

Evidenze di modificazioni geoambientali nell'area del Lago di Occhito (Italia meridionale) desunte dall'analisi multitemporale di immagini satellitari

Evidences of geoenvironmental changes in the Occhito Lake area (southern Italy) deduced from multi-temporal analysis of satellite images

LO CURZIO S. (*), RUSSO F. (*)

RIASSUNTO - Vengono presentati i primi risultati di un'analisi geoambientale finalizzata alla valutazione delle modificazioni geomorfologiche di un bacino artificiale, il Lago di Occhito, posto al confine tra le province di Benevento, Foggia e Campobasso. L'analisi è stata condotta integrando dati satellitari multitemporali con quelli desunti da ortofoto e documenti cartografici, gestiti in ambiente GIS. I risultati conseguiti hanno evidenziato che nel periodo 1999-2002 l'area lacustre ha subito profonde modificazioni geomorfologiche della linea di costa con evidente variazione perimetrale dovuta alla crescita progradazionale degli apparati di foce dei principali immissari del lago, di cui il principale è il Fiume Fortore. Queste modificazioni geoambientali dell'area bacinale in tempi così brevi rappresentano un sicuro elemento di pericolosità che inficia, a causa del rapido interrimento, il funzionamento del sistema diga con conseguenti gravi ripercussioni socio-economiche.

PAROLE CHIAVE: telerilevamento, geomorfologia, modificazioni ambientali, Lago di Occhito, Olocene.

ABSTRACT - In this paper, are showed the preliminary results of a study which aims to evaluate the geomorphological changes of an artificial basin (the Occhito Lake) located in Southern Apennines (Italy) between the Provinces of Benevento, Campobasso and Foggia. The analysis has been carried out integrating multi-temporal Landsat data with ones from aerial photographs and topographic maps, managed in GIS environment. The results obtained highlighted that in the 1999-2002 time interval the lacustrine area has deeply

underwent geomorphological modifications of coastline with a strong restriction of lacustrine perimeter due to the progradational growth of deltaic apparatus of the main tributary rivers. These geoenvironmental modifications in a so very brief time represents a element of sure hazard, due to the rapid infilling, which is leading a bad working of the Occhito dam system with heavy local social-economic consequences in term of risk.

KEYWORDS: remote sensing, geomorphology, environmental changes, Occhito Lake, Holocene.

1. - INTRODUZIONE

Al fine di una corretta gestione del territorio e delle relative risorse, è necessaria una approfondita conoscenza delle dinamiche naturali ed antropiche che in esso avvengono e che sono spesso in grado di compromettere, in maniera talora irreversibile, la disponibilità e/o la fruibilità delle risorse naturali (acqua, suolo, etc.). La sempre maggiore estensione delle aree degradate o a rischio rende spesso improponibile il monitoraggio delle georisorse soprattutto se questo si basa esclusivamente sulle tradizionali tecniche di rilevamento di campo che richiedono tempi lunghi e costi elevati. Per ovviare a

(*) Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali, Università degli Studi del Sannio, Via Port'Arsa 11, 82100 Benevento
E-mail: locurzio@unisannio.it

questi inconvenienti e rendere la ricerca ed il monitoraggio più rapidi e meno onerosi è possibile ricorrere all'uso di strumenti e tecniche messi a disposizione dalle moderne tecnologie di rilevamento, analisi ed elaborazione dei dati territoriali. Tra questi strumenti e tecniche, in particolare, sicuramente il Telerilevamento è tra i più apprezzati, perché permette l'acquisizione di numerosi dati territoriali e consente di monitorare ed analizzare ampie superfici con vari gradi di risoluzione sia spaziale che temporale. Inoltre, un ruolo di primo piano compete sicuramente anche ai *software* GIS (Sistemi Informativi Geografici) che sono in grado di modellizzare tridimensionalmente le aree investigate, mediante la creazione di modelli digitali, e di effettuare analisi spaziali quantitative dei dati.

