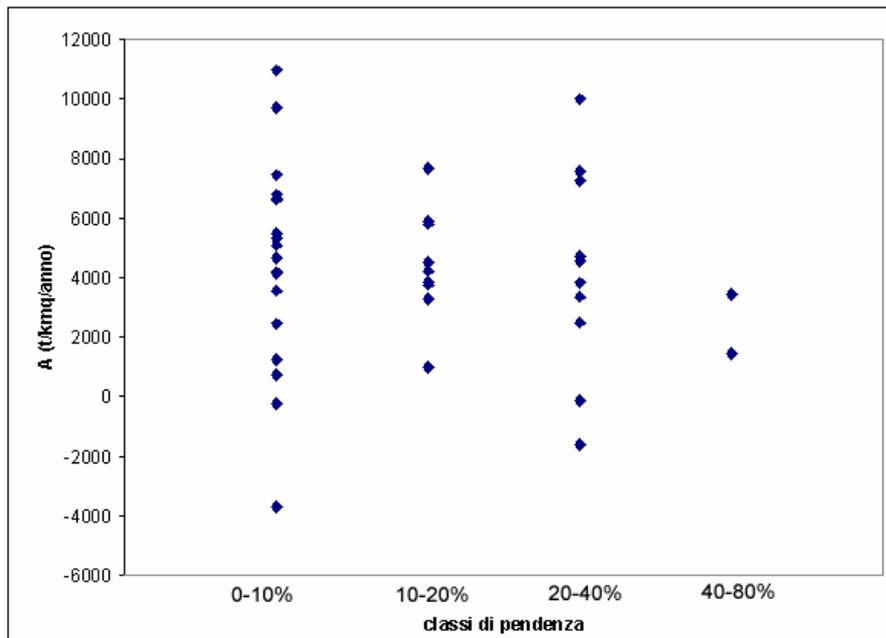
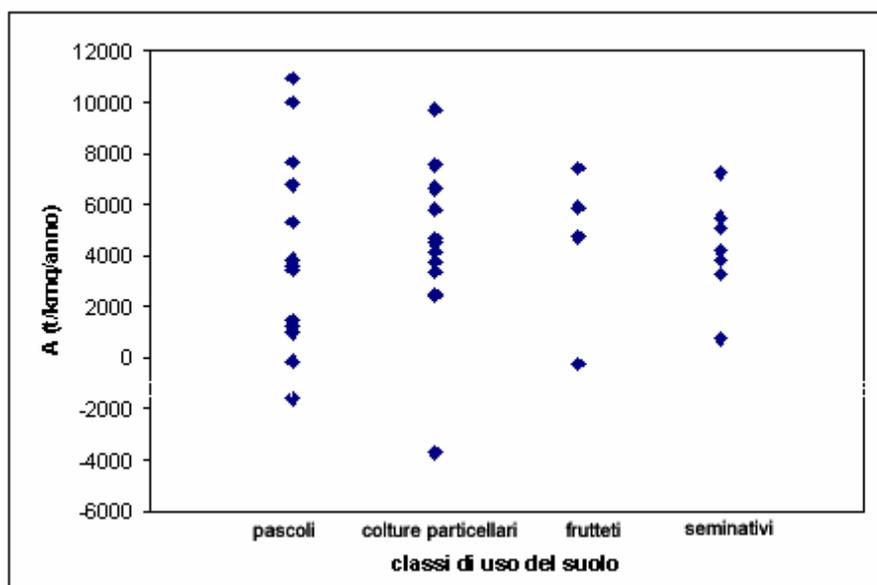


Figura 48 – Distribuzione dei valori di erosione nelle singole classi di uso del suolo



8.2 RUSLE

L'applicazione della RUSLE, come previsto, ha dato luogo ad un valore di perdita di suolo che appare sovrastimato sia rispetto a quello risultante dalla misura del volume di sedimentazione nell'invaso sia rispetto a quello ottenuto dall'analisi isotopica.

Ciò è dovuto innanzitutto alla scelta di porre uguali ad 1 entrambi i fattori che esprimono l'influenza antropica sul processo di erosione, cioè il fattore culturale C e quello relativo alle tecniche di conservazione P.

