

## La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, geomorfologici, geofisici e geochemici

GIANCARLO CIOTOLI (\*), MICHELE DI FILIPPO (\*), STEFANIA NISIO (\*) & CARLO ROMAGNOLI (\*\*)

### RIASSUNTO

La Piana di S. Vittorino, situata nel Lazio nord-orientale, è stata in passato oggetto di numerosi studi riguardanti, in particolare, l'origine dei fenomeni di *sprofondamento* (*sinkholes*) ed i suoi legami con le emanazioni gassose, le sorgenti mineralizzate, la circolazione idrica sotterranea ed il contesto geologico-strutturale. In tale ambito vengono presentati i risultati preliminari di uno studio a carattere multidisciplinare che prevede l'integrazione di dati geologico-strutturali, geomorfologici, geofisici e geochemici per la comprensione dei fattori geologici che presiedono al rischio di collasso per gli insediamenti sulla piana.

L'area di indagine è ubicata nell'estrema porzione nord-orientale del dominio carbonatico laziale-abruzzese e della vicina fascia di transizione e fa parte della così detta *zona d'incontro* tra il dominio carbonatico, il dominio pelagico e la zona di transizione tra piattaforma e bacino. Dal punto di vista strutturale la zona risulta particolarmente complessa per la presenza anche di un elemento tettonico di importanza regionale, la linea *Olevano-Antrodoco o Ancona-Anzio Auct.*, che ha separato fin dal Lias il dominio neritico laziale-abruzzese da quello pelagico umbro-marchigiano-sabino.

Gli studi geologici attualmente in atto hanno evidenziato la presenza di quattro unità strutturali, accavallate l'una sull'altra; tali unità dalla più interna alla più esterna sono: *Unità umbro-marchigiano-sabina di M. Paterno*, *Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani*, *Unità M. S. Vittorino-Petrella Salto*, *Unità M. Nuria*. Le unità riconosciute presentano stili strutturali complicati dalla tettonica distensiva plio-pleistocenica. La stessa piana di S. Vittorino, che presenta una caratteristica forma triangolare con apice rivolto verso il basso, deve la sua geometria alla presenza di importanti elementi strutturali, tra i quali ha un particolare rilievo la *faglia di Micciani-Fiamignano*. Quest'ultima sembra aver agito almeno fino al Pleistocene medio, influenzando l'andamento del corso del F. Velino.

L'esistenza di forme carsiche di ampie dimensioni («canetre»), diffuse specialmente sul bordo settentrionale, potrebbero essere collegate alle sorgenti termali e/o mineralizzate ed alla presenza di estesi fronti di deflusso sotterranei emergenti su entrambi i bordi della piana.

La distribuzione dei gas del suolo evidenzia precise relazioni con i principali lineamenti strutturali e con l'assetto idrogeologico. In particolare le maggiori anomalie di radon ed elio (rispettivamente fino 592 Bq/L e a 200 ppb) orientate in direzione circa E-W, coincidono con l'elemento tettonico riconosciuto lungo il bordo settentrionale della valle, presso il quale si dispongono anche le sorgenti mineralizzate. All'interno della piana si osservano, inoltre, evidenti anomalie di radon, allungate in direzione NW-SE e corrispondenti rispettivamente al prolungamento della *Faglia di Micciani-Fiamignano*, al di sotto dei depositi alluvionali, ed alla struttura bordiera occidentale.

Le indagini gravimetriche mostrano una notevole correlazione tra un «minimo gravimetrico» delle anomalie residue e i depositi flu-

vio-lacustri che colmano la piana di S. Vittorino; tuttavia il quadro generale risulta estremamente complesso in quanto il minimo suddetto si fonde a più ampia scala con una zona di valori negativi che caratterizzano le strutture carbonatiche dell'*Unità M. Nuria*.

**TERMINI CHIAVE:** *tettonica, sinkholes, gravimetria, gas del suolo, Appennino centrale.*

### ABSTRACT

GEOLOGICAL, GEOMORPHOLOGICAL, GEOPHYSICAL AND GEO-CHEMICAL PRELIMINARY INVESTIGATIONS IN THE S. VITTORINO PLAIN (RIETI, CENTRAL ITALY) - The San Vittorino Plain, located in north-eastern Latium (central Italy), has been studied in the past for its geological-structural setting and some characteristic geological phenomena, such as sinkholes, gas emanations, hydrothermal springs and groundwater circulation. In this paper preliminary results of geological, geomorphological, geophysical and geochemical studies are presented to increase the understanding of the geological factors which control the geomorphological hazard of the plain.

The study area is located on the north-eastern side of the Latium-Abruzzo carbonate domain. It is the «contact-zone» between the carbonate, transitional and pelagic domains between the platform and basin. The area is very complex due to the presence of an important structural discontinuity: the Olevano-Antrodoco or Ancona-Anzio fault. This structure has divided the Latium-Abruzzo neritic domain from the Umbro-Marche-Sabin pelagic domain since the Lias.

Four structural units are present in the area, from internal to external these are: *umbro-marchigiano-sabina of M. Paterno Unit*, *M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani Unit*, *M. S. Vittorino-Petrella Salto Unit*, *M. Nuria Unit*.

These units have a structural style which is complicated by Plio-Pleistocene tectonics. The triangular form of the San Vittorino Plain is the result of three intersecting faults, of which the *Fiamignano-Micciani Fault* (which forms the western side of the plain) was active until the Middle Pleistocene and controlled the course of the Velino River.

The karstic forms are connected to thermal and mineral springs and to two groundwater flow regimes which emerge on the north and south sides of the Plain.

The soil gas distribution can be correlated with both the local structural features and the hydrogeological setting.

In particular the most important E-W trending, radon and helium anomalies (up to 592 Bq/L and 200 ppb, respectively) coincide with a tectonic element on the northern side of the plain which is confirmed by the presence of mineral springs. NW-SE trending radon anomalies are observed in the plain which may correspond to the extension of the *Fiamignano-Micciani Fault* under alluvial deposits and western carbonate structures.

The gravimetric study shows a significant correlation between the residual-anomaly minimum and the fluvial-lacustrine sediments of the San Vittorino Plain. However the regional situation is more complex because the gravimetric minimum is connected to a large negative zone that characterises the carbonate structure of the M. Nuria Unit.

**KEY WORDS:** *tectonics, sinkholes, geophysics, soil gas prospecting, central Apennine.*

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra Università degli Studi «La Sapienza» Roma.

(\*\*) ACEA, Roma.

Lavoro eseguito con i contributi M.U.R.S.T. 40% e 60% responsabile Prof. E. Centamore, CNR-CSQE responsabile Prof. B. Toro e CEE nell'ambito del progetto di ricerca «Management and Storage of Radioactive Waste» (1990-1994) Part A, Task 4: «Disposal of Radioactive Waste». EUR 16929 EN responsabile Prof. S. Lombardi.

## INTRODUZIONE

In questo lavoro vengono esposti i risultati preliminari di uno studio interdisciplinare che mediante l'integrazione di dati geologico-strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici si intende proporre come metodologia di indagine utile alla comprensione dei fattori geologici che presiedono al rischio di collasso per gli insediamenti sulla piana. La Piana di S. Vittorino, ubicata nella Valle del F. Velino nel Lazio nord-orientale, è stata selezionata come area di indagine in quanto si inserisce in un contesto geologico molto complesso caratterizzato da alcuni particolari aspetti quali: la presenza di sorgenti mineralizzate, di *sinkholes*, fenomeni carsici e di subsidenza, e presenza di emergenze di acque dolci importanti, quali quelle del Peschiera. Tali fenomeni sono in gran parte legati agli effetti di una tettonica quaternaria che ha dislocato il preesistente edificio a *thrust*.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

L'area studiata, limitata ad una fascia che circonda la piana di S. Vittorino, ricade quasi completamente nella estrema porzione nord-orientale del dominio carbonatico laziale-abruzzese e della vicina fascia di transizione e nonché in una parte del dominio pelagico umbro-marchigiano-sabino.

Tale area è attraversata per un tratto, sia nell'estrema parte occidentale che in quella settentrionale, dalla linea *Ancona-Anzio Auct.*, che, attivatasi sin dal Lias come un'importante *master fault* trastensiva, ha contribuito a separare il dominio neritico carbonatico laziale-abruzzese dal dominio pelagico umbro-marchigiano-sabino, condizionando notevolmente la dinamica deposizionale della regione in esame.

La zona studiata perciò fa parte della così detta *zona d'incontro* tra dominio carbonatico, dominio pelagico e zona di transizione tra piattaforma e bacino, successivamente coinvolta nella formazione, prima, della catena a *thrust* dell'Appennino e, poi, nella disarticolazione in blocchi, a movimenti verticali differenziati, prodotti dalla tettonica distensiva, collegata alla progressiva apertura del Tirreno e al sollevamento regionale.