In questa nota, tecniche di telerilevamento e di GIS vengono utilizzate al fine di evidenziare ed analizzare le modificazioni geoambientali dell'area intorno all'invaso artificiale del Lago di Occhito, realizzato al confine tra Campania, Puglia e Molise (fig. 1). L'area di studio è stata scelta in quanto il lago costituisce localmente una preziosa georisorsa, essendo la principale fonte di approvvigionamento idrico in un con-

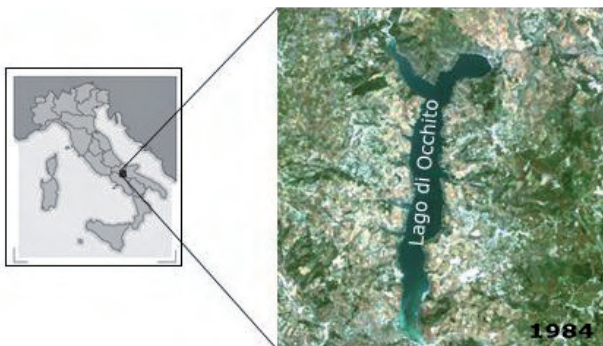


Fig. 1 - Ubicazione geografica dell'area di studio con immagine Landsat TM (a colori reali) dello stato dei luoghi al 1984.
- Geographical location and 1984 Landsat TM (true colors) image of the study-area

testo a forte vocazione agricola, ma caratterizzato da elevato dissesto idrogeologico.

Lo studio è stato effettuato integrando i dati derivanti dall'analisi di foto aeree e di immagini Landsat 7 ETM, acquisite tra il 1999 ed il 2002; per l'estrazione del contenuto informativo delle immagini multispettrali, è stato utilizzato il *software* ENVI 4.0 ed è stata valutata, attraverso un'analisi multitemporale, la variazione di tali informazioni in chiave geoambientale.

L'analisi e l'elaborazione delle informazioni territoriali estratte evidenzia una situazione di

continua e disomogenea modificazione fisiografica dell'area bacinale. In particolare, si osserva una chiara tendenza alla progradazione degli apparati di foce con conseguente riduzione della superficie bagnata, probabilmente imputabile tanto all'abbassamento, anche minimo, del livello dell'acqua nel lago quanto all'apporto cospicuo e discontinuo di sedimenti da parte degli immissari in occasione di eventi di piena. Una tale tendenza fa prospettare una situazione di possibile pericolosità ambientale che rischierebbe di compromettere irreversibilmente il funzionamento del sistema-diga, con conseguenti gravi ripercussioni sulla non solida economia locale.

2. - AREA DI STUDIO: GENERALITÀ

L'area di studio, che ricade intorno al lago artificiale di Occhito, è ubicata a cavallo dei limiti amministrativi delle regioni Puglia, Molise e Campania in Italia meridionale (fig. 1), a quote comprese tra 125 m e 775 m s.l.m.

Il substrato geologico dell'area (JACOBACCI *et alii*, 1967) è costituito da sedimenti terrigeni di età miocenica (Flysch dauno) rappresentati, dal basso verso l'alto, da alternanze di livelli sabbioso-arenacei ed argilloso-marnosi cui sono stratigraficamente sovrapposte arenarie con intercalazioni conglomeratiche e pelitiche. Nella successione, a più altezze stratigrafiche, si rinvengono, interposte, estese lenti di argille scagliose e marne policrome dell'Unità tettonica delle Argille Varicolori (Cretaceo-Eocene?). L'intera successione è pervasa da una diffusa fratturazione diaclasica e da faglie dirette, di probabile età plio-pleistocenica, che tagliano strutture compressive più antiche caratterizzate da pieghe simmetriche ed asimmetriche a stretto e largo raggio di curvatura. Su questo complesso substrato poggiano, per alcuni metri, depositi alluvionali quaternari ghiaioso-sabbiosi del Fiume Fortore e colluvioni di età olocenica.