Se, per quest'ultimo fattore, la semplificazione adottata può essere in buona misura rispondente alla realtà, avendo constatato la quasi totale assenza di opere di difesa e conservazione del suolo all'interno del bacino, essa è sicuramente eccessiva per quanto riguarda il reale uso del suolo e la relativa copertura vegetale. Infatti, come accennato nella descrizione, la superficie del bacino del Comunelli riporta un 10% con vegetazione spontanea (arbusteti e incolti), un 17% con copertura erbacea (prato/pascolo) ed il restante 73% sottoposto a coltivazioni di vario tipo. Questa suddivisione ed anche la possibile diversa classificazione all'interno della categoria dei suoli coltivati, andrebbe considerata ai fini di una corretta attribuzione dei valori di C alle singole classi di uso/copertura del suolo. Lo studio di immagini multispettrali da satellite, dalle quali estrarre opportuni indici vegetazionali (e.g. NDVI) correlabili con il fattore C, costituisce una fondamentale implementazione del modello. Le verifiche condotte utilizzando immagini Landsat hanno permesso di stimare che il fattore C assumerebbe realisticamente un valore di 0,55, inferiore quindi ad 1 e che produrrebbe un valore finale di erosione coerente con i dati ottenuti con le altre metodologie.

A queste considerazioni bisogna inoltre aggiungere altre riguardanti altri aspetti di incertezza legati all'uso di un modello che prevede procedure molto precise e rigorose. Il primo riguarda il modo con cui è stato determinato il fattore R. La metodologia prevede infatti l'accurata elaborazione dell'erosività della pioggia, in termini di energia cinetica per ciascun evento erosivo, a partire da misure di pioggia ad alta risoluzione ed a brevi intervalli temporali. La relazione semplificata qui adoperata, implica un notevole grado di approssimazione nella determinazione di R, ma rappresenta, d'altra parte, una scelta obbligata per ovviare alla mancanza di dati.

L'altro aspetto di incertezza è legato al fattore K. L'erodibilità del suolo è il prodotto di complesse interazioni tra le proprietà fisiche, chimiche e mineralogiche del suolo e diversi meccanismi di erosione agenti contemporaneamente ed ognuno con diverso grado rispetto alle singole proprietà del suolo. Pertanto, è improbabile che poche caratteristiche fisiche, quali la semplice granulometria, possano essere in grado di descrivere accuratamente il valore di K. Anche in questo caso, tuttavia, la difficoltà nel reperire dati di maggior dettaglio ci ha costretto ad adoperare una relazione semplificata, pur con il relativo grado di approssimazione.

8.3 Modello statistico

L'applicazione del nostro modello statistico (eq. 3.3.5) al bacino idrografico del Comunelli non ha fornito un esito soddisfacente, dato il notevole scarto fra il valore del trasporto torbido calcolato e quello corrispondente al volume di sedimentazione misurato (97%). Mentre, nel caso dell'Irminio, il divario è risultato più contenuto, ma comunque piuttosto alto (48%).

Si è osservato, tuttavia, che semplicemente impiegando come terza variabile, insieme con area e perimetro del bacino, parametri diversi dall'indice di erosione (come densità di drenaggio, indice di anomalia gerarchica ecc.), si possono ottenere risultati molto migliori, nella previsione del trasporto torbido dell'Irminio (scarti dal 3% all'11%). Anche con l'utilizzo della sola area, come unica variabile della regressione, nel caso di questo bacino si ottiene uno scarto di appena il 3%, mentre nel caso del Comunelli le differenze sono sempre superiori al 90%.

Risultati del tutto analoghi si sono ottenuti applicando i modelli statistici di Ciccacci et al. [26] e di Cannarozzo & Ferro [20], dopo aver ricalibrato le relative formule in base agli stessi dati adoperati nella nostra analisi di regressione. Nel caso del Comunelli, i residui sono sempre rimasti molto elevati, mentre nell'Irminio sono risultati contenuti entro il 9-17 %.

C'è da dire che, dal punto di vista della significatività statistica, i modelli di Ciccacci et al. [26] non soddisfano però i criteri minimi, relativamente al campione di 16 bacini da noi considerato, dato che sono caratterizzati da coefficienti di determinazione estremamente bassi (R^2 da 0,02 a 0,2) ed indici F da 0,21 a 0,78. Il modello di Cannarozzo & Ferro [20], si comporta meglio ($R^2 = 0,57$ ed indice $F = 0,004$), ma presenta comunque uno scarso livello di attendibilità. I modelli regressivi da noi messi a punto sono invece tutti caratterizzati da un elevato livello di attendibilità.

