

TECNICHE DI TELERILEVAMENTO APPLICATE AL RILIEVO GEOMORFOLOGICO NELLE MURGE SUD-ORIENTALI (PUGLIA, ITALIA MERIDIONALE)

REMOTE SENSING ANALYSIS FOR LANDFORM MAPPING IN THE SOUTH-EASTERN MURGE (APULIA, SOUTHERN ITALY)

ANTONELLA MARSICO(*), LUIGI PENNETTA(*), VITO URICCHIO(**) & MICHELE VURRO(**)

(*) Università degli Studi di Bari - Dipartimento di Geologia e Geofisica, Sezione di Geografia Fisica e Geomorfologia

Via Orabona, 4 - 70125 Bari, Italia; lpennetta@geo.uniba.it

(**) CNR-IRSA - Via De Blasio, 5 - 70110 Bari, Italia

RIASSUNTO

È stato condotto uno studio su procedure di telerilevamento finalizzate al riconoscimento di evidenze geomorfologiche. Per testare la validità del metodo è stata scelta un'area delle Murge sud-orientali (Puglia centrale, Italia Meridionale) caratterizzata da forme carsiche superficiali e sotterranee. L'analisi stereoscopica delle foto aeree ha consentito di cartografare le doline mentre la procedura informatizzata di interpretazione di immagini multispettrali ha permesso di cartografare quegli allineamenti superficiali caratterizzati da variazioni di temperatura e umidità. In sostanza il metodo si basa sulla considerazione che le fratture esercitano un'azione di richiamo d'acqua, che conferisce al suolo diversa temperatura e umidità, determinando anomalie che potremmo definire di tipo igrometrico e termico nelle immagini multispettrali. Le fratture, evidenziate dall'analisi multispettrale, sono state confrontate con le evidenze morfologiche e con le direzioni prevalenti di sviluppo delle forme carsiche al fine di verificare l'attendibilità del procedimento. Il confronto fra le direzioni principali di sviluppo delle doline e l'orientamento degli allineamenti superficiali fornisce un quadro più chiaro sull'attività di drenaggio delle doline e sullo sviluppo del carsismo nell'area di studio.

TERMINI CHIAVE: telerilevamento, allineamenti superficiali, sviluppo delle doline, Murge sud-orientali

INTRODUZIONE

La conoscenza dei percorsi preferenziali di deflusso superficiale e di infiltrazione è essenziale per migliorare la gestione delle risorse idriche e la determinazione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee in aree con un forte impatto antropico. Tra i molti studi condotti sulle forme superficiali che favoriscono l'infiltrazione in aree carsiche meritano una citazione quelli di KRESIC, 1995; TRAVAGLIA & AMMAR, 1998; URICCHIO & MASCIOPINTO, 2000; HUNG & BATELAAN, 2003.

Il monitoraggio di aree estese è, peraltro, facilitato da procedure di telerilevamento che consentono di cartografare agevolmente le strutture presenti sul territorio. In particolare, con la fotointerpretazione sono state segnalate le doline, mentre per gli allineamenti superficiali si è fatto ricorso all'interpretazione di immagini multispettrali (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999) del Landsat 5 Thematic Mapper che consentono di ottenere informazioni oltre lo spettro visibile.

ABSTRACT

A study aimed at developing remote sensing procedures capable of recognizing geomorphological features was carried out. Field work was consequently performed in order to test the reliability of the method in an area in the south-eastern Murge (Apulia, southern Italy) characterized by superficial and underground karst development. Aerial photography stereo pairs were used to map sinkholes while a computer-assisted procedure of multispectral image interpretation mapped superficial lineaments characterized by temperature and moisture variations. This method, in particular, is based on the fact that fractures which draw water produce temperature and soil moisture variations in the soil, thus causing hygrometrical and thermal anomalies in a multispectral image. Lineaments highlighted by remote sensing were then compared with ground morphology and the main karst directions to evaluate the reliability of the method. Comparison between the main sinkhole directions and superficial lineament orientations may give a clearer picture of sinkhole drainage activity and karst development in the study area.

KEY WORDS: remote sensing, superficial lineaments, sinkhole development, south-eastern Murge

INTRODUCTION

In order to improve water resource management and studies on groundwater pollution risk in areas with high human impact, knowledge of preferential pathways of surface water and infiltration is essential. Several investigations on karst features favoring seepage have been carried out (KRESIC, 1995; TRAVAGLIA & AMMAR, 1998; URICCHIO & MASCIOPINTO, 2000; HUNG & BATELAAN, 2003).

Remote sensing procedures facilitate the monitoring of vast areas and the mapping of surface features. Sinkhole shapes have been determined through stereoscopic analysis and superficial lineaments have been mapped by computer-assisted multispectral image interpretation (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999), using the Landsat 5 Thematic Mapper, which collects data beyond the visible spectrum.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

Per l'applicazione del metodo è stata scelta una vasta zona dell'Altopiano delle Murge sud-orientali (Puglia centrale). Nell'area di studio, estesa su 478 km², sono presenti evidenze carsiche di rilievo, tra cui le Grotte di Castellana, l'ampia depressione del territorio di Putignano e la parte occidentale del polje detto "Canale di Pirro".

Le Murge (Fig. 1) costituiscono la parte precipua della potente successione carbonatica mesozoica detta Piattaforma Apula. Queste alture sono costituite da un esteso altopiano allungato in direzione NW-SE, inciso da una sella che divide le Murge nord-occidentali, che toccano i 680 m. s.l.m., dalle Murge sud-orientali che non superano i 500 m. s.l.m. (BOENZI & CALDARA, 1991).

Le Murge vedono in affioramento i depositi di piattaforma carbonatica del Cretaceo (AA.VV., 1994).

La serie calcarea mesozoica, nota come "Gruppo dei Calcari delle Murge", è costituita dal "Calcarea di Bari" (Cretaceo Medio) e dal

GEOLOGICAL SETTING OF THE STUDY AREA

The identification of the preferential water flow through remote sensing was carried out in the south-eastern Murge. The study area covers 478 km². It includes different karst features such as the Castellana caves, a big depression in the Putignano territory and the western part of the "Canale di Pirro" polje.

The Murge plateau (Fig. 1) is the central part of the thick carbonate Mesozoic sequence of the Apulian platform. It is constituted by a widespread highland oriented in a NW-SE direction, with a saddle which divides it into the (higher) north-western Murge with a maximum elevation of 680 m. a.s.l. and the (lower) south-eastern Murge with a maximum elevation of about 500 m a.s.l. (BOENZI & CALDARA, 1991).

In the Murge area, Cretaceous carbonate platform deposits outcrop (AA.VV., 1994).