Dal punto di vista geomorfologico l'area è caratterizzata da rilievi collinari a debole pendenza e con versanti lunghi ed irregolari con marcate e ripetute concavo-convessità: tracce inequivocabili dei processi morfogenetici agenti (fenomeni franosi) e responsabili del loro modellamento. La forte propensione al dissesto idrogeologico è dovuta esclusivamente alle scendenti caratteristiche litotecniche dei sedimenti argilloso-marnoso-conglomeratici affioranti nell'area, favorita anche dall'azione erosiva spondale del Fiume Fortore, caratterizzato da

un regime idrologico di tipo torrentizio, e dei suoi affluenti nonché da negative pratiche antropiche connesse allo sfruttamento agricolo dell'area. A luoghi i versanti sono raccordati al fondovalle fluviale mediante una poco estesa superficie terrazzata costituita da depositi alluvionali pleistocenici.

Nell'area di studio ricade il Lago di Occhito: un lago di sbarramento artificiale dovuto alla presenza di una diga in terra che interrompe il percorso fluviale dell'alta valle del Fiume Fortore. La superficie del bacino imbrifero sotteso dalla diga è di 1.012 km². La superficie lacustre è di circa 13 km²; la capacità, con livello alla quota di massima ritenuta di 198 m s.l.m., è di 333 milioni di m³.

I suoli presenti nell'area (BUONDONNO *et alii*, 1989) sono principalmente Vertisuoli, Inceptisuoli vertici ed Entisuoli (*sensu* USDA, 1992): i primi due dominano le aree a litologia argilloso-marnosa, mentre gli Entisuoli sono particolarmente frequenti in quelle a substrato sabbioso-arenaceo ed alluvionale. Lo sviluppo di questi suoli è compatibile tanto con le caratteristiche litologiche dell'area che con quelle termo-pluviometriche segnate da un clima con marcata stagionalità: inverni lunghi, freddi e umidi e stagione estiva calda e secca. Il seminativo è la tipologia d'uso del suolo più diffusa.

3. - MATERIALI, METODI ED ELABORAZIONE DEI DATI

Per la realizzazione di questo studio sono stati usati dati telerilevati, dati ancillari e diversi *softwares* (ENVI 4.0, ESRI ArcView 3.2a ed *utilities*) di gestione ed elaborazione dei dati. I primi constano di dati satellitari, multispettrali e multitemporali, e di ortofoto digitali a colori. I dati satellitari sono stati acquisiti dal sensore Landsat 7 ETM nei seguenti periodi: 16/08/1999, 18/08/2000, 05/08/2001 e 21/06/2002. Le ortofoto digitali a colori in scala 1:10.000 sono relative al volo del 1999.

I dati ancillari sono costituiti dalla carta topografica, dalla carta geologica e dal Modello Digitale del Terreno (DTM). Gli aspetti topografici sono stati derivati dalla Carta Topografica d'Italia alla scala 1:25.000 dell'Istituto Geografico Militare. Gli aspetti geologici sono stati desunti dai relativi fogli, in scala 1:100.000, della Carta Geologica d'Italia del Servizio Geologico Nazionale. Il Modello Digitale del Terreno (DTM) è stato realizzato elaborando i dati ricavati dalle curve di livello con equidistanza

25 m e dai punti quotati riportati nella Carta Topografica d'Italia in scala 1:25.000.

Gli strumenti *software* utilizzati per la gestione e l'analisi dei dati sono: ESRI ArcView 3.2, come *software* GIS di base, estensioni *3D Analyst*, per la creazione del DTM, e *Spatial Analyst*, per le analisi spaziali. Le elaborazioni dei dati satellitari sono state eseguite per mezzo del *software* ENVI 4.0.

Le ortofoto sono state acquisite con una risoluzione di 300 dpi (*dots per inch*) e la loro registrazione è avvenuta attraverso l'inserimento di 20 GCP (*Ground Control Points*) per ciascuna immagine, le cui coordinate sono state ricavate dalla carta topografica della zona.