La povertà dei risultati nel caso del Comunelli e la generale differenza di comportamento tra i due casi di studio è dovuta con ogni probabilità al diverso regime idrologico dei corsi d'acqua considerati che determina la diversa rispondenza dei due bacini nei confronti del modello di correlazione statistica. Infatti, in molti dei corsi d'acqua siciliani il trasporto solido più rilevante si verifica durante le piene (Cannarozzo & Ferro, 1987; 1988a). In occasione di queste, i sedimenti depositati in alveo possono essere rimobilizzati o può verificarsi l'erosione dell'alveo stesso e ciò determina un intervallo di valori del trasporto molto ampio. Tale ipotesi coincide con quanto effettivamente osservato in occasione di alcuni eventi nel torrente Comunelli dove, in corrispondenza di alcuni tronchi fluviali, è stato rilevato il fenomeno del sovralluvionamento [52]: questo, a sua volta, è suscettibile di alimentare il trasporto nelle piene successive. Inoltre sono stati documentati eventi di piena, avvenuti nell'inverno del 1991, che giunsero a vanificare i lavori, già in fase di esecuzione avanzata, di sistemazione idraulico-forestale del bacino, a difesa del serbatoio dagli apporti solidi. Lo studio di intervento di variante ai lavori già avviati, commissionato ad hoc dal Consorzio di Bonifica, riporta infatti che le opere di brigliatura e di difesa di sponda mediante gabbioni, messe in opera lungo la rete idrografica, si erano rivelate inadeguate a fronte di una capacità e dinamicità del trasporto solido, da parte del torrente, di notevole entità.

In una situazione di variabilità meno ampia, come può essere quella del fiume Irminio, un modello statistico di valutazione ha maggiori probabilità di dare buoni risultati. Ecco perchè, in questo caso, si verifica una migliore corrispondenza fra il valore del T_u calcolato e quello osservato.

D'altra parte, essendo le formule da noi ricavate basate sull'analisi statistica di un numero limitato di osservazioni, la loro applicazione a casi diversi da quelli compresi nel campione, soprattutto se il loro comportamento idrologico si discosta sensibilmente da quello medio del campione, è probabile che non possa produrre risultati accettabili.

Le formule di previsione del trasporto in sospensione come quelle da noi messe a punto, possono quindi essere in grado di prevedere solo il trasporto ordinario ed esprimere solo una quota parte del trasporto effettivo di piena e, conseguentemente, della sedimentazione verificabile all'interno dei serbatoi.

A tale proposito, Cannarozzo & Ferro (1987), utilizzando alcune formule di correlazione per la stima del valore medio annuo del T_u , messe a punto per i tre versanti dell'isola (settentrionale, sud-occidentale ed orientale), e confrontando i dati ottenuti con i valori di interrimento osservati in 17 serbatoi siciliani, rilevarono che in 11 dei casi da loro osservati solo il 10% dell'interrimento risultava prevedibile attraverso il dato di trasporto in sospensione, in 4 serbatoi la percentuale superava il 30%, mentre solo in un caso si raggiungeva il 50%.

Bibliografia

- [59]. Cannarozzo M., Ferro V. (1987). Sull'interrimento dei serbatoi artificiali. Istituto di Idraulica, Univ. di Palermo, 16 pp.
- [60]. Cannarozzo M., Ferro V. (1988a). Il problema dell'interrimento dei serbatoi artificiali. Idrotecnica, n. 5, 381-391.

9. CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati ottenuti e delle considerazioni espresse riguardo ai limiti ed all'efficacia delle singole metodologie, è possibile trarre le conclusioni in merito al raggiungimento o meno degli obiettivi prefissati.

Innanzitutto, l'ipotesi di partenza, relativa alla individuazione delle Unità di Paesaggio che dovrebbero essere caratterizzate da omogeneità di comportamento rispetto al modello di deposizione e trasferimento del ^{137}Cs , non è stata verificata.

D'altro canto, la metodologia radioisotopica ha consentito di pervenire ad una stima della perdita di suolo a scala di bacino congruente con il dato osservato.

Ciò induce a ritenere che la misura del contenuto in ^{137}Cs e l'utilizzo di adeguati modelli di conversione siano effettivamente in grado di rendere conto dei processi erosivi (e deposizionali) avvenuti sui versanti, anche a scala di bacino idrografico ed utilizzando un numero minimo di campioni di suolo (in proporzione, ci si è basati sulle risultanze di 1 campione ogni 2 km²).

A sua volta ciò implica che, teoricamente, potrebbe essere sufficiente impiegare una maglia di campionamento di queste dimensioni, senza dover considerare le caratteristiche morfologiche, tessiturali e di uso del suolo, come si è fatto per l'elaborazione delle Unità di Paesaggio.