The Cretaceous limestone sequence is known as the "Calcari delle Murge" Group constituted by the "Calcarea di Bari"

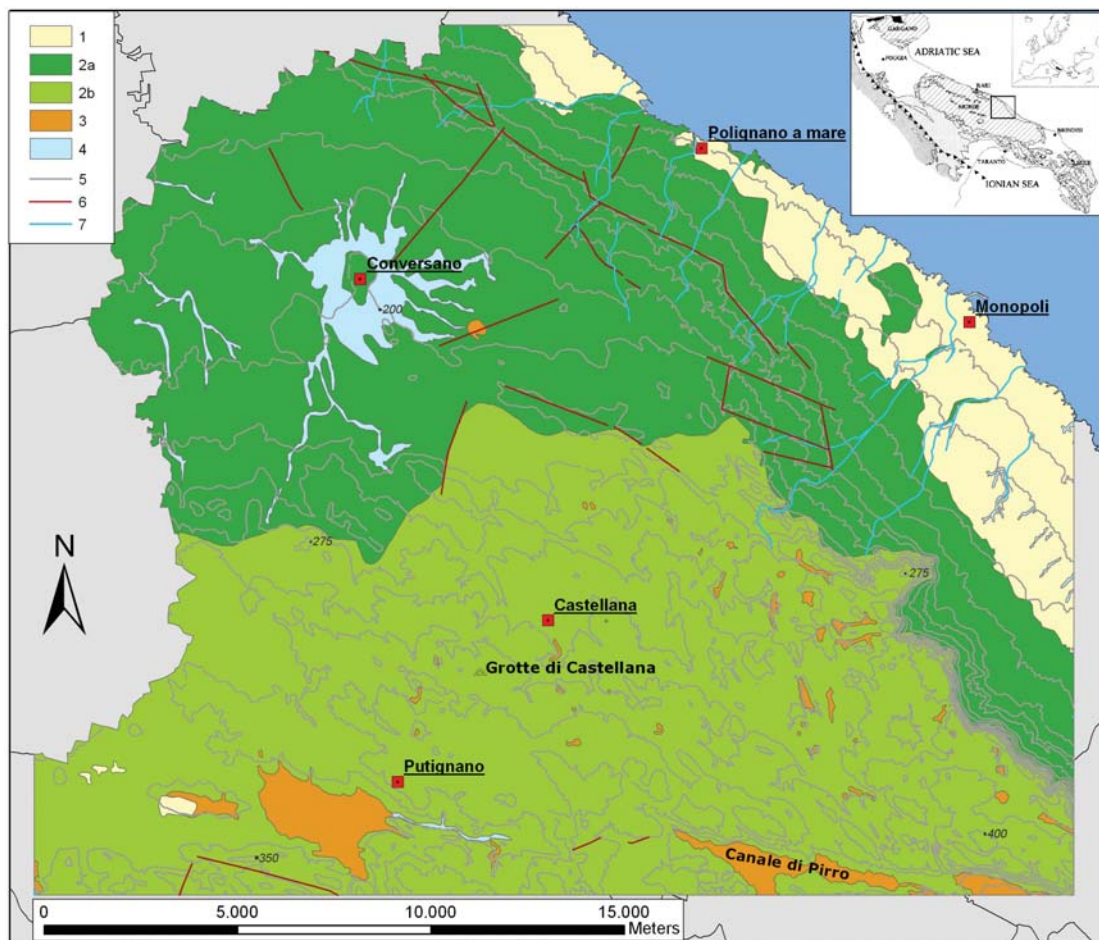


Fig. 1 - Localizzazione e litologia dell'area di studio: 1) calcareniti del Pleistocene, 2) calcari del Cretaceo (a, Calcari di Bari - b) Calcari di Altamura), 3) depositi di terra rossa, 4) depositi alluvionali, 5) curve di livello con intervallo di 25 m, 6) lineamenti principali, 7) linee di drenaggio più importanti
 - Study area location and lithological setting: 1) Pleistocene calcarenites, 2) Cretaceous limestone (a, Calcari di Bari FM - b) Calcari di Altamura FM), 3) terra rossa deposits, 4) alluvium deposits, 5) contour lines with an interval of 25 meters, 6) main lineaments, 7) main network drainage

"Calcare di Altamura" (Cretaceo Superiore). Il contatto fra queste due formazioni è contrassegnato dalla presenza di depositi continentali (bauxiti, sabbie marnose, terre rosse) indicanti la presenza di una lacuna. Nell'area d'indagine, il "Calcare di Bari" affiora estesamente nella parte nord e nord-orientale e ai piedi della cosiddetta scarpata delle Murge (MERLA & ERCOLI, 1971). La formazione è costituita da una potente serie di strati di calcare detritico e da alcuni livelli dolomitizzati mentre il "Calcare di Altamura" è formato da calcari detritici organogeni a grana più o meno fine. Le rocce carbonatiche sono ricoperte da depositi trasgressivi calcarei e calcareo-marnosi del Terziario e del Pleistocene Inferiore noti come "Calcareniti di Gravina". Tali depositi hanno sovente grana fine di colore bianco-giallastro e sono costituiti da detriti calcico-organogeni formati da gusci e frammenti di organismi marini, litoclasti calcarei e prodotti della sedimentazione biochimica di carbonati (IANNONE & PIERI, 1979). Infine, nelle aree depresse, come le doline e le valli fluviali, durante l'Olocene si sono accumulati depositi alluvionali e terra rossa, prodotta dal rimaneggiamento del residuo insolubile delle rocce carbonatiche.

Tettonicamente l'Altopiano delle Murge è un'estesa struttura monoclinale, interessata da faglie dirette, con immersione degli strati a S-SW (CIARANFI *et alii*, 1988). Le faglie orientate NW-SE, che scompongono il substrato carbonatico determinando un esteso horst asimmetrico, sono le principali strutture disgiuntive. Altre direttrici riconoscibili hanno orientamento SW-NE, le più importanti delle quali delimitano l'altopiano sui lati nord-occidentale e sud-orientale. Tali strutture disgiuntive sono impostate su deformazioni plicative più antiche, con direzione WNW-ESE, e sono interessate da serie più recenti di deformazioni con direzione E-W (RICCHETTI, 1980). Queste evidenze tettoniche si sarebbero sviluppate dal Miocene al Pliocene (CIARANFI *et alii*, 1988).

L'Altopiano ospita ambienti idrogeologici molto diversi. La falda idrica è sospesa sull'acqua di intrusione marina che penetra nell'interno. Le differenze idrogeologiche sono correlate agli effetti dell'evoluzione tettonico-carsica sulla permeabilità dei livelli carbonatici e sul sistema acquifero (GRASSI, 1983). La permeabilità nei calcari delle Murge è di circa 10^{-2} - 10^{-5} cm/s, mentre le unità Plio-Pleistoceniche sono caratterizzate da valori di permeabilità di circa 10^{-3} - 10^{-4} cm/s (RADINA & WALSH, 1972). La ricarica avviene solo attraverso le acque meteoriche (precipitazioni medie di circa 550 mm all'anno), concentrate tra l'autunno e l'inverno.

CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE

L'area mostra una morfologia in stretta relazione con la composizione litologica e l'assetto strutturale dei terreni affioranti. L'Altopiano delle Murge si affaccia sull'Adriatico con la scarpata murgiana originata, secondo gli studi di NEBOIT (1975), da uno stress tettonico pre-Calabrian. La scarpata raccorda due superfici diverse: la più alta, situata a 400 m sul livello del mare, occupa gran parte dell'area di studio, eccetto la fascia costiera, che costituisce la parte più bassa.