Il primo trattamento dei dati satellitari è consistito nella procedura di georeferenziazione dell'immagine Landsat 7 ETM del 2000, al fine di realizzare una buona corrispondenza geometrica tra l'immagine satellitare e lo stralcio di Carta Topografica d'Italia in scala 1:25000 che la rappresenta, presa come base di riferimento. A tale scopo sono stati introdotti 15 GCP riferiti al sistema di coordinate UTM, *datum* WGS84, zona 33 N. Attraverso i GCP, il sistema di riferimento interno dell'immagine satellitare è stato riportato su quello cartografico scelto come riferimento. Gli altri dati Landsat (1999, 2001 e 2002) sono stati georeferenziati attraverso una registrazione *image-to-image* usando il dato Landsat ETM 2000, precedentemente georeferenziato, come immagine di riferimento.

Le immagini Landsat sono state analizzate attraverso la composizione di bande relative ai diversi tempi e successivamente confrontate con le ortofoto digitali a colori e con la cartografia topografica della zona.

Le metodologie di analisi qualitative adottate sono quelle tipiche del confronto tra dati multitemporali (*change detection*) che enfatizzano i cambiamenti temporali in albedo e/o riflettanza degli oggetti geografici presenti nell'area (HILL *et alii*, 1995a). Purtroppo, questa metodologia non è scevra di limitazioni (HILL *et alii*, 1995b): infatti, è noto che l'analisi multitemporale dei cambiamenti potrebbe essere inefficiente da effetti radiometrici dovuti ai differenti tempi di acquisizione delle immagini cui è connessa l'incertezza della costanza dello stato dell'atmosfera, dell'illuminazione e delle sfasature nella calibrazione del sensore. Per effettuare l'analisi di *change detection*, in accordo con quanto proposto da SINGH (1989), sono stati ottenuti i due seguenti approcci fondamentali: 1) è stata effettuata l'analisi comparativa dei

dati delle classificazioni, prodotte indipendentemente e per tempi diversi; 2) è stata effettuata l'analisi simultanea dei dati multitemporali.

I dati ottenuti, nel loro complesso, sono stati fatti oggetto di un Sistema Informativo Geografico (GIS) mediante il quale è stato possibile effettuare analisi spaziali per tempi diversi. Il procedimento ha permesso la realizzazione di varie cartografie tematiche e previsionali informatizzate da cui si evincono le modificazioni spazio-temporali dell'assetto fisiografico dell'area intorno all'invaso artificiale.

Per la preparazione dei dati alla successiva fase di interpretazione, è stata usata una tecnica di visualizzazione dell'immagine composita, nota come *Multy-data visual composite image change-detection* (WICKWARE & HOWARTH, 1981). Si tratta di una tecnica di analisi multitemporale in grado di creare un'immagine composita nell'intervallo spettrale rosso-verde-blu (RGB) (fig. 2).

Nel nostro caso, l'immagine composita è stata ottenuta combinando opportunamente le tre bande: la banda TM3 (immagine dell'anno 1999) nel Rosso, la banda TM2 (immagine dell'anno 2001) nel Verde e la banda TM1 (immagine dell'anno 2000) nel Blu, ossia:



Fig. 2 - Composita (RGB) delle immagini degli anni 1999, 2000 e 2001. Sono evidenti le aree di emersione (1, 2, 3 e 4) dell'apparato di foce del Fiume Fortore. I settori cerchiati individuano situazioni analoghe di emersione per l'apporto sedimentario anche degli immissari minori.
- Composite image (RGB) from 1999, 2000 and 2001 images. The emergence areas (1, 2, 3 and 4) of the Fortore River outlet are clearly shown. The circled sectors locate similar emergences due to sediments deposition from minor tributaries.

$$RGB = TM3_{1999} \quad TM2_{2001} \quad TM1_{2000}$$

Lo stesso procedimento è stato effettuato confrontando l'immagine Landsat del 2002 con quella del 2001, realizzando così una nuova composita (fig. 3) ottenuta combinando opportunamente le tre bande: la banda TM3 (immagine dell'anno 2002) nel Rosso, la banda TM2 (immagine dell'anno 2002) nel Verde e la banda TM1 (immagine dell'anno 2001) nel Blu, ossia:

$$RGB = TM1_{2001} \quad TM2_{2002} \quad TM3_{2002}$$

L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) effettuata sulle quattro immagini satellitari co-registrate, relative ai periodi 1999, 2000, 2001 e 2002 concentra circa il 90% del contenuto spettrale nella prima componente principale (PC1): riducendo così la ridondanza di informazioni. Dopo aver estratto le componenti principali da ciascuna immagine multispettrale, è stata creata nuovamente un'immagine composita (fig. 4), ottenuta combinando le prime componenti principali delle tre immagini relative agli anni 1999, 2000 e 2001: la componente principale PC1 del 2001 nel Rosso, la PC1 del 1999 nel Verde e la PC1 del 2000 nel Blu, ossia:

$$RGB = PC1_{2001} \quad PC1_{1999} \quad PC1_{2000}$$

4. - INTERPRETAZIONE DEI DATI E RISULTATI OTTENUTI

Le immagini composite risultanti dalla applicazione della tecnica di *Multy-data visual composite image change-detection* (figg. 2 e 3) mostrano, in modo veloce ed efficiente, gli evidenti cambiamenti, nei contorni e nella forma, degli oggetti presenti nelle immagini Landsat utilizzate. La scelta della composizione di bande nel solo intervallo spettrale relativo al visibile, è giustificata dalle caratteristiche di trasparenza proprie dell'acqua.

Infatti, nelle bande del blu e verde si riscontra una buona trasparenza da parte dell'acqua, una bassissima riflettività da parte della vegetazione e una altrettanto buona riflettività dei sedimenti.

Con l'applicazione di questa tecnica risultano particolarmente chiare, infatti, le fasi delle variazioni di risposta spettrale dell'area dell'apparato di foce del Fiume Fortore, che sono evidenziate (fig. 2) da aree di diverso colore,

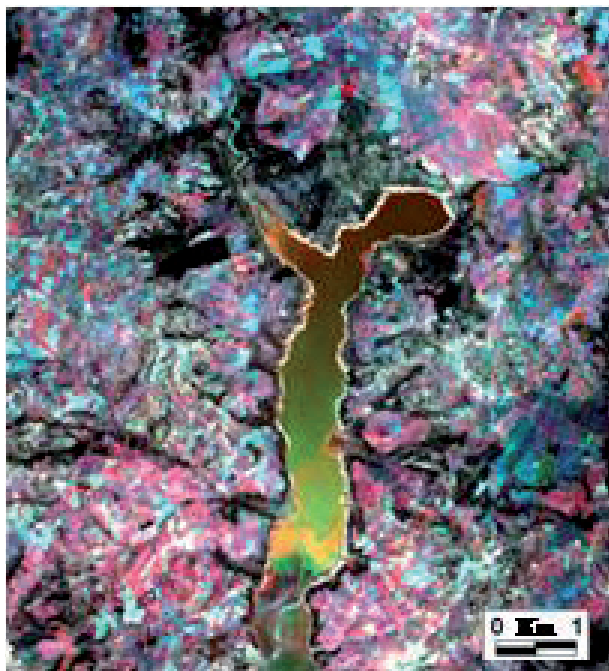


Fig. 3 - Composita (RGB) delle immagini degli anni 2001 e 2002.
- Composite image (RGB) from 1999, 2001 and 2002



Fig. 4 - Composita (RGB) delle prime componenti principali delle immagini degli anni 1999, 2000 e 2001. Vedere il testo per la spiegazione.
- Composite image (RGB) from the first main components of the 1999, 2000 and 2001 images. See the text for explanation.

numerata progressivamente in ordine temporale a partire dalla più antica: l'area-1 contraddistingue zone che nel 1999 erano spoglie e che sono state ricoperte dalla vegetazione spontanea nel 2000; l'area-2 rappresenta la superficie

dei sedimenti depositi nel 2000 e che l'anno successivo sono stati colonizzati dalla vegetazione; l'area-3 rappresenta, infine, il sedimento depositosi tra il 2000 ed il 2001 che risulta ancora privo di vegetazione. Inoltre, nell'area-4 è evidente l'effetto combinato delle superfici riflettenti sospese (sedimenti) e del fondale, distorto dal filtraggio selettivo dell'acqua.