In realtà, questo criterio ha permesso di prelevare campioni rappresentativi dei diversi caratteri morfologici, tessiturali e di uso del suolo osservabili all'interno del bacino, comprensivi delle varie situazioni, dalle più "conservative" a quelle più "estreme", per quanto riguarda la suscettibilità all'erosione. Come tali, i risultati ottenuti per singolo campione dovrebbero fornire una misura della variazione e dell'intervallo di valori di erosione che caratterizzano il bacino stesso. Pertanto, la loro interpolazione dovrebbe fornire una misura abbastanza attendibile del valore medio dell'erosione a scala di bacino. Diversamente, un campionamento effettuato in base ad un grigliato a maglia larga, delle dimensioni prima citate, non potrebbe di per sé garantire la significatività e la rappresentatività dei risultati, col rischio di sovrastimare o sottostimare il dato di erosione riferito a scala di bacino.

È chiaro che la conferma di questa ipotesi può venire solo dalla contro-prova sperimentale, utilizzando, nella medesima area di studio, il criterio del grigliato invece di quello basato sulle Unità di Paesaggio, e confrontando i risultati.

La ricerca ha dimostrato, altresì, l'aleatorietà delle formule di correlazione statistica, le quali restano valide per i casi compresi nel campione esaminato e per i periodi cui si riferiscono le misure disponibili, mentre difficilmente si adattano alla variabilità al di fuori del campione stesso. Tuttavia, c'è ancora da fare prima di poter negare l'attendibilità dell'analisi statistica. Innanzitutto un'analisi di dettaglio delle correlazioni tra trasporto torbido e parametri climatici su base temporale mensile e non pluriennale, utilizzando indici climatici che prendano in considerazione gli eventi di pioggia di forte intensità. Inoltre, va valutata l'influenza di parametri "occulti", quali la distribuzione delle pendenze all'interno dei bacini e gli effetti antropici.

Da ultimo, l'allargamento della dimensione campionaria, estendendo l'indagine ad un più ampio numero di bacini, considerando, quindi, come base statistica, tutta l'Italia. Tutte queste sono ulteriori ipotesi di ricerca che potrebbero aiutarci a chiarire meglio la reale efficacia delle formule di regressione.

È invece emblematico il fatto che una migliore previsione della perdita di suolo, in un bacino come quello del Comunelli, possa provenire da un modello come la RUSLE, nato in un contesto geografico totalmente avulso da quello qui considerato. Si è visto, infatti, che una migliore calibrazione del fattore C all'interno del bacino del Comunelli, sulla base di osservazioni di maggior dettaglio sull'uso del suolo reale, confermerebbe l'effettiva utilizzabilità del modello RUSLE a scala di bacino anche in un ambiente mediterraneo semi-arido quale quello siciliano.

Ai fini della verifica della praticabilità della metodologia basata sull'analisi isotopica, il confronto con la RUSLE farebbe concludere che, avendo entrambe le metodologie prodotto risultati comparabili, oltre che validi in assoluto, la seconda sarebbe da preferire a quella isotopica, in quanto di più semplice impiego e di minor costo.

Ciò è vero, però, solo a condizione che si disponga di tutti i dati richiesti: innanzitutto i dati pluviometrici per la determinazione del fattore R, nonché i dati pedologici, quanto meno riferiti alla granulometria dei suoli. Anche la metodologia statistica, d'altra parte, se si riuscisse a dimostrarne l'efficacia, avrebbe come presupposto la disponibilità di dati climatici storici. È ovvio che, in mancanza di tali dati, la metodologia isotopica assume maggior significato, nel momento in cui garantisce lo stesso risultato delle precedenti. Infatti la valutazione dell'erosione in base ai radioisotopi da fall-out è stata impiegata con successo, quale tecnica alternativa, proprio in aree dove i dati conoscitivi territoriali sono molto scarsi, come in Africa.

In conclusione, la ricerca svolta non può essere considerata esaustiva, ma lascia intravedere interessanti possibilità di sviluppo per quanto riguarda le metodologie di valutazione dell'erosione qui messe a confronto. Metodologie che possono essere considerate fra loro validamente alternative, a seconda dei dati disponibili e della dimensione territoriale da trattare.

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu
Copertina: Bruno Giovannetti
Stampa: Primaprint (Viterbo)
Finito di stampare nel mese di ottobre 2006