Pertanto nell'area in esame ed in quelle limitrofe affiorano successioni carbonatiche di ambiente di deposizione compreso tra la piattaforma interna, la scarpata, la rampa ed il bacino prossimale attribuibili all'intervallo Trias-Miocene medio e di avansfossa del Miocene superiore, mentre nella porzione occidentale affiorano, in appoggio sui termini del substrato, depositi pliocenico-quaternari fluvio-lacustri del bacino di Rieti, e la Piana di San Vittorino è colmata dai sedimenti alluvionali del F. Velino.

Nell'area sono state distinte quattro principali unità strutturali, che dalla più interna alla più esterna sono: *Unità umbro-marchigiano-sabina di M. Paterno*, *Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani*, *Unità M. S. Vittorino-Petrella Salto*, *Unità M. Nuria*; al loro interno tali unità sono organizzate in unità minori da una serie di *splay* (fig. 1).

La prima unità affiorante a Monte Paterno, costituita dalla successione *Corniola*, *Calcari e marne del Sentino*, *scaglia rossa*, *scaglia cinerea*, è ampiamente sovrascorsa sia sull'*Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani* sia sull'*Unità M. Nuria*. Nell'estrema porzione occidentale l'unità

in questione è ricoperta dai depositi fluvio-lacustri del bacino di Rieti ed affiora in limitati lembi sul fondovalle.

L'*Unità M. Navegna-M. Sant'Angelo-Micciani*, costituita dal basso verso l'alto da *Calcari a radiolitidi*, *Calcareniti arancioni*, *Calcareniti a punti rossi*, *Unità calcareo-marnosa* (suddivisibile a sua volta in due membri: calcareo-marnoso quello inferiore, marnoso calcareo quello superiore), *Marne a Orbulina*, *Arenarie della Valle del Salto*, è sovrapposta all'*Unità M. S. Vittorino-Petrella Salto*, la cui successione carbonatica è molto simile a quella della prima unità; nella seconda unità prevalgono però di gran lunga i depositi torbiditici messiniani, rappresentati da diverse associazioni di facies variamente alternate tra loro, e i depositi marini sono ricoperti da sedimenti silicoclastici continentali, *Sabbie di Piagge* e da brecce ad elementi carbonatici, *Brecce di Poggio Poponesco*.

L'*Unità M. Nuria*, più esterna, è costituita prevalentemente da facies carbonatiche di piattaforma, così rappresentate dal basso verso l'alto: *Unità calcareo-dolomitica*, *Unità oolitica*, *Calcari a ellipsactinie*, *Calcareniti a coralli e diceratidi*, *Calcari a clasti neri e gasteropodi*, *Calcari a bird eyes*, *Calcari a Salpingoporella*, *Calcari di M. Torrecane*, *Calcari intrabauxitici*, *Calcari a radiolitidi*. A luoghi si osservano lembi di una successione di annegamento, costituiti da *Calcari a macroforaminiferi* e da calcari tipo *Scaglia*, cui seguono *Calcareniti a punti rossi*, *Marne a Orbulina* e limitati lembi di torbiditi silicoclastiche.

L'assetto strutturale di quest'unità ed i rapporti con la più interna *Unità M. S. Vittorino-Petrella Salto* sono piuttosto complessi ed ancora non ben definiti; l'unità in questione è suddivisa al suo interno da una serie di *splay*, al cui fronte talora si enucleano pieghe coricate a vergenza orientale; molto spesso intrappolate tra i diversi elementi tettonici affiorano placche di torbiditi silicoclastiche o lembi di depositi miocenici.

A luoghi (Aia dei Sorci) si osservano raddoppi di serie, *younger on older*, di non facile definizione con interposti lembi di torbiditi.

Nell'area sono presenti inoltre depositi continentali quaternari, costituiti da brecce cementate antiche, alluvioni terrazzate del F. Velino, disposte in più ordini, estese soprattutto in sinistra del F. Velino, travertini, anch'essi disposti in più ordini, facies di conoide, antiche e recenti, depositi di versante recenti.

Dal punto di vista strutturale sono assai evidenti gli effetti di una tettonica polifasica che dapprima ha favorito la costruzione di un edificio a *thrust* e successivamente in concomitanza con un notevole sollevamento regionale e con la progressiva apertura del Tirreno, in un regime prevalentemente distensivo, ha disarticolato in blocchi a movimenti verticali differenziati le strutture preesistenti.

Gli elementi compressivi più importanti presenti nell'area in esame sono i *thrust* basali dell'*Unità umbro-marchigiano-sabina di M. Paterno* e dell'*Unità M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani*, suddivise al loro interno da *splay* minori e a cui si accompagnano strutture plicative a luoghi assai accentuate.

Il *thrust* basale dell'*Unità umbro-marchigiano-sabina di M. Paterno*, che rappresenta un tratto della *linea Anzio-Ancona*, affiora a Nord della Piana di S. Vittorino, tramite una superficie debolmente ondulata, con direzione all'incirca N25°E ed inclinazione sui 10°-15° verso NW. Tale superficie è interrotta in vari punti da faglie a direzione N30°W e N10°W. Nell'*hanging-wall* del sovrascorri-

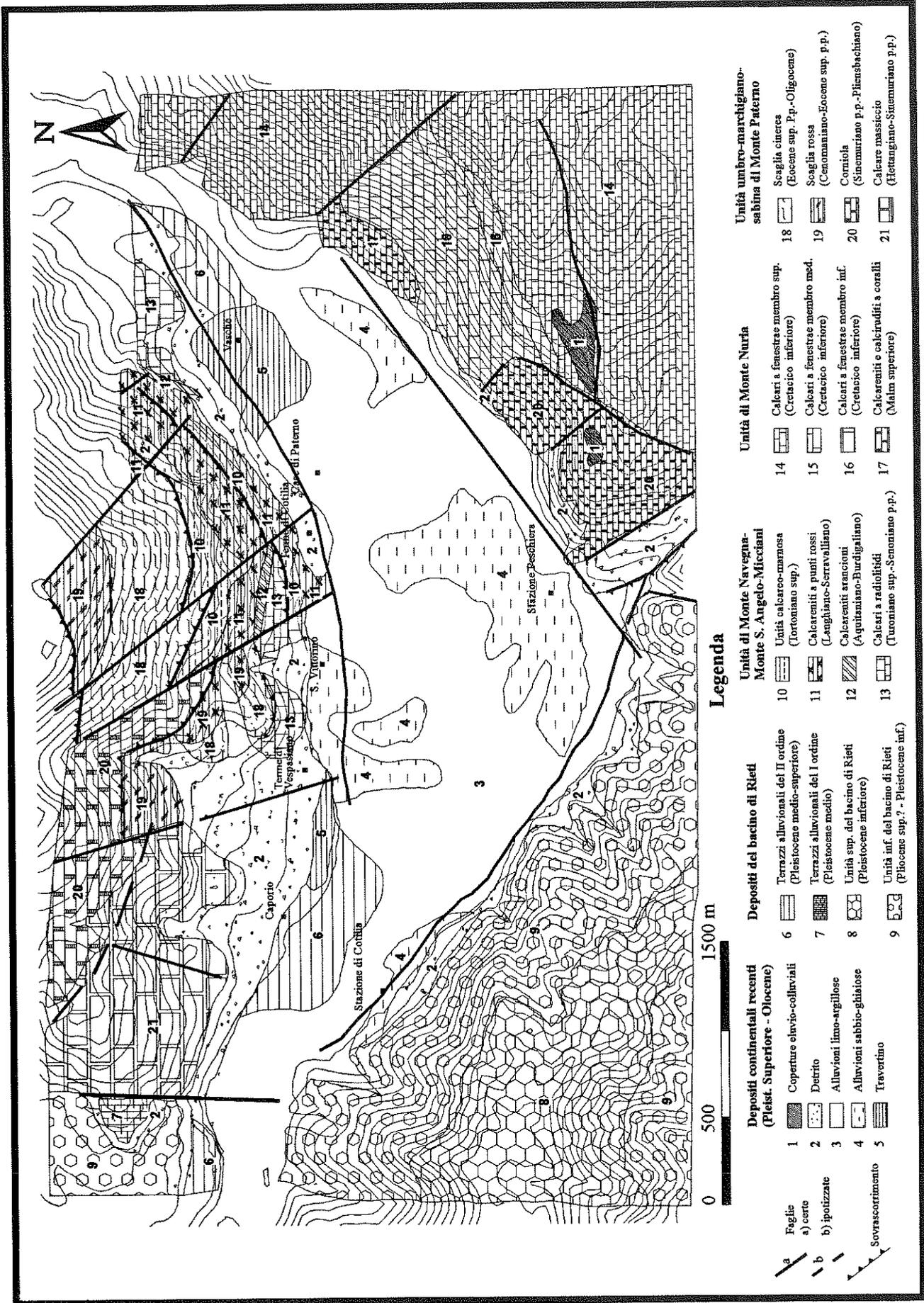


Fig. 1 - Schema geologico- strutturale della Piana di S. Vittorino.