L'intera area è caratterizzata (Fig. 2) dal carsismo che si imposta

Formation (Middle Cretaceous) and the "Calcare di Altamura" Formation (Upper Cretaceous). The contact between these formations is marked by continental deposits (bauxite, marly sands, "terra rossa") which show the presence of a hiatus. The "Calcari di Bari" Formation widely outcrops in the northern and north-eastern parts of the study area and at the bottom of the Murge escarpment (MERLA & ERCOLI, 1971). This Formation consists of a thick sequence of mostly detrital limestone layers and some dolomite levels, while the "Calcare di Altamura" Formation mainly consists of biogenic fine limestone. The carbonate rocks are overlain by thin transgressive calcareous and marly-calcareous deposits of the Tertiary and Lower Pleistocene, known as the "Calcareniti di Gravina" Formation. It is a generally fine whitish-yellowish sediment constituted by calcareous organic deposits made up of shells and fragments of marine organisms, lithoclasts of limestone and biochemical carbonate sedimentation products (IANNONE & PIERI, 1979). In the Holocene, terra rossa deposits from limestone dissolution and alluvial deposits accumulated in depressed areas, such as sinkholes and river valleys.

The Murge carbonate plateau is a wide monocline, with a S-SW dip direction, dissected by normal faults (CIARANFI *et alii*, 1988). Faults directed NW-SE give rise to a broad step structure giving origin to a wide asymmetrical horst. Other faults are SW-NE-trending and the main ones define the plateau on the north-western and southeastern sides. These structures overlie older WNW-ESE faulting deformations and have more recent E-W faults (RICCHETTI, 1980). These features may have developed between the Miocene and Pleistocene (CIARANFI *et alii*, 1988).

The Murge plateau hosts very different hydrological environments. Groundwater is perched above the intruded seawater. The hydrogeological differences are related to the effects of tectonic-karst evolution on the permeability of the carbonate stratum and on the groundwater system (GRASSI, 1983). The limestones in the Murge area reach values of permeability of about 10^{-2} - 10^{-5} cm/s while the Plio-Pleistocene units have a permeability coefficient of about 10^{-3} - 10^{-4} cm/s (RADINA & WALSH, 1972). Recharge is only due to rainfall (annual mean is about 550 mm), concentrated in the autumn-winter period.

GEOMORPHOLOGICAL FEATURES

The area shows landforms depending on geolithological and structural factors. The Murge plateau is characterized by scarp over the Adriatic sea. According to the study of NEBOIT (1975), it originated by tectonic stress, during the pre-Calabrian age. It joins two different surfaces: the higher one, located 400 m above sea level, occupies the most part of the study area, except the coastal strip, which constitutes the lower part.

The whole area is characterized (Fig. 2) by karst landforms

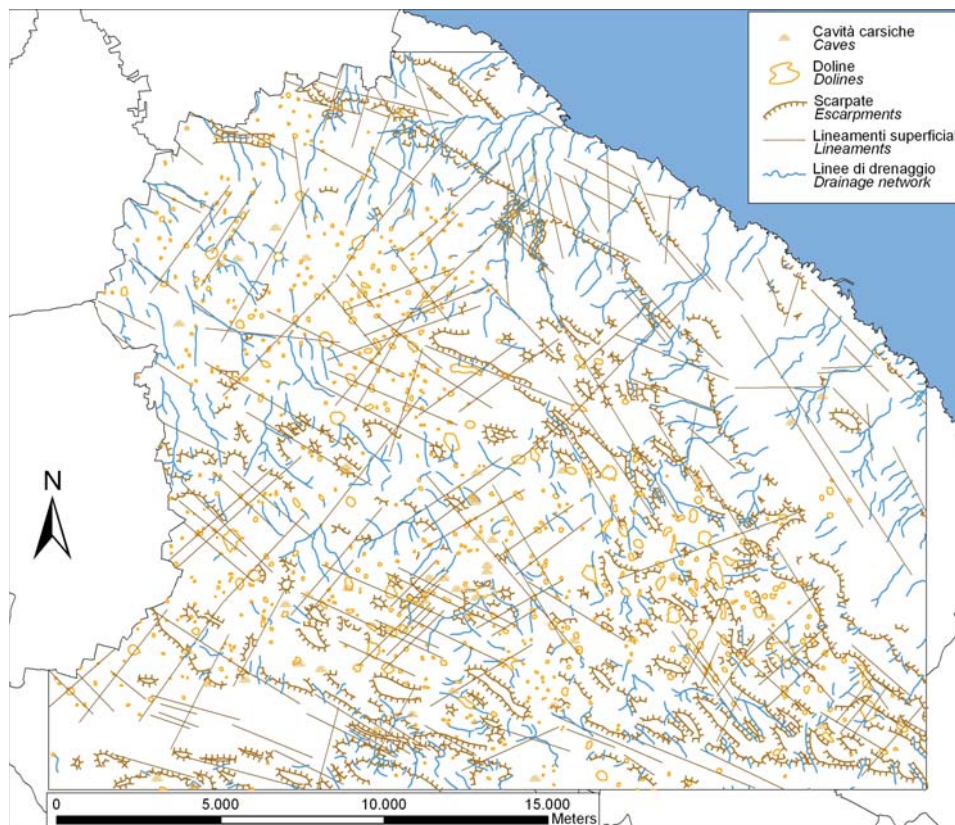


Fig. 2 - Carta geomorfologica della parte meridionale dell'altopiano carbonatico delle Murge realizzata con il telerilevamento
- *Geomorphological sketch of the southern Murge carbonate plateau obtained by remote sensing analysis*

su un sistema di giunti e fratture determinandone l'allargamento per erosione meccanica e chimica.

Le evidenze carsiche si sono formate in risposta a differenti fasi morfogenetiche verificatesi in diversi contesti climatici e strutturali. Le più antiche manifestazioni si sono originate già durante la formazione della piattaforma carbonatica (AA.VV., 1994), condizionate da un clima caldo-umido e da locali innalzamenti del livello di base. Nel terziario si è verificata l'evoluzione di doline, uvala e polje, condizionata dalle discontinuità tettoniche orientate WNW-ESE. Nei sistemi sotterranei si osserva che sull'iniziale sviluppo orizzontale si è imposta una circolazione vadosa (GRASSI, 1982). Durante il Quaternario i fenomeni tensionali hanno controllato lo sviluppo di un nuovo ciclo carsico che ha generato forme molto complesse. I movimenti eustatici hanno condizionato lo sviluppo sotterraneo (BRUNO *et alii*, 1995).

Le doline, legate a fattori strutturali, sono localizzate principalmente sulla superficie più alta; esse sono almeno un migliaio, anche se, per le dimensioni in rapporto alla scala della carta, è stato possibile riportarne circa 700.

L'area è interessata da un reticolo idrografico poco gerarchizzato; le linee di imfluvio, tra loro indipendenti e lunghe di solito poche centinaia di metri, si sviluppano per la maggior parte in direzione N, soprattutto sulla superficie più bassa.

over a joint network causing mechanical and chemical erosion of limestone.