Questo dato evidenzia come l'area-4 sia interessata da una spinta sedimentazione, la quale, rimanendo costante il livello del lago, preluderebbe ad una imminente emersione del fondale con ulteriore progradazione dell'apparato di foce del Fortore. Situazioni analoghe, ma di entità ed estensione decisamente minore, sono state registrate anche in altri settori del lago ovvero in corrispondenza dello sbocco nel bacino lacustre di immissari minori: ciò evidenzia la presenza di più *focus* sedimentari (cerchiati in bianco in fig. 2) che condizionano l'assetto fisiografico dell'area bacinale.

La realizzazione di una composita delle componenti principali (fig. 4) è stata di ausilio per distinguere nettamente la superficie occupata dall'acqua (di colore nero) da quelle in cui il sedimento predomina o si trova stabilmente in ambiente subaereo; inoltre, si rileva più nettamente la quantità di superficie emersa o progradata annualmente (fasce 1, 2 e 3 di colore diverso).

Nella figura 3, che mostra la composita (RGB) delle immagini degli anni 2001 e 2002, si rileva una inversione netta nella tendenza rispetto alla precedente situazione (fig. 2). Infatti, le aree emerse fino al 2001 sono per buona parte nuovamente sommerse o chiaramente in dominio subacqueo. Un tale fenomeno è palesemente consequenziale all'innalzamento del livello dell'acqua nell'invaso artificiale: un fatto imputabile a vari motivi, sia naturali che antropici, non facilmente investigabili. Con l'ausilio di tecnologie GIS, è stata effettuata un'analisi spaziale dei dati consistente nella quantificazione delle superfici occupate dall'acqua, desumibili dalle immagini del 1999, 2000, 2001 e 2002.

Nella figura 5 sono mostrate le variazioni della linea di costa del lago artificiale di Occhito relative alle variazioni altimetriche del livello del lago ed alle presumibili progradazioni deltizie degli immissari, tra cui l'apporto più rilevante è dato dal Fiume Fortore. Quest'analisi ci ha permesso di stimare (tab. 1) il perimetro del bacino lacustre e l'area occupata dall'acqua nei vari momenti documentati dalle immagini satellitari utilizzate. Quantitativamente si rile-

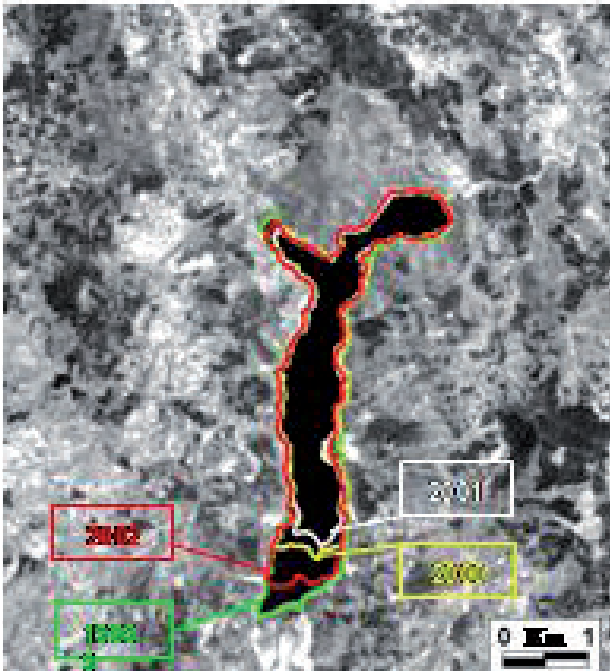


Fig. 5 - Immagine Landsat ETM del 1999 presa nella banda 4 (infrarosso vicino) su cui sono riportate le variazioni della linea di costa del Lago di Occhito rilevate nel periodo 1999-2002.
- Landsat ETM image from 1999 taken in band 4 (close infrared) over which the Occhito Lake shoreline changes from 1999 to 2002 are reported.

TAB. 1 - *Variazioni della superficie occupata dall'acqua nel lago nel periodo 1999-2002*
- Changes of the the lake surface in the 1999-2002 period.