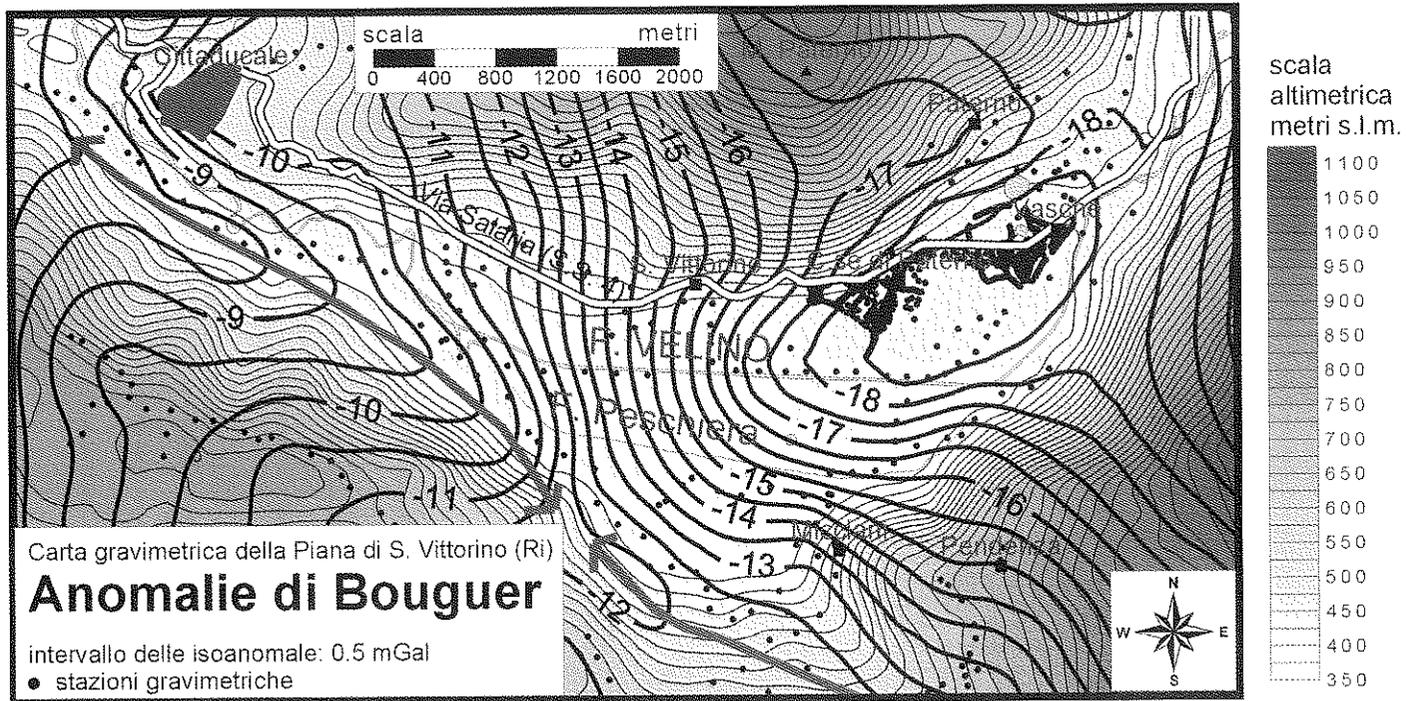


Fig. 2 - Mappa delle anomalie di Bouguer.

mento affiorano la *Scaglia rossa*, la *Scaglia cinerea*, in successione rovesciata e caratterizzata da un diffuso clivaggio con frequentissimi piani di taglio a basso angolo immergenti verso i quadranti occidentali; l'intero affioramento della *Scaglia cinerea* può essere considerato una *shear zone*.

L'unità in esame è a sua volta suddivisa in elementi strutturali minori da una serie di *splay*, con andamento all'incirca parallelo al *thrust* principale; l'elemento tetto-

nico superiore è rappresentato dalla successione pelagica mesozoica disposta in giacitura normale secondo una blanda sinclinale. Tutta l'unità, nell'estrema area nord occidentale, appare dislocata da una faglia normale ad andamento appenninico, con notevole rigetto verso ovest.

Nell'area più occidentale (Carcariola) l'Unità umbromarchigiano-sabina di M. Paterno è ricoperta, come accennato in precedenza, dai depositi fluvio-lacustri del ba-

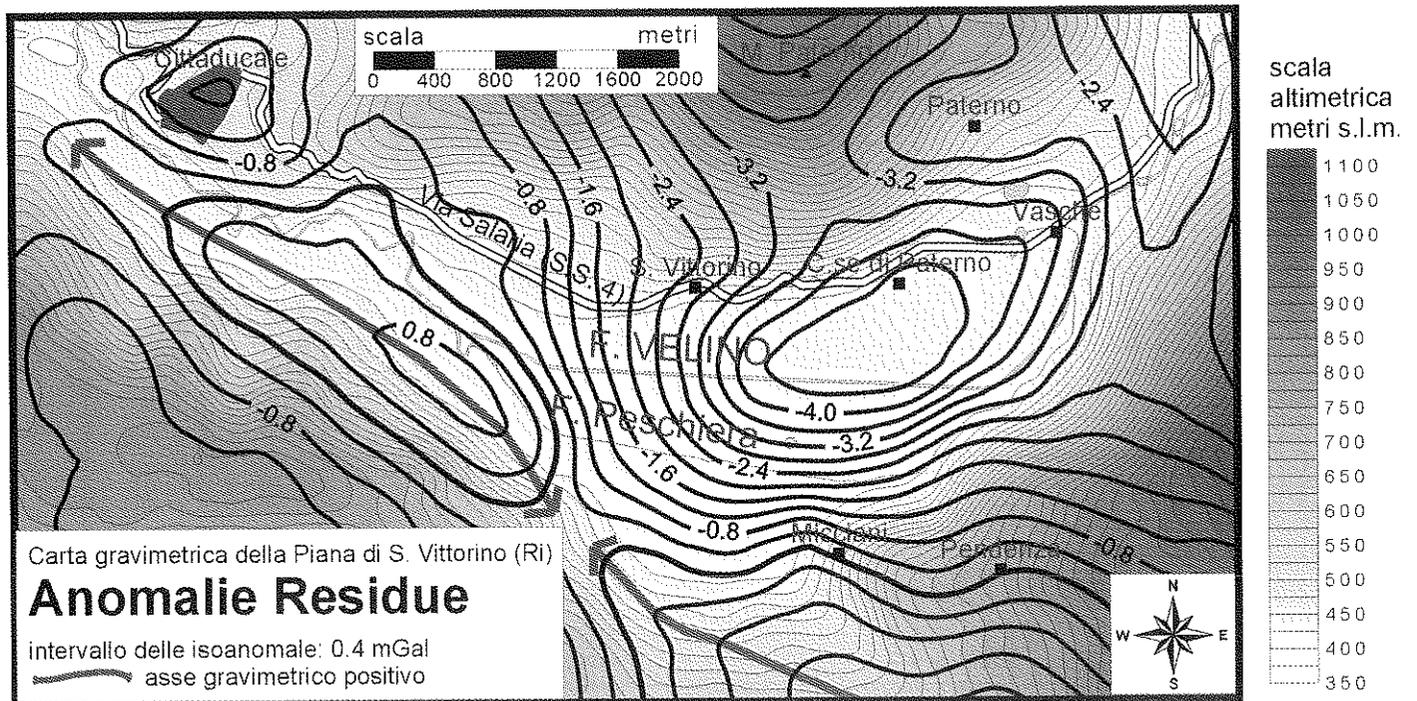


Fig. 3 - Mappa delle anomalie residue.

cino di Rieti ed affiora poco più ad ovest in limitati lembi sul fondovalle dei vari corsi d'acqua.

Al *foot-wall* della linea Ancona-Anzio è presente l'Unità di M. Navegna-M. S. Angelo-Micciani, il cui *thrust* basale, rappresentato localmente da una superficie a direzione circa N20°W ed inclinata di 35°-40° verso SW, affiora tra Micciani e Casali Giovannini. Anche questa unità appare notevolmente articolata in unità minori da una serie di *splay*, al cui fronte si enucleano pieghe anticlinaliche, anche rovesciate. Tra Cotilia, Paterno e Castel S. Angelo si individuano per lo meno due sovrascorrimenti minori a basso angolo, con andamento pressoché parallelo a quello del soprastante *thrust* dell'Ancona-Anzio.

Anche queste strutture sono dislocate da una serie di faglie normali o trassensive a direzione N30°W e N10°W che da Colle della Croce ribassano i vari blocchi progressivamente verso SW e verso NE.

Nell'Unità M. Nuria la struttura compressiva più evidente dell'area presa in esame, è rappresentata dalla faglia inversa a direzione N35°E ed immersione verso NW, che a NW di Pendenza fa accavallare i *Calcari a coralli e diceratidi* sui depositi cretacei più recenti.