Karst formed in response to several morphogenetic phases which took place in different climatic and structural contexts. The oldest features arose during carbonate platform formation (AA. VV., 1994), influenced by hot-humid climate and local base level uplifting. During the Tertiary, sinkholes, uvalas and poljes developed. This evolution was influenced by faults oriented in a WNW-ESE direction. Underground, a vadose flow developed above the initial horizontal system (GRASSI, 1982). In the Quaternary, a new karst cycle, generated by tectonic deformation, gave rise to complex features. Sea level changes affected the development of the subsoil (BRUNO *et alii*, 1995).

The karst sinkholes, connected to structural factors, are located mainly on the higher surface; they are at least one thousand, but only 700 of them were mapped, because of their small dimensions.

The area has a system of drainage channels, independent and some hundreds of meters long, which developed along the N direction, especially on the lower surface. Hierarchization of the channels is poor, since the drainage network was influenced by superficial karst evolution and there are fluvial captures, dry and dead

La scarsa gerarchizzazione indica un reticolo condizionato dall'evoluzione del sistema carsico epigeo: infatti sono presenti fenomeni di cattura, valli secche e cieche e la sovrapposizione di impluvi recenti che tagliano reticoli fossili

È possibile, peraltro, constatare come il bordo della scarpata delle Murge segua l'andamento degli allineamenti evidenziati in questo lavoro. Altre fratture sono localizzate lungo la direzione di sviluppo delle altre evidenze morfologiche, quali colline e depressioni.

Anche il reticolo idrografico locale è correlabile con allineamenti tettonici: in alcuni casi i solchi erosivi si sviluppano esattamente lungo le fratture, in altri divergono dalla direzione naturale determinata dalla pendenza per adattarsi all'allineamento.

PROCEDURE DI TELERILEVAMENTO

Il telerilevamento consente di interpretare le forme della superficie topografica per la redazione di vari tipi di mappe (come ad es. quelle dell'uso del suolo e della vegetazione, quelle geologiche, quelle ideologiche, ecc.) finalizzate all'analisi fisica integrata ed alla gestione del territorio. In questo lavoro alle osservazioni stereoscopiche è stata abbinata l'interpretazione di immagini multispettrali per facilitare l'analisi delle forme osservate.

Il rilievo delle doline si è basato sulla fotointerpretazione di immagini alla scala 1:33.000, che ha consentito di tracciare la depressione carsica sulla tavoletta IGM in scala 1:25.000. L'osservazione tridimensionale, mediante la visione stereoscopica che determina l'esagerazione della terza dimensione, ha consentito di delimitare in foto aerea ogni depressione concava e la sua planimetria, in genere circolare o ellittica, chiaramente visibile rispetto all'ondulato paesaggio circostante. Come limite della depressione è stata considerata la curva in cui si ha la rottura del pendio (CASTIGLIONI, 1996; FERRARESE *et alii*, 1998) che è stata, quindi, riportata sulla carta topografica. Le doline, infine, sono state disegnate come poligoni sulla carta rasterizzata e implementate in un GIS.

Le linee preferenziali di scorrimento d'acqua caratterizzate da anomalie igrometriche, termiche e morfologiche, sono riconosciute rapidamente con il telerilevamento anche nel caso in cui sono coperte da terreni alloctoni e, quindi, non visibili direttamente. La procedura di interpretazione si basa sulla localizzazione delle fratture mediante la costruzione di uno scatterogramma delle radianze rilevate dal satellite (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999). Il metodo deriva dalla considerazione che le fratture esercitano un'azione di ri-chiamo d'acqua che conferisce al suolo una diversa temperatura e umidità. Questi condizionano la risposta spettrale nelle bande dell'infrarosso e dell'infrarosso termico (quest'ultima era banda 7 in Landsat -3, ora banda 4 in Landsat 4-5) consentendo il riconoscimento delle fratture. Il procesamiento delle immagini da satellite utilizza diversi algoritmi per definire i possibili allineamenti; operando sui numeri digitali (DN) delle frequenze, il metodo utilizza uno scatterogramma per evidenziare i pixel selezionati e ottenere vettori dai risultati. La procedura semiautomatica utilizzata, gestibile attraverso un software di elaborazioni di

valleys, superimposition of recent drainage flows interrupting erosion grooves.

The escarpments bordering the Murge plateau follow the lineaments reported in this paper. Moreover, several lineaments are located along the direction of other morphological features, such as hills and depressions.

Also the local drainage network is related to the lineaments: in some cases the erosion grooves follow the lineaments, in other cases they divert from their natural direction to adjust to the lineaments.

REMOTE SENSING PROCEDURES

Remote sensing procedures are applied for interpretation of the topographic surface and their main applications are mapping (such as land use and soil maps, geological, hydrological and vegetation maps), environmental assessment and landscape analysis.

In this study, stereoscopic analysis and multispectral image interpretation were carried out on the superficial features in order to facilitate their identification. Sinkholes were mapped by means of aerial photograph stereo pairs with a 1:33,000 scale map. This stereoscopic survey made it easy to identify depressions which were plotted on topographical maps (1:25,000 scale map).

The 3D stereoscopic vision, determining vertical exaggeration, made it possible to identify sinkholes in the aerial photographs: the concave-bottomed depressions and the roughly circular or elliptical shapes were clearly visible in the gently sloping landscape. Sinkholes were identified at the rupture of the slope (CASTIGLIONI, 1996; FERRARESE *et alii*, 1998) and then drawn on the topographical map. Sinkholes were drawn as polygons on the raster map and fed to a GIS.

Lineaments, detected by morphological, temperature and water content variations, were rapidly recognized via remote sensing, even when they were covered by soil and vegetation and not directly visible. The localization and interpretation processes of the fractures were based on a scattergram of satellite-detected reflectances (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999). These processes were based on the hypothesis that fractures attracting water produced temperature and soil moisture variations in the soil. These variations were shown by the spectral response in the infrared and thermal bands (the latter being band 7 in Landsat -3, band 4 in Landsat 4-5) which thus permitted to identify fractures. The method requires several algorithms to identify lineaments; operating on the digital numbers (DN) of frequencies, it uses a scattergram to highlight the selected pixels and obtain vectors from the results. The computer-assisted procedure, running on software for digital data interpretation, improves the multispectral image so as to identify those lineaments affected by water flow. The algorithm makes an additive synthesis of bands 4, 5 and 3, which enhances both grey-level spectral responses and contrast

immagini digitalizzate, consente di elaborare l'immagine satellitare ottenendo gli allineamenti interessati dal deflusso idrico.