Anno	Superficie dell'acqua (ha)	Perimetro del lago (m)
1999	780	23.521
2000	615	20.740
2001	569	19.004
2002	708	21.637

va che il perimetro dell'area lacustre si è modificato in brevissimo tempo e con valori nell'ordine di un chilometro, mentre la superficie del bacino lacustre è variata nell'ordine di qualche centinaio di ettari: una entità di modificazione fisiografica assolutamente non da trascurare se si considera che è avvenuta in soli quattro anni!

5. - CONCLUSIONI

In questo studio sono state utilizzate tecniche di telerilevamento e tecnologie GIS per analizzare le modificazioni fisiografiche di un invaso artificiale, il Lago di Occhito, realizzato al confine tra Campania, Puglia e Molise. Il

bacino lacustre sotteso dalla diga rappresenta per l'area una risorsa geoambientale di fondamentale importanza perché caratterizzata da una forte vocazione agricola. L'esame dei dati ha messo in evidenza una spiccata variazione dell'assetto fisiografico dell'area lacustre, consistente in una sostanziale modificazione della superficie e del perimetro del lago. Tali variazioni sono particolarmente evidenti nell'area di foce degli immissari del lago, specialmente in quella del Fiume Fortore in quanto principale tributario ed oggetto dello sbarramento artificiale.

L'analisi integrata dei dati ha consentito di evidenziare che nel periodo 1999-2002 l'area bacinale, per effetto delle progradazioni degli apparati di foce fluviali in primo luogo, ha subito un sostanziale colmamento che dovrebbe aver comportato una notevole diminuzione del volume dell'invaso artificiale. Questo fatto è particolarmente evidente nelle immagini del periodo 1999-2001. Nell'immagine satellitare del 2002, invece, si osserva una parziale riconquista al dominio subacqueo lacustre di aree precedentemente emerse e colonizzate dalla vegetazione. Ciò viene interpretato come il risultato della progressiva perdita di capacità di volume dell'invaso. Infatti, negli ultimi due anni, tanto la stampa nazionale e locale ("Quotidiano del Molise", domenica 6 marzo 2005) che le osservazioni dirette sul posto testimoniano che, in occasione di episodi di piena ordinaria del Fiume Fortore, il sistema diga è stato tracimato e quindi si è rivelato sostanzialmente incapace di contenere l'onda di piena. Si tratta, quindi, di una sicura pericolosità ambientale che rischia di compromettere irreversibilmente il funzionamento del sistema-diga con conseguenti gravi ripercussioni, in termini di rischio, sulla non solida economia locale.

BIBLIOGRAFIA

- BUONDONNO C., DANISE B., LEONE A.P., TEDESCHI P. & TERRIBILE F. (1989) - *Carta dei suoli della C.M. "Fortore Beneventano"*. Ann. Fac. Agraria, Portici, ser. IV, 23: 20-33.
- HILL J., MEGIER J. & MEHL W. (1995a) - *Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems*. Remote Sensing Reviews, 12 (1-2): 107-130.
- HILL J., SOMMER S., MEHL W., & MEGIER J. (1995b) - *Use of Earth observation satellite data for land degradation mapping and monitoring in Mediterranean ecosystems: towards a satellite observatory*. Environmental Monitoring and Assessment, 37 (1-3): 143-158.

- JACOBACCI A., MALATESTA A., MARTELLI G. & STAMPANONI G. (1967) - *Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000. Foglio 163 (Lucera)*: pp. 49, Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- SINGH A. (1989) - *Digital change detection techniques using remotely-sensed data*. *International J. Remote Sensing*, **10** (6): 989-1003.
- USDA (United States Department of Agriculture) (1992) - *Keys to Soil Taxonomy*. S.H.S.S. Technical Monograph n.19: pp. 537, Pocahontas Press Inc., Blacksburg, Virginia.
- WICKWARE G.M. & HOWARTH P.J. (1981) - *Change detection in the Peace-Athabasca Delta using digital Landsat data*. *Remote Sensing of Environment*, **11**: 9-25.
www.santacroceonline.com/2005/news/mar/1_15/fortore/index3.htm