Alle fasi compressive fanno seguito più recenti fasi distensive o trassensive, collegate ad un generale sollevamento regionale, particolarmente intenso durante il Pleistocene, e alla progressiva apertura del Tirreno.

A tali fasi sono riferibili sistemi di faglie, in genere di neoformazione, o che riprendono più antiche lineazioni, che dissecano le preesistenti strutture compressive. Tali faglie hanno direttrici N35°E±5 come quelle che tagliano il blocco del M. Nuria e lo bordano lungo il lato sinistro del Velino, E-W, particolarmente evidenti nei dintorni di Pendenza e, in misura minore, N±20°. Un elemento distensivo di notevole importanza, è rappresentato dalla cosiddetta

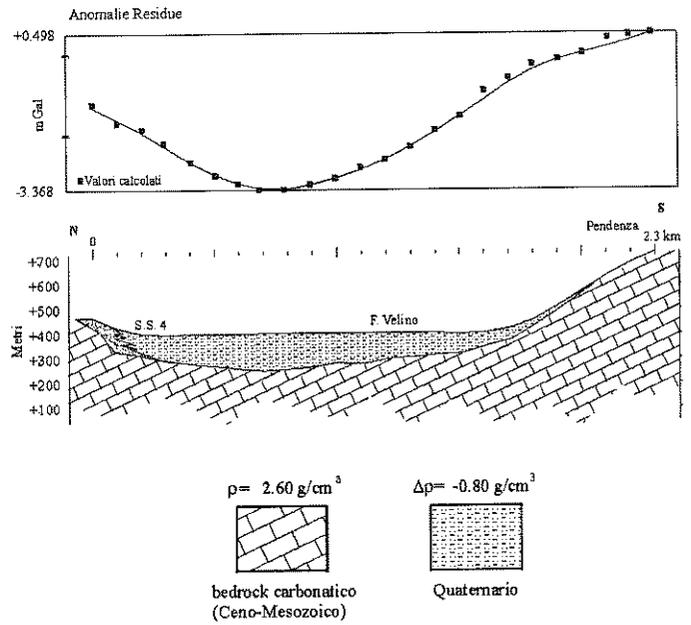


Fig. 4 - Profilo gravimetrico e relativa interpretazione geologica.

Faglia di Fiamignano a direzione N30°W±10° e immersione verso SW, che nel suo segmento più settentrionale, lungo lo spigolo nordoccidentale del blocco di M. Nuria, è nota localmente come *Faglia di Micciani*. Essa attraversa tutta la Valle del Velino e continua più a Nord, bordando il versante occidentale del gruppo del Terminillo.

Tale linea si segue sul terreno per alcuni chilometri, pur essendo interrotta e spostata da dislocazioni a diret-

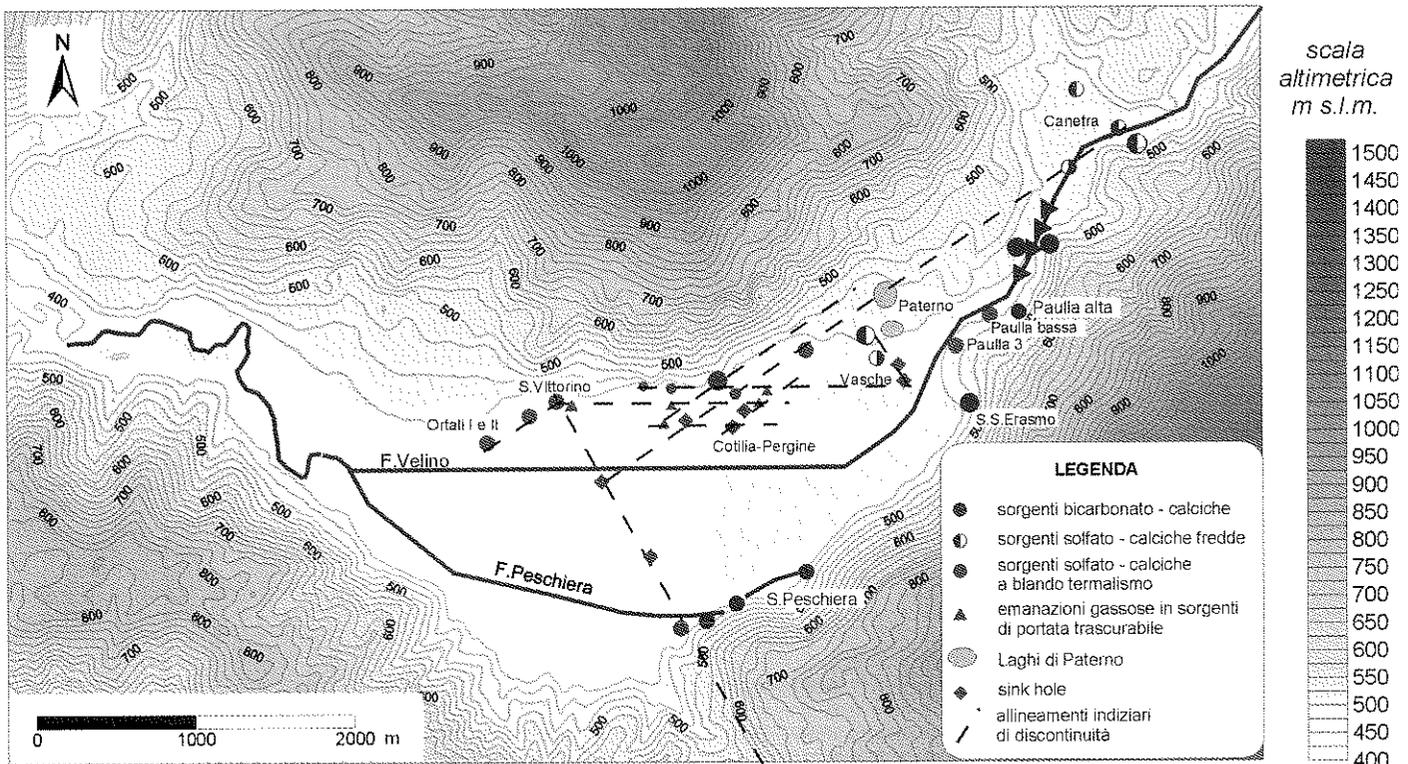


Fig. 5 - Ubicazione delle principali sorgenti nella Piana di S. Vittorino.

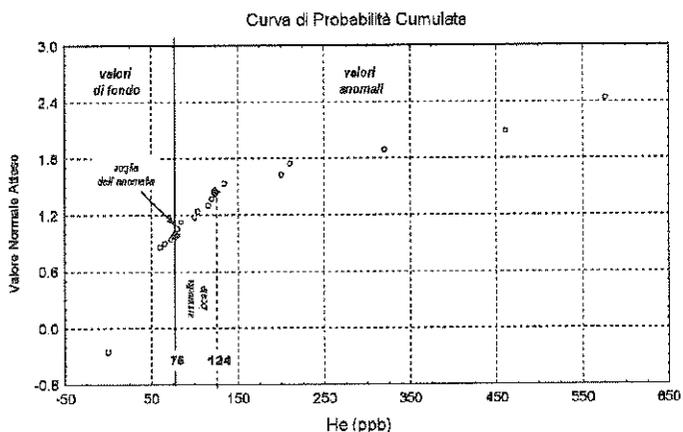


Fig. 6 - Curva di probabilità cumulata calcolata per le concentrazioni di elio. L'analisi della curva mostra un valore di soglia dell'anomalia pari a circa 60 ppb, esso separa i valori del fondo naturale (0-60 ppb) dai valori anomali (> 60 ppb); è possibile, inoltre, distinguere un gruppo di campioni con concentrazioni comprese tra 60 e 120 ppb che caratterizza una popolazione di deboli anomalie, ed infine alcuni campioni con valori elevati di anomalia fino a 600 ppb.

trice trasversale od obliqua. Essa è caratterizzata da superfici mediamente con direzione N30°-35°W immergenti a SW, con inclinazioni generalmente sui 45°; in alcuni casi si osservano pendenze però da pochi gradi ad una ventina, ma talora anche di 50°-60°.

La faglia mette a contatto varie formazioni carbonatiche dell'Unità M. Nuria, ad Est, con quelle prevalentemente torbiditiche della Depressione del Salto, ad Ovest.

Sull'età della *Faglia di Micciani-Fiamignano*, sulla sua dinamica e sulla sua cinematica sono state fatte diverse ipotesi: per BOSI (1975) si tratta di una faglia normale attiva; BERTINI *et alii* (1986) individuano lungo tale linea elementi di tettonica compressiva pliocenica; FACCENNA *et alii* (1993) individuano, nei dintorni di Micciani, indicatori cinematici di movimenti trastensivi destri seguiti poi da movimenti normali *dip-slip*; per CAPOTORTI & MARIOTTI (1991) lungo la *Faglia di Micciani-Fiamignano* sono evidenti i segni, a parte quelli di una distensione recente, in un generale regime distensivo, di una antica superficie di sovrascorrimento, con geometrie tipo *flat-ramp*, riattivata successivamente sia come trascorrente che come faglia normale.