L'algoritmo effettua la sintesi additiva delle bande 4, 5, e 3 che esalta sia risposte spettrali con tonalità di grigio che il contrast stretching per ottenere una distinzione più netta fra le aree con livelli di umidità differente. Un altro passaggio per il miglioramento dell'immagine è la distribuzione degli istogrammi dei DN in un numero definito di intervalli usando il level slicing. Il metodo è usato con le immagini all'infrarosso termico per evidenziare gli intervalli di temperatura altrimenti codificati da molti livelli di grigio o colori. In questo studio il level slicing è applicato sulle bande 6 e 7 per consentire una maggiore capacità di discernimento dei gradi di umidità. L'operazione di derivazione omnidirezionale in valore assoluto (Er Mapper[®], 1996) adatta allo studio di fenomeni con un alto grado di simmetria come gli allineamenti strutturali (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999). Il passaggio successivo è il calcolo della funzione prodotto fra le bande 6 e 7 per esaltare l'aspetto geometrico del territorio e accentuare il contributo della morfologia all'individuazione degli elementi strutturali, considerando anche l'informazione termica.

L'ultimo passaggio è l'edge enhancement al fine di delineare meglio gli allineamenti e i contorni delle forme. In una immagine gli edge sono i bordi che marcano i cambiamenti fra un'area con valori di DN uniformi e l'adiacente con valori di DN differenti (DRURY, 1993); gli edge sono evidenziati attraverso diversi filtri. Il filtro delle frequenze spaziali utilizzato per evidenziare gli edge in questa procedura è *sharpen2* (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980). Dopo il miglioramento dell'immagine si procede con l'applicazione di metodi di classificazione per determinare gli allineamenti sul territorio. Il metodo di classificazione è basato sullo scatterogramma in cui i pixel sono riportati in un diagramma 2D (le due bande di variazione dei DN sono plottate sugli assi x e y) creando una nuvola di punti della distribuzione della risposta spettrale per ciascuna categoria di copertura (LILLESAND & KIEFER, 2000). Per riconoscere le possibili fratture, l'analisi delle frequenze è realizzata con la costruzione delle risposte spettrali lungo una frattura nota indicata sulla Carta Geologica storica del "Servizio Geologico d'Italia". Il riconoscimento della risposta spettrale si effettua selezionando alcuni pixel sulle fratture principali ben visibili sull'immagine. L'aumento dei valori delle radianze di ciascun pixel registrate viene esaminato per ogni banda di frequenza ottenendo un profilo, rappresentato da una spezzata, che unisce i punti di un grafico (n. banda; radianza). La radianza diventa minima in corrispondenza delle bande 6 e 7. In tal modo la 6 e la 7 diventano bande di riferimento e su un diagramma (scatterogramma) si riportano i valori di radianza di tutti i pixel dell'immagine relative a tali bande (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999).

RISULTATI DEL TELERILEVAMENTO E DISCUSSIONE

Le doline sono state rilevate sulle foto aeree stereoscopiche perché risulta più immediata la distinzione dal paesaggio circostante, anche se tale metodo ha richiesto molto tempo. Le doline sono diffusamente dis-

stretching, in order to obtain a more clear-cut distinction between areas with different degrees of soil moisture.

Another image enhancement step is the DN histogram distribution in a range of established intervals using level slicing. The method is used with thermal infrared range images in order to display temperature ranges otherwise coded by more grey levels or colors. In this study, level slicing was applied to bands 6 and 7 to better determine moisture levels. Then, the omnidirectional derivation in absolute value (Er Mapper[®], 1996) is applied in order to study features with a high degree of symmetry such as structural lineaments (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999). The following step is the multiplication of band 6 and band 7 in order to enhance the geometry and morphology of the soil in the identification of structural features. Thus, thermal data are also taken into account.

The last step is edge enhancement to define lineaments and contours. In a given image, the edges are the boundaries which mark changes from an area of uniform DN values to adjacent ones with different DN values (DRURY, 1993) and the edges are sharpened by means of several filters. The spatial frequency filtering used to highlight edges in this method is filter *sharpen2* (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980).

After image enhancement, use is made of classification methods to determine soil lineaments. The classification method is based on a scattergram whose pixels are shown in a 2D diagram (the two DN variation bands are plotted on the x and y axes) creating clouds of points of the spectral response patterns of each category of cover (LILLESAND & KIEFER, 2000). To recognize fractures, frequency analysis is carried out by mapping spectral response patterns along a known fracture mapped on the historical geological map of "Servizio Geologico d'Italia". The identification of the spectral response patterns takes place by selecting some pixels on the visible fractures on the image. The spectral reflectance increase of each pixel is analyzed for each band in order to get the spectral response pattern which is represented by a broken line joining the points of a graph (no. of band vs radianza). The radianza becomes minimum at bands 6 and 7. Therefore, these bands become the reference bands on the scattergram showing the radianza values of all the pixels in bands 6 and 7 (URICCHIO & MASCIOPINTO, 1999).

REMOTE SENSING RESULTS AND DISCUSSION

The sinkholes were mapped by aerial photographs to better distinguish them from the surrounding landscape, although this method proved to be very time-consuming. The sinkholes, mapped by aerial

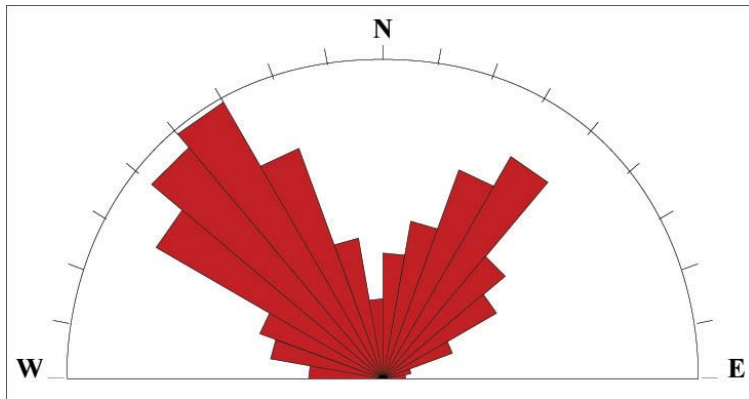


Fig. 3 - Diagramma a rosa che mostra l'orientamento principale delle doline nell'area di studio
 - Rose diagram showing the main sinkhole orientation in the study area

tribuite nell'area (Fig. 2). Ci sono poche doline nella fascia che dai piedi della scarpata arriva al mare, rilevate in corrispondenza delle "Calcareni di Gravina". Un gran numero di doline è, invece, presente sull'altopiano con una forte densità lungo il margine della scarpata.

Le doline possono presentare una sezione che varia da circolare ad una forma oblunga: l'asse principale di tali depressioni è stato individuato per analizzare l'orientamento.

Il diagramma a rosa (Fig. 3) mostra come le doline si sviluppano secondo direttrici appenniniche e anti-appenniniche: principalmente secondo la direzione NW-SE e, quindi, NE-SW. L'orientamento più frequente è N 35° W, ma varia da N 55° W a N 25° W e da N 35° E a N 25° E. La distribuzione e l'orientamento delle doline è determinato da diversi fattori fra cui le caratteristiche litologiche e strutturali della roccia, l'assetto geomorfologico e l'alterazione meteorica.

Le linee preferenziali di discontinuità della roccia sono state evidenziate usando la procedura automatizzata. Questi allineamenti, caratterizzati da maggiore umidità e da contrasto termico, possono essere assimilati a vie preferenziali di scorrimento delle acque che evidenziano le fratture (URICCHIO & MASCIOPINTO, 2000). I risultati dello scatterogramma sono stati trasformati in forma vettoriale per ottenere polilinee georeferenziate implementate in un GIS.

La carta (Fig. 4) mostra che gli allineamenti superficiali sono presenti in tutta l'area di studio, sia nell'altopiano che nella zona costiera. Inoltre, alcune zone presentano addensamenti di fratturazioni raggruppate sia con lo stesso orientamento che ortogonali fra loro. Queste ultime sono le più frequenti nell'area.

L'analisi di telerilevamento evidenzia come gli allineamenti superficiali si sviluppano seguendo le direzioni strutturali come le doline: l'orientamento principale è NW-SE e, subordinatamente, NE-SW. Il diagramma a rosa (Fig. 5) mostra che la direzione N 65° W ha la frequenza maggiore, seguita, in ordine di densità decrescente, da quelle orientate N 55° W, N 45° W e N 35° W.

In particolare, le frequenze di distribuzione più alte dei sistemi di allineamenti cartografati sono situati in corrispondenza di strutture morfologiche. Questa relazione è documentata nella figura 6 in cui il DEM e i sistemi di fratturazioni sono stati sovrapposti. Inoltre, in quelle aree in cui affiora un'unità litostratigrafica carbonatica meno

stereo pairs, proved to be widely scattered over the area (Fig. 2). There are few sinkholes in the area located between the coastline and the bottom of the escarpment, especially where the "Calcareni di Gravina" formation outcrops.

On the other hand, a great number of sinkholes is present in the highland and their highest density is observed along the boundary of the escarpment margin.

The sinkholes are either circular or elongated in one direction: the main axis of these sinkholes was identified to determine their orientation.

The sinkhole rose diagram (Fig. 3) shows that they develop along Apennine and anti-Apennine directions: mainly in a NW-SE and then in a NE-SW direction. The most frequent is the N 35° W orientation but they may range from N 55° W to N 25° W and from N 35° E to N 25° E. The sinkhole distribution and orientation are determined by several factors such as the lithological and structural characteristics of the rock, morphological setting and weathering.

Using a computer-assisted method, the preferential lineaments of probable rock discontinuities were identified.

These lineaments (Fig. 4), showing higher moisture and thermal contrast, can be assimilated to preferential flow lines which can pinpoint fractures (URICCHIO & MASCIOPINTO, 2000).

The scattergram results were converted in vectorial form to get georeferenced polylines to be fed to a GIS. The map (Fig. 4) shows that superficial lineaments are present in the whole study area, both in the highland and in the coastal area. Moreover, in places, some lineaments have greater density and are clustered either with the same orientation or orthogonally to one another. The latter are the most frequent in the area.

The remote sensing analysis highlighted that the lineaments develop according to the structural orientations of the sinkholes: the main directions are NW-SE and, subordinately, NE-SW. The rose diagram (Fig. 5) shows that the N 65° W orientation is the most frequent, followed, in decreasing order of density, by the N 55° W, N 45° W and N 35° W orientations.

In particular, the highest distribution frequencies of the mapped lineaments correspond to certain morphological features. This relationship is documented in Figure 6 where the DEM and lineament



Fig. 4 - Polilinee ottenute dall'analisi dello scattergramma che evidenzia gli allineamenti caratterizzati da elevata umidità e contrasto termico
 - *Polylines obtained from analysis of the scattergram, which shows lineaments with high moisture and thermal contrast*

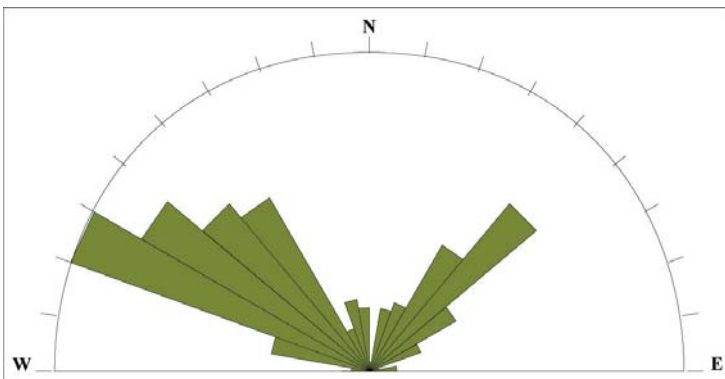


Fig. 5 - Diagramma a rosa degli allineamenti superficiali cartografati con il telerilevamento
 - *Rose diagram of superficial lineaments mapped by the remote sensing method*

compatta e più permeabile, è stata riscontrata una maggiore densità di fratturazioni e di forme carsiche.

Dal momento che nelle rocce carbonatiche le forme carsiche si sviluppano prevalentemente lungo le fratture, a causa dell'infiltrazione, è possibile confrontare gli allineamenti individuati con procedure automatiche con le doline e le grotte rilevate nell'area (MARSICO 2003). Le grotte sono state cartografate implementando i dati riportati dai vari gruppi speleologici.

La relazione tra la direzione degli allineamenti superficiali e le grotte indica che le fratture e le forme carsiche sotterranee si svilup-

system were overlapped. Moreover, in areas in which the weakest and most permeable carbonate litho-stratigraphical units outcrop, higher density of lineaments and karst features was observed.

Since in carbonate rocks karst features mainly develop along fractures, due to water seepage and drawdown, it is possible to compare the mapped lineaments (using a computerized procedure) with the sinkholes and caves occurring in the area (MARSICO, 2003). The caves were mapped on the basis of data reported by speleological teams.

The relationship between the superficial lineament direction and

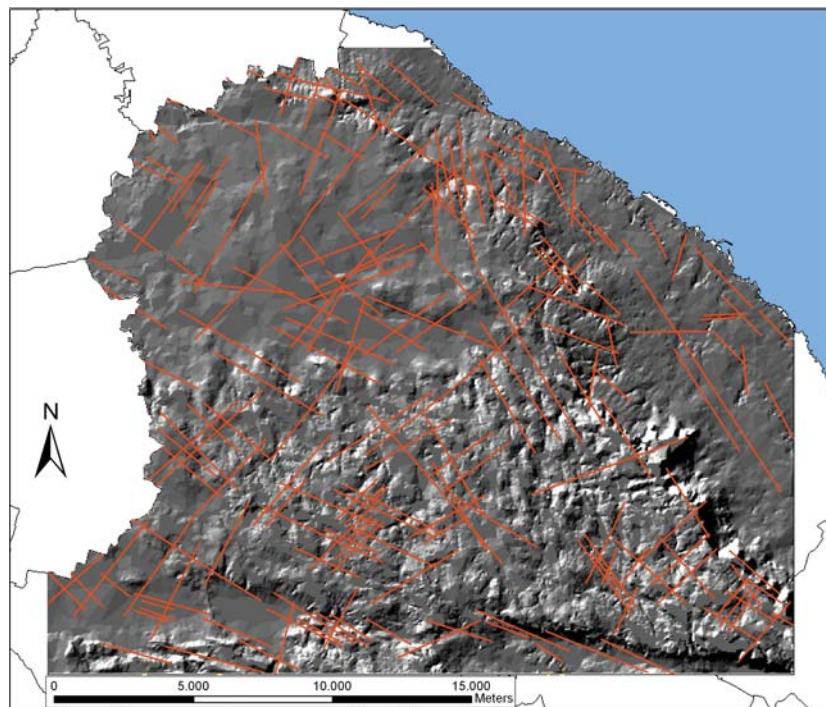
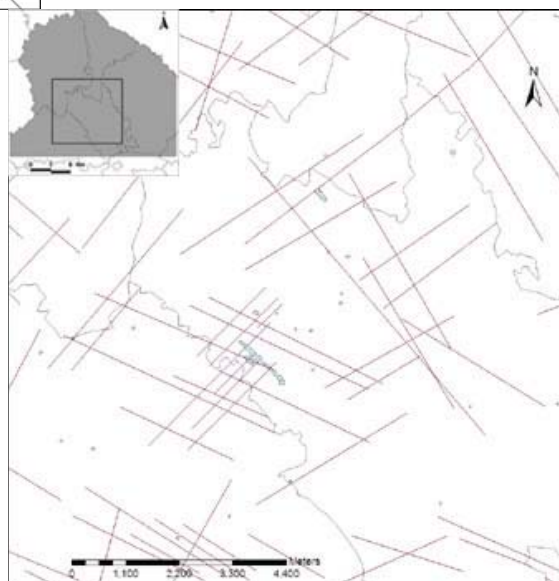