Nella Piana di S. Vittorino il prolungamento settentrionale della faglia sembra localizzato lungo l'allineamento Lago di Micciani-Lago Nuovo-Lago Tornariccio-S. Vittorino.

Tra le altre dislocazioni a carattere distensivo, sono da ricordare quelle che dislocano le strutture compressive del gruppo di M. Paterno, generalmente con direzioni N30°-35°W o N±10°, che favoriscono un motivo a gradinata ribassante progressivamente verso SW.

Ai piedi del versante di M. Paterno è ipotizzabile una faglia distensiva a direzione E-W.

Nel gruppo di M. Nuria, oltre la faglia che borda il versante lungo il Velino, a direzione N35°-40°E, si osservano sistemi di faglie con le stesse direzioni, che dislocano il blocco Costa Cattera-Costa di S. Erasmo-L'Impicciavera, mentre nella zona di Pendenza, è presente un sistema a direzione circa E-W. L'assetto strutturale che consegue alla fase distensiva è la suddivisione in blocchi

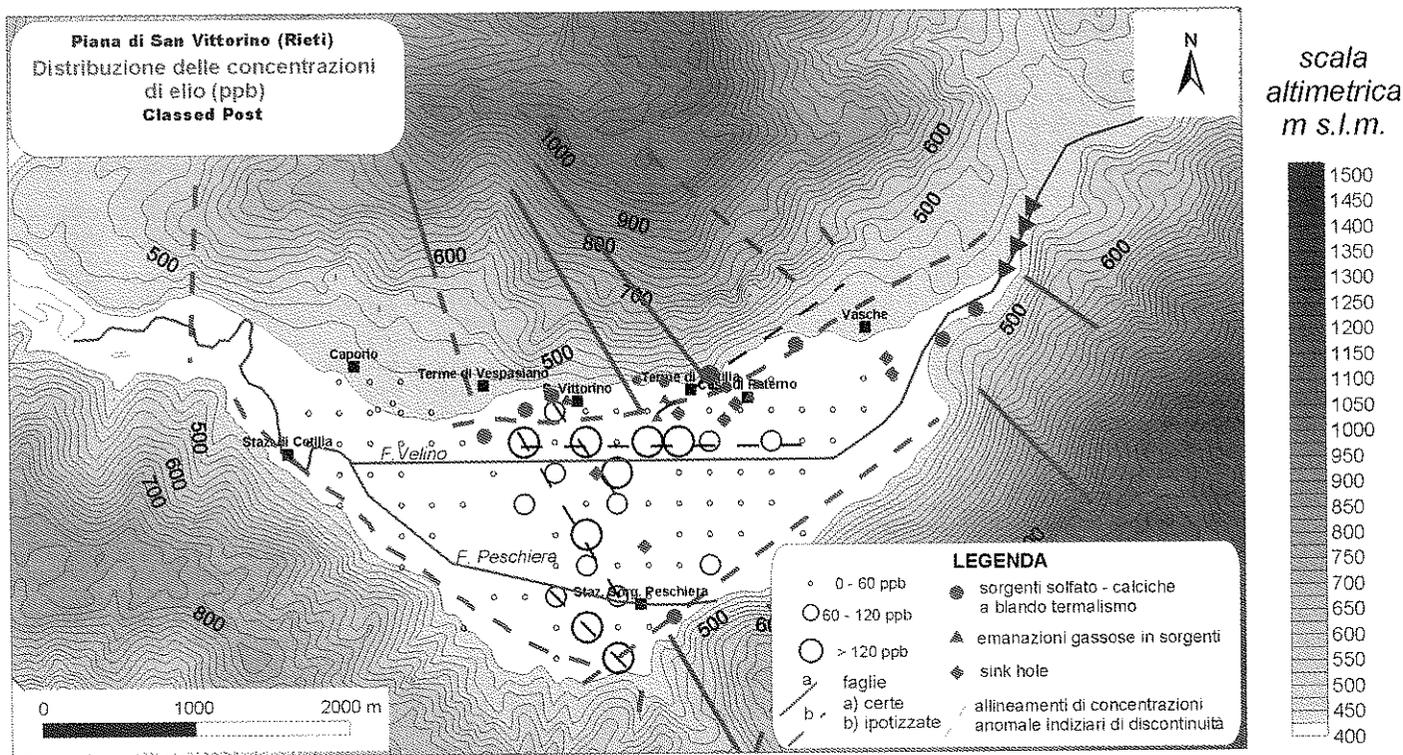


Fig. 7 - Distribuzione puntuale delle concentrazioni di elio nei gas del suolo (*dot-map*). La mappa mette in evidenza, mediante cerchi di diametro proporzionale alla concentrazione di elio misurata, le popolazioni individuate dall'analisi dell'acurva di probabilità cumulata. Essa unitamente alla mappa delle isopete (fig. 8) mostra la presenza di allineamenti di valori anomali in direzione E-W e NNW-SSE rispettivamente lungo il bordo settentrionale e al centro della piana.

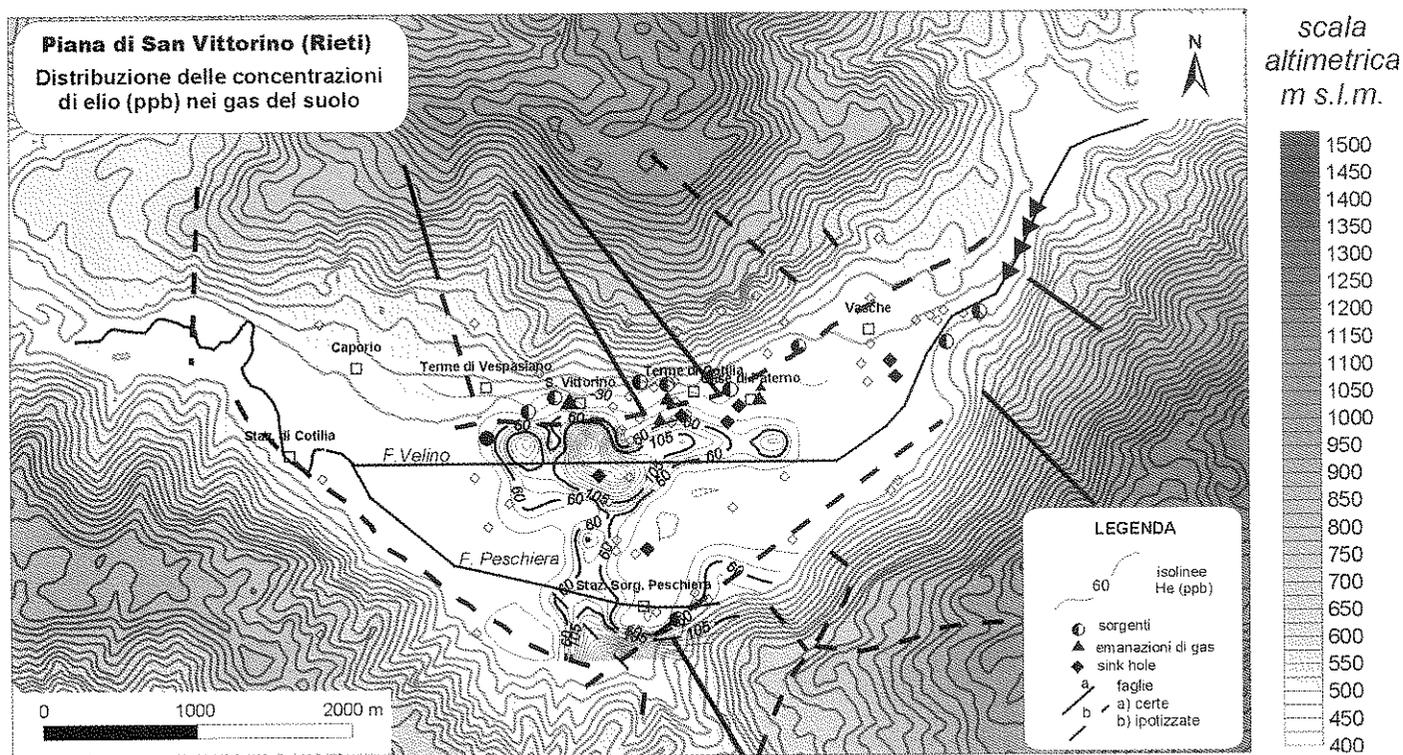


Fig. 8 - Mappa ad isolinee di concentrazione di elio nei gas del suolo.

a movimenti verticali differenziati separati da faglie dirette o transtensive (fig. 1). Il blocco di M. Nuria, individuato dalla *Faglia di Fiamignano*, ad ovest, e da una dislocazione ad andamento appenninico localizzata ai piedi del versante nord-occidentale lungo il corso del Velino, risulta il blocco più sollevato, come pure l'estremo blocco nord-occidentale quello di M. Paterno, bordato a SW dal proseguimento della *Faglia di Micciani-Fiamignano* e a S e SE da faglie dirette.