Fig. 6 - DEM dell'area di studio, ottenuto da curve di livello su carta 1:25.000, che evidenzia i principali assetti morfologici e li confronta con le polilinee (in rosso) rilevate con il telerilevamento
 - DEM of the study area (obtained from 1:25,000 map contour lines) and showing the main morphological features vs. polylines (red, mapped by the remote sensing method)

Fig. 7 - Stralcio che mostra le grotte e gli allineamenti superficiali nel territorio di Castellana
 - Sketch showing superficial lineaments and caves in the Castellana area



pano secondo le direttrici Appenniniche (Fig. 7). Un precedente studio di GRASSI (1974), sullo sviluppo delle principali condotte carsiche orizzontali, mostra che nelle Murge sud-orientali la direzione predominante delle fessure da dissoluzione è NW-SE (prevalentemente N 40° W) seguita da quella E-W. L'indagine multispettrale ha evidenziato che la maggiore frequenza corrisponde con alla direzione N 65° W mentre gli allineamenti orientati E-W sono quasi del tutto assenti. Tuttavia, è possibile ipotizzare che gli allineamenti hanno condizionato le grotte che si sono, quindi, accresciute lungo una o, più frequentemente, due linee ortogonali.

the caves suggests that lineaments and underground karst features develop according to the Apennine-trending faults (Fig. 7). A previous study by GRASSI (1974) on the main horizontal karst conduits shows that in the south-eastern Murge the main direction of dissolution fissures is NW-SE (prevalently N 40° W) followed by E-W. The multi-spectral remote sensing study showed that the highest lineament density corresponds to the N 65° W orientation while E-W oriented lineaments are almost absent. Therefore, it can be hypothesized that the lineaments have affected the formation of the caves, which have developed along a single line or, more frequently, two orthogonal lines.

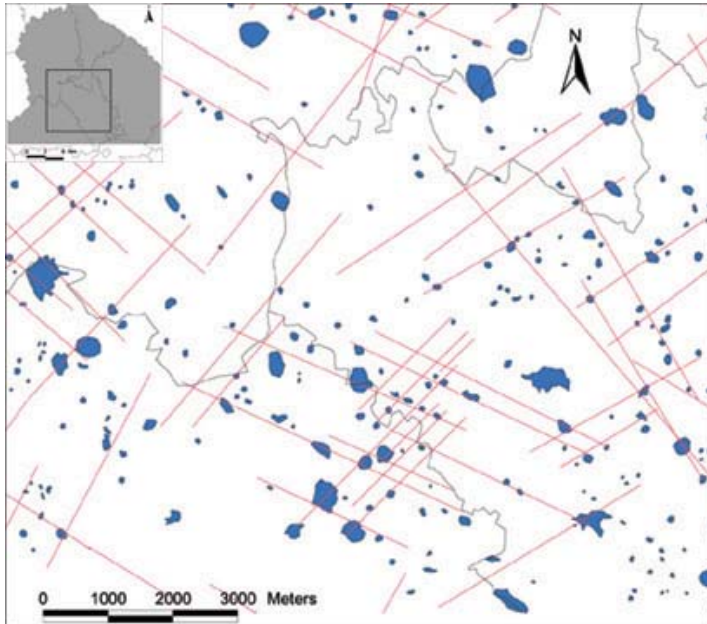


Fig. 8 - Stralcio che mostra le doline allineate lungo le fratturazioni
 - Sketch showing sinkholes aligned along superficial lineaments

Un'analisi dei diagrammi a rosa delle evidenze (Figg. 3 e 5) mostra che le classi di maggiore frequenza delle doline e degli allineamenti non sono esattamente le stesse. Anche se la direzione principale è NW-SE, gli allineamenti evidenziati sono più orientati verso ovest delle doline. Il confronto fra le fratturazioni e le doline (Fig. 8) mostra che le depressioni più ampie sono situate in corrispondenza di zone in cui gli allineamenti si incrociano oppure sono raggruppati.

Nel caso di doline non circolari, la sovrapposizione delle forme carsiche con quelle strutturali evidenzia che l'allungamento delle doline segue la direzione degli allineamenti. Anche dove le fratturazioni non sono evidenti se ne può presupporre la presenza poiché la posizione delle doline segue una direzione definita: in alcuni casi, la linea che unisce l'asse maggiore delle doline si raccorda con l'allineamento messo in luce della procedura di telerilevamento.

CONCLUSIONI

In quelle aree in cui gli allineamenti sono diffusi si aprono ampie grotte e le doline si allargano poiché la carsificazione è facilitata dalla debolezza strutturale della roccia. La maggiore percentuale di vuoti è dovuta ad un incremento della superficie di scambio aria-acqua-roccia che crea condizioni favorevoli alla dissoluzione per dell'aumento dell'aggressività delle acque.

L'identificazione degli allineamenti che corrispondono alle fratture con l'interpretazione delle immagini multispettrali, basata sui flussi idrici superficiali, sui livelli di umidità del suolo e sulla temperatura, è fondamentale per capire le direzioni di drenaggio. In un'area carsica, le procedure di telerilevamento descritte possono essere usate con successo per individuare quelle forme carsiche, le doline in particolare, che contribuiscono all'infiltrazione dal momento che si sviluppano vicino o lungo gli allineamenti superficiali.

An analysis of the rose diagrams (Figs. 3 and 5) shows that the highest frequency classes of the sinkholes and lineaments are not exactly the same. Even if the main orientation is NW-SE, the observed lineaments are more westerly than the sinkholes. However, a comparison between the superficial lineaments and the sinkholes (Fig. 8) suggests that the largest depressions correspond to areas of crossing or clustering lineaments.

In non-circular sinkholes, the overlap of karst and structural features points out that sinkhole elongation follows the direction of the lineaments. Even where there is no sign of lineament, its presence may be supposed because the position of the sinkholes follows a well-defined orientation; in some cases, the line joining the major axis of the sinkholes is consistent with the lineament identified by remote sensing.

CONCLUSIONS

Areas with diffuse lineaments have large caves and sinkholes, because karstification is favored by the structural weakness of the rock. The higher void percentage is due to the increased air-water-rock exchange surface, which creates favorable dissolution conditions due to water aggressiveness.

The identification of lineaments corresponding to fractures by multispectral image interpretation, which is based on the superficial water flow and thermal and soil moisture levels, is fundamental in order to understand drainage pathways. In a karst area, the remote sensing procedure described above can successfully be used to identify those karst features, especially sinkholes, which contribute to water seepage since they develop near or along superficial lineaments.

The analysis carried out on an area of the Murge plateau con-

L'analisi condotta su un'area situata nelle Murge conferma l'attendibilità del telerilevamento nel monitorare le evidenze superficiali. In particolare, il confronto fra l'ubicazione e la morfologia delle doline, rilevate con l'analisi delle foto aeree stereoscopiche, e i lineamenti tettonici, ottenuti dal processamento di immagini multispettrali, ha evidenziato l'affidabilità delle procedure automatiche nel rilevare le strutture presenti. Quindi, entrambe le procedure si integrano perfettamente per ottenere informazioni di dettaglio sulla morfologia del territorio.

Tali conoscenze sono state molto utili per calibrare il metodo usato per la stima della vulnerabilità in aree carsiche (MARSICO, 2003).

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il dr. Domenico Capolongo per i suggerimenti forniti durante la stesura di questo lavoro.

firmated the remote sensing reliability in monitoring superficial features. Comparison between sinkholes (identified by aerial photographs) and tectonic lineaments (obtained from satellite image analysis) demonstrated that computerized methods are reliable in detecting structures. Therefore, both methods may be integrated to acquire in-depth knowledge of the morphology of a given study area.

This knowledge was very useful to fine-tune the method for estimating vulnerability in karst areas (MARSICO, 2003).

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank Dr. Domenico Capolongo for his useful comments on the draft of the paper.

OPERE CITATE / REFERENCES

- AA. VV. (1994) - *Guida all'escursione tematica sul Cretaceo murgiano. Congresso Nazionale "Geologia delle aree di Avampaese", 23 settembre - 1 ottobre 1994*, 86 pp.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (1980) - *Manual of Photogrammetry*. 105 North Virginia, USA.
- BOENZI F. & CALDARA M. (1991) - *Appunti sul paesaggio carsico pugliese. Itinerari Speleologici*, serie II, **4**: 17-30.
- BRUNO G., DEL GAUDIO V., MASCIA U. & RUINA G. (1995) - *Numerical analysis of morphology in relation to coastline variations and karstic phenomena in the southeastern Murge (Apulia, Italy)*. *Geomorphology*, **12**: 313-322.
- CASTIGLIONI B. (1996) - *Comparison of morphometric aspects of doline between two zones in Berici Hills (Vicenza, Italy)*. *Acta Carsologica*, **XXV**: 69-87.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **41**: 449-460, 1 TAV.
- DRURY S.A. (1993) - *Image interpretation in geology*. Chapman & Hall, London, 283 pp.
- FERRARESE F., SAURO U. & TONELLO C. (1998) - *The Montello Plateau, karst evolution of an alpine neotectonic morphostructure*. *Z. Geomorph. N. F., suppl.-Bd.* **109**: 41-62.
- GRASSI D. (1974) - *Il carsismo della Murgia (Puglia) e sua influenza sull'idrogeologia della regione*. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, **IX**: 119-160.
- GRASSI D., ROMANAZZI L., SALVEMINI A. & SPILOTRO G. (1982) - *Grado di evoluzione e ciclicità del fenomeno carsico in Puglia in rapporto all'evoluzione tettonica*. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, **XVII**: 55-73.
- GRASSI D. (1983) - *Difformità di ambiente idrogeologico promossa in seno alla piattaforma carbonatica appula da un'evoluzione tettonico-carsica differenziata*. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, **XVIII**: 209-277.
- HUNG L.Q. & BATELAAN O. (2003) - *Environmental geological remote sensing and GIS analysis of tropical karst areas in Vietnam. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toulouse, France, 21-25 July 2003, **IV**: 2964-2966.
- HUNG L.Q., BATELAAN O. & SAN D.N. (2003) - *Lineament analysis in fractured rocks, methodology and application to the Suo-imuoi karst catchment. Proceedings of the International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 15-19 September 2003, Prague, eds. Krásn, J., Hrkal, Z. and Bruthans, J.
- KRESIC N. (1995) - *Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric karst*. *Remote Sens. Environ.*, **53**: 85-90.
- IANNONE A. & PIERI P. (1979) - *Considerazioni critiche sui "Tufo Calcarei" delle Murge - Nuovi dati litostratigrafici e paleoambientali*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **21**: 33-58.
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (2000) - *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 724 pp.
- MARSICO A. (2003) - *Valutazione dell'impatto antropico sui sistemi carsici: la vulnerabilità dell'acquifero delle Murge Sud-Orientali*. Tesi di dottorato, Università di Bari, 189 pp.
- MERLA G. & ERCOLI A. (1971) - *Note illustrative della Carta Geologica*, Foglio 190, Monopoli. *Serv. Geol. Ital.*, Roma, 23 pp.
- NEBOIT R. (1975) - *Plateaux et collines de Lucanie orientale et des Pouilles. Etude morphologique*. LiBr. H. Champion, Paris, 701 pp.
- RADINA B. & WALSH N. (1972) - *Proprietà tecniche della calcarenite (tufo calcarei) di Gravina in Puglia*. *Geol. Appl. Idrogeol.* **7**: 57-74.
- TRAVAGLIA C. & AMMAR O. (1998) - *Groundwater Exploration by Satellite Remote Sensing in the Syrian Arab Republic, Part 1. "Groundwater exploration by satellite remote sensing in the Syrian Arab Republic"*, RSC Series **76**: FAO 1998 (<http://www.fao.org/sd/EIdirect/eian0009.htm>).
- URICCHIO V.F. & MASCIOPINTO C. (1999) - *Riconoscimento semiautomatico delle linee preferenziali di scorrimento d'acqua da immagini satellitari*. *Acque Sotterranee*, **63 (3)**: 63-71.

URICCHIO V.F. & MASCIOPINTO C. (2000) - *Il telerilevamento ed il riconoscimento delle fratture. Progetto IRIS* - Cap. 3 "Mezzi porosi fratturati".

URICCHIO V.F., MASCIOPINTO C., FESTA V. & MORETTI M. (1999) - *Influenza del grado di fratturazione sul deflusso idrico in una falda carsica (area di Morciano - Salento sud-occidentale): cavità e barriere impermeabili* - IGEA dicembre 1999.

Received October 2007 - Accepted March 2008