In posizione intermedia rispetto a questi due blocchi sono localizzati sia il blocco di Micciani-Capradosso sia il blocco di Cittaducale, che sono ribassati dalla *Faglia di Micciani-Fiamignano*. Il blocco più depresso risulta quello della Piana di S. Vittorino, localizzato tra i blocchi prima descritti e chiuso ad W dal blocco di Carcariola, che rappresenta un segmento intermedio tra quello della Piana di S. Vittorino e quelli di Cittaducale e di Micciani-Capradosso, dai quali è ribassato tramite faglie appenniniche o meridiane.

Il limite orientale tra il blocco di Carcariola e quello della depressione di S. Vittorino sembrerebbe corrispondere all'allineamento Lago di Micciani-S. Vittorino.

**PROSPEZIONE GRAVIMETRICA**

**ANOMALIE DI BOUGUER**

Le anomalie di Bouguer, sono state elaborate su una base di 2500 stazioni gravimetriche effettuate nella piana stessa e nei dintorni (fig. 2). È stato utilizzato nel calcolo delle anomalie un valore di densità di 2,6 g/cm<sup>3</sup>, che è quello delle formazioni cenozoiche in facies di piattaforma, transizione e pelagiche.

La piana di S. Vittorino è stata oggetto di uno studio geofisico atto ad individuare le zone a rischio (la presenza di cavità nel sottosuolo, liquefazione dei terreni). In quest'area sono state effettuate circa un migliaio di misure.

I valori delle anomalie di Bouguer presentano un decremento quasi continuo da ovest (-8 mGal) ad est (-19 mGal), con alcune inflessioni delle isoanomale tra Cittaducale e Calcariola mentre è presente un minimo chiuso (-19 mGal) tra Vasche e Case di Paterno. Il cam-

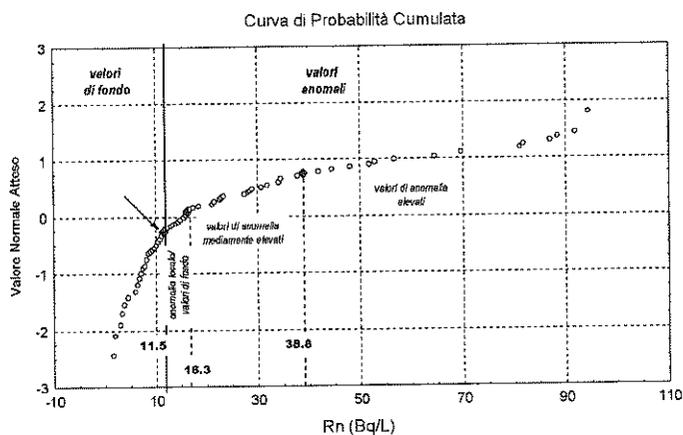


Fig. 9 - Curva di probabilità cumulata relativa ai valori di concentrazione di radon. Il grafico suggerisce la presenza di un valore di soglia intorno a 12 Bq/L, tale valore determina una popolazione di *background* (0-12 Bq/L) ed una popolazione di campioni caratterizzati da concentrazioni anomale di radon (> 12 Bq/L). Nel grafico è, inoltre, possibile distinguere tra i valori anomali almeno tre popolazioni: valori di concentrazione compresi tra 12-16.3 Bq/L (*background*/anomalie locali), valori compresi tra 16.3-40 Bq/L (anomalie mediamente elevate), valori maggiori di 40 Bq/L (anomalie elevate).

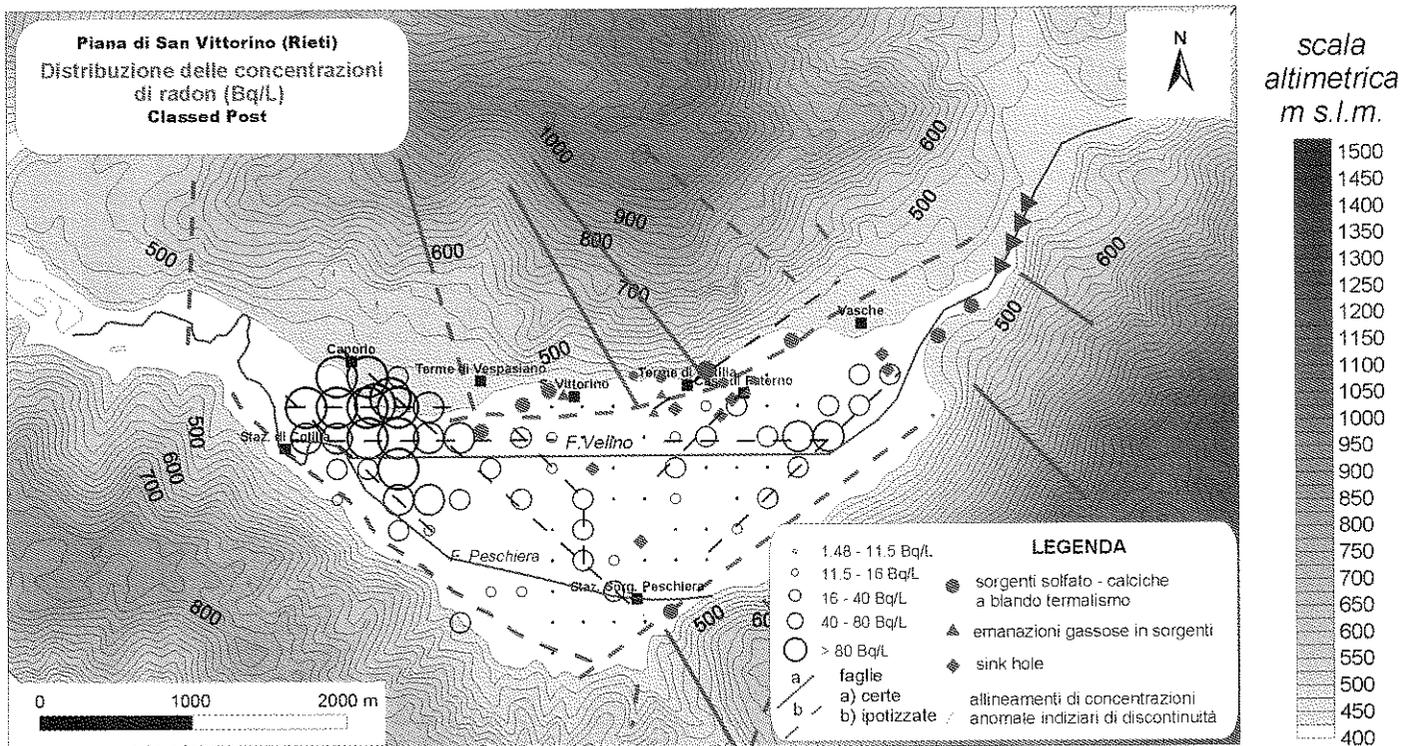


Fig. 10 - Distribuzione puntuale delle concentrazioni di radon nei gas del suolo (*dot-map*). La mappa mostra la presenza di allineamenti di concentrazioni anomale lungo i bordi settentrionale ed orientale, ed in direzione NW-SE e NNW-SSE attraverso la piana rispettivamente tra gli abitati di Caporio e Micciani e di S.Vittorino e Micciani. I valori di radon più elevati (fino a 600 Bq/L) sono localizzati nel settore nord-occidentale dell'area campionata

po regionale, elaborato con il metodo dei minimi quadrati, è stato assimilato ad una superficie piana, che presenta una direzione Nord-Sud immergente ad Est con un gradiente di 1.2 mGal per chilometro.

#### ANOMALIE RESIDUE

Le anomalie residue sono state ottenute sottraendo il campo regionale alle anomalie di Bouguer (fig. 3).

Il quadro delle anomalie residue risulta molto diverso da quello delle anomalie di Bouguer ed evidenzia in modo più efficace le anomalie prodotte dalle strutture locali. Le principale aree individuate dalle anomalie residue sono:

a) una zona di massimo orientato NW-SE è ubicata lungo il versante settentrionale del rilievo di Calcariola (+2 mGal) e a Sud di Pendenza (maggiore di +2 mGal); le due culminazioni sono separate da una sella presso Case Penta.

La causa del massimo va imputata alla presenza delle formazioni ceno-mesozoiche (transizione) al disotto di una debole copertura detritica pleistocenica.

b) un'ampia zona di minimo è presente nella parte centro-settentrionale dell'area in esame e comprende la parte centro-orientale della Piana di S. Vittorino ed il rilievo di Monte Paterno. A questo vasto minimo è sovrapposto l'effetto dovuto al bacino di S. Vittorino. La Piana di S. Vittorino si presenta abbastanza uniforme dal punto di vista morfologico, con quote che vanno da 420 m s.l.m. (Vasche) a 400 m poco prima di Cittaducale; al contrario il depocentro di questo bacino fluvio-lacustre, in base ai dati delle anomalie residue, risulta spostato verso Est e precisamente tra Case di Paterno e il Fiume Velino.

Non vi sono pozzi che raggiungono la base dei sedimenti fluvio-lacustri, mentre alcune informazioni acquisite da SEV e dalla modellizzazione gravimetrica fanno ipotizzare una profondità dal piano campagna del *bedrock* cenomesozoico di circa 180 metri per la stessa area; mentre nella parte tra Caporio e Cittaducale, lo spessore dei sedimenti fluvio-lacustri è invece minimo (fig. 4).

c) una zona di minimo (+2 mGal) è ubicata sull'abitato di Cittaducale, dove affiorano sedimenti fluvio-lacustri.

#### ASPETTI IDROGEOLOGICI E IDROGEOCHIMICI

Le conoscenze disponibili derivano in gran parte dagli studi recenti operati da BONI, CAPELLI & PETITTA (1995) e in DALL'AGLIO & CAMPANILE (1996). Da tali studi appare evidente che la piana di San Vittorino, collocata tra le quote di 420 m s.l.m. e 402 m s.l.m. costituisce il luogo di recapito della circolazione idrica dei versanti limitrofi e, soprattutto, del sistema idrogeologico dei Monti Giano, Nuria e Velino. In questa zona le sorgenti presenti sono distribuite ai margini settentrionale e meridionale della pianura, hanno un carattere prevalentemente puntuale e sono tra loro associate a costituire fronti di deflusso emergenti per trabocco della falda idrica indotto dalla coltre satura dei sedimenti alluvionali. Le portate emergenti sui lati opposti della piana sono molto differenti tra loro: circa 2000 l/s per il bordo settentrionale rispetto ai circa 18000 l/s complessivi di quello meridionale (fig. 5).

Alcune sorgenti puntuali sono poi presenti anche all'interno della piana con portate modeste (stimate tra

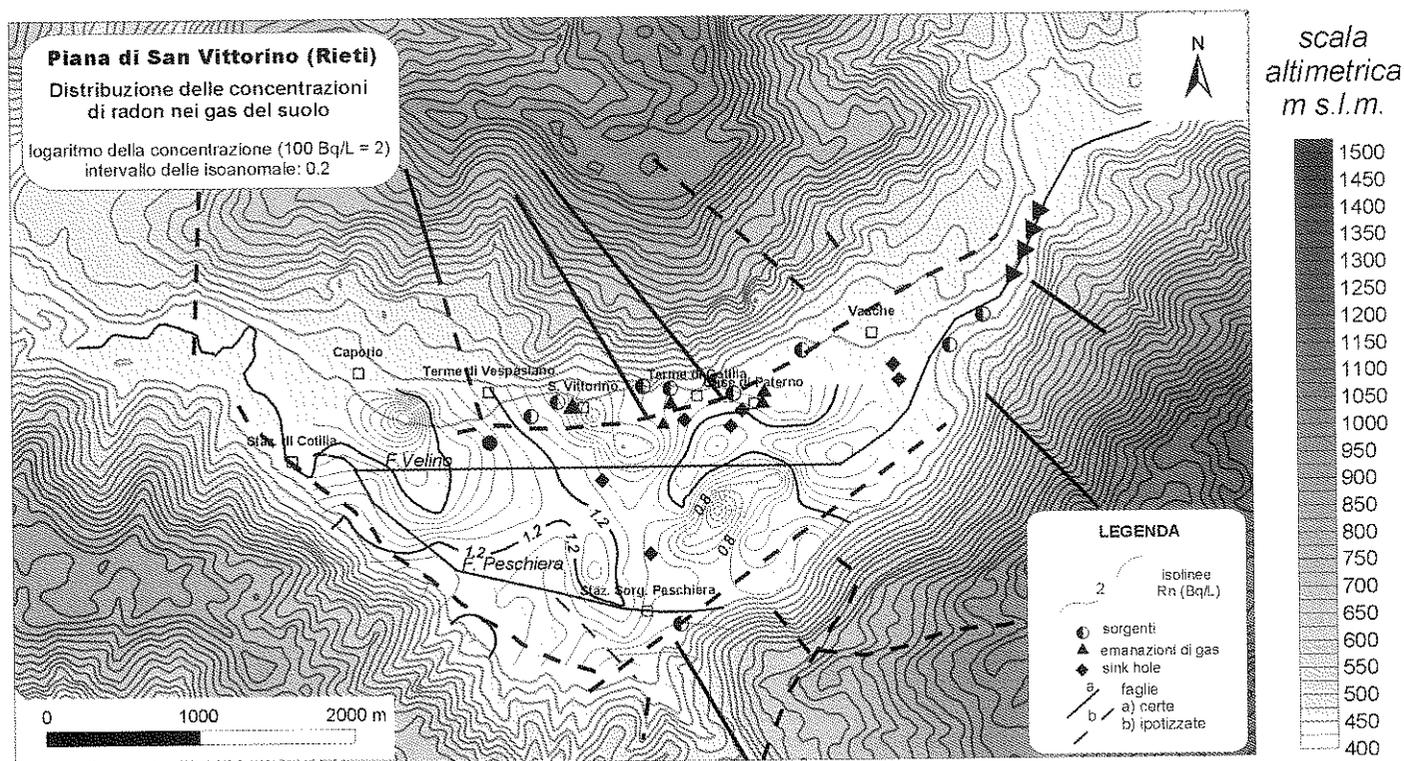


Fig. 11 - Mappa ad isolinee di concentrazione di radon nei gas del suolo.

0.1 ÷ 2 l/s), poste in corrispondenza di laghetti originatisi per sprofondamento (*sinkholes*).

La piana alluvionale presenta un reticolo di drenaggio in gran parte riferibile agli interventi di bonifica della fine del secolo scorso e degli inizi di questo secolo, che intercetta frequentemente la falda idrica a causa della ridotta soggiacenza (mediamente tra 1 e 2 m). Questo assetto idrogeologico si completa con i seguenti elementi:

- la presenza dell'alveo pensile del F. Velino, che con le perdite in alveo di circa 1000 l/s medi annui (BONI *et alii*, 1995) introduce uno spartiacque relativo nella falda alluvionale;
- la probabile esistenza di antichi alvei del F. Velino (paleoalvei), specialmente nel settore meridionale della piana, desumibili anche dalla disposizione dei terrazzi fluviali (fig. 1);
- gli acquisti in alveo del F. Peschiera nel tratto compreso tra la Ferrovia e Case Crescenzi, cautelativamente stimati nell'ordine del mc/s.

Le acque emergenti presentano due facies idrogeochimiche:

1) acque bicarbonato calciche, prevalenti sul bordo meridionale della piana, con temperatura all'emergenza compresa tra 9.5° C e 10.5° C, pH compreso tra 7.2 e 7.5 e conducibilità in genere riferibile ad uno spettro di 550-610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;

2) acque bicarbonato-solfato-calciche, prevalenti al margine settentrionale ed orientale, con temperatura all'emergenza variabile tra circa 11° C e 16° C (Cotilia), pH compreso tra 6.5 e 8, conducibilità riferibile ad un ampio spettro compreso tra 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (S. Erasmo II) e 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Cotilia).

Come già evidenziato in DALL'AGLIO & CAMPANILE (1996), mentre il primo gruppo (a) è riferibile agli acquiferi carbonatici di piattaforma, dove gli ioni estranei agli equilibri carbonato-calcici presentano concentrazione da modesta a trascurabile, il secondo gruppo di acque (b) appare espressione di una contaminazione della falda carbonatica da parte di circuiti idrotermali capaci di imprimere un blando termalismo.

L'allineamento delle emergenze solfato-calciche appare condizionato dai sistemi di discontinuità che delimitano la piana. In particolare risultano ben definiti gli allineamenti localizzati per linee parallele al bordo settentrionale della piana (NE-SW), rappresentati dalle emergenze di San Vittorino, Pergine, Cotilia, Vasche, Paterno e laghetti per sprofondamento presso la via Salaria. Viceversa sono meno evidenti e talvolta incerti quelli trasversali lungo la direzione NW-SE, fatta eccezione per l'associazione dei laghetti antistanti Micciani con la sorgente di San Vittorino.

#### PROSPEZIONE DEI GAS DEL SUOLO

Una prospezione geochimica dei gas del suolo è stata condotta nella Piana di San Vittorino allo scopo di approfondire il ruolo svolto dalle strutture sepolte al di sotto della coltre alluvionale nel condizionare l'assetto idrogeologico profondo ed il *mixing* di acque osservato. La prospezione ha interessato lo studio della distribuzione delle concentrazioni nei suoli di alcune specie gassose endogene (elio e radon) legate alla presenza ed all'orientazione di discontinuità tettoniche che costituiscono le principali zone di migrazione ed accumulo in superficie. Il prelievo dei campioni di gas del suolo è stato condotto utilizzando una metodologia proposta negli anni '70 dal-

l'U.S. Geological Survey del Colorado (ROBERTS *et alii*, 1975; BRADY & RICE, 1977) e successivamente utilizzata presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma (LOMBARDI *et alii*, 1984; CIOTOLI *et alii*, 1993; 1994). Il campionamento ha previsto il prelievo di 91 campioni di gas con una densità di campionamento di circa 30 campioni per kmq. L'elio ( $^4\text{He}$ ) è stato analizzato con uno spettrometro di massa tarato per la sola massa 4 (mod. *Varian Helium Leak Detector* 938-41). L'analisi del campione è stata confrontata con quella ottenuta da un campione di aria atmosferica la cui concentrazione è ritenuta costante e pari a 5220 ppb (HOLLAND & EMERSON, 1990). Il risultato viene, quindi, espresso in termini di  $\Delta\text{He}$  (ppb), ovvero come differenza tra la concentrazione di elio nel campione e quella nell'atmosfera. Il radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), la cui attività viene espressa in Becquerel per litro (Bq/L), è stato analizzato *in situ* per mezzo di un contatore a scintillazione portatile fornito di cella di Lucas (EDA RD 200).

La tab. 1 riporta i principali parametri statistici relativi alle misure di concentrazione dei campioni di gas prelevati nella piana.

Poiché i dati geochimici sono caratterizzati, generalmente, da una certa variabilità, è necessario stabilire se la concentrazione misurata deve essere considerata un'anomalia naturale, o addirittura un *outliers*, oppure se essa costituisce soltanto un errore derivato dalle tecniche di campionamento, di analisi o dalle condizioni di campagna. Pertanto l'identificazione delle anomalie diventa un momento critico in molte delle situazioni esplorative. Nella pratica comune non esiste una procedura *standard* per definire un valore di «soglia» oltre il quale si può parlare di anomalia. Il termine «soglia» viene usato, generalmente, per identificare un valore specifico che separa i valori anomali da quelli di *background*, e poiché è noto che nelle aree sismicamente attive i valori anomali suggeriscono la presenza di discontinuità tettoniche, di conseguenza la scelta del valore di soglia è fondamentale nell'identificazione delle zone di anomalia.

Data la frequente presenza di valori estremamente elevati (*outliers*) il calcolo dei parametri statistici rappresentativi del set di dati viene effettuato escludendo i valori inferiori della  $m - 2\sigma$  e maggiori della  $m + 2\sigma$  (circa il 5% dei dati). Il set di dati corretto viene utilizzato per l'elaborazione dei diagrammi di probabilità cumulata (SINCLAIR, 1974; 1991; DAVIS, 1986) mediante i quali è possibile effettuare una stima del contrasto geochimico tra i valori di *background* e quelli anomali, individuando il valore di soglia di anomalia, l'eventuale presenza di più popolazioni, nonché la natura isotropa od anisotropa della distribuzione delle anomalie e la loro estensione areale. A questi aspetti si collega il concetto di definizione «geometrica» (spaziale) di anomalia, infatti in molti casi nelle mappe ad isoplete è possibile osservare come le iso-

linee di concentrazione anomala mostrino una geometria più o meno allungata (anisotropia) secondo direzioni ben definite. Questo carattere «lineare» delle anomalie costituisce un esempio di «anomalia geometrica» (FRIDMAN, 1990) in quanto esso rappresenta un forte indizio di una risalita di gas legata ad un controllo strutturale, ovvero alla presenza di sistemi di faglie e fratture. Infatti, è poco ragionevole pensare che gli errori sistematici dovuti a fenomeni superficiali (biologici, climatici), ad errori di campionamento (strumentali, analitici, umani), o anche a fattori casuali possano dare luogo a configurazioni rettilinee di diversi centinaia di metri di lunghezza (DUDRIDGE *et alii*, 1991; KING *et alii*, 1996). Le rappresentazioni cartografiche elaborate consistono in mappe puntuali (*dot-maps*), in cui la grandezza del simbolo è proporzionale al valore di concentrazione, e mappe ad isolinee di concentrazione (isoplete) (2D e 3D).

Le concentrazioni di elio mostrano valori molto vicini allo standard atmosferico nei settori sud-orientale ed sud-occidentale della piana. Al contrario, concentrazioni anomale orientate in direzione E-W e N-S sono localizzate lungo il bordo settentrionale a partire dal km 100 della Salaria fino all'abitato di Case di Paterno, ed al centro della piana tra gli abitati di Micciani e S. Vittorino.

L'analisi della curva di probabilità cumulata (fig. 6) mostra un valore di soglia dell'anomalia pari a circa 60 ppb, esso separa i valori del fondo naturale (0-60 ppb) dai valori anomali (> 60 ppb); è possibile, inoltre, distinguere un gruppo di campioni con concentrazioni comprese tra 60 e 120 ppb che caratterizza una popolazione di deboli anomalie, ed infine alcuni campioni con valori elevati di anomalia fino a 600 ppb. La restituzione cartografica (*dot-map*) (fig. 7) delle popolazioni individuate unitamente alla mappa delle isoplete (fig. 8) mostra la presenza di allineamenti di valori anomali in direzione E-W e NNW-SSE rispettivamente lungo il bordo settentrionale e al centro della piana.

Considerando le differenti proprietà chimico-fisiche tra elio e radon, e quindi la loro differente mobilità nel suolo, ed il diverso significato che i due gas assumono nell'ambito degli studi di neotettonica, anche il radon mostra la presenza di allineamenti di concentrazioni anomale in corrispondenza delle principali discontinuità tettoniche della piana e/o di zone di frattura secondarie. Il valore medio delle concentrazioni di radon ( $\approx 28$  Bq/L) risulta essere più elevato rispetto alla media calcolata ( $\approx 15$  Bq/L) su circa 10000 campioni di gas prelevati in altre aree italiane (LOMBARDI *et alii*, 1993; LOMBARDI *et alii*, 1996), e risulta, tuttavia, essere coerente con la media misurata in altre aree tettonicamente attive (i.e. Piana del Fucino, CIOTOLI *et alii*, 1998). L'esame della curva di probabilità cumulata (fig. 9) suggerisce la presenza di un valore di soglia intorno a 12 Bq/L, tale valore determina una popolazione di *background* (0-12 Bq/L) ed una popolazione

TABELLA 1

Parametri statistici descrittivi delle misure di concentrazione dei gas nel suolo nella Piana di S. Vittorino

Gas	N° Camp	Min	Max	Media	Dev. St.	Media*	Dev. St.*	Soglia di anomalia
Rn(Bq/L)	91	1.48	599.77	38.15	75.77	27.9	27.9	12
He (ppb)	91	0	577	33	92	24	54	60

\* Parametri statistici relativi al set di dati corretto escludendo gli *outliers* (5% dei dati).

ne di campioni caratterizzati da concentrazioni anomale di radon ( $> 12$  Bq/L). Tuttavia nel grafico è possibile distinguere tra i valori anomali almeno tre popolazioni: valori di concentrazione compresi tra 12-16.3 Bq/L (*background/anomalie locali*), valori compresi tra 16.3-40 Bq/L (anomalie mediamente elevate), valori maggiori di 40 Bq/L (anomalie elevate). La mappa di fig. 10 (*dot-map*) mostra la presenza di allineamenti di concentrazioni anomale lungo i bordi settentrionale ed orientale, ed in direzione NW-SE e NNW-SSE attraverso la piana rispettivamente tra gli abitati di Caporio e Micciani e di S. Vittorino e Micciani. I valori di radon più elevati (fino a 600 Bq/L) sono localizzati nel settore nord-occidentale dell'area campionata.

Poiché la presenza di valori molto elevati influenza l'elaborazione della mappa ad isolinee di concentrazione mascherando il carattere anisotropo delle anomalie, la mappa è stata rielaborata utilizzando i dati normalizzati mediante trasformazione in logaritmo. La fig. 11 mostra un andamento anisotropo delle isolinee di concentrazione:

- in direzione E-W in corrispondenza del bordo settentrionale della piana tra le Terme di Cotilia e il km 103 della Via Salaria;
- in direzione NE-SW lungo il margine orientale della piana;
- in direzione NW-SE la centro della piana tra gli abitati di Micciani e Terme di Vespasiano e lungo il margine nord-occidentale;
- un allineamento in direzione NE-SW di anomalie circolari (*spotty anomalies*) tra Case di Paterno e la ferrovia Terni-Sulmona.

Lo studio dei gas del suolo nella Piana di S. Vittorino ha messo in evidenza come la distribuzione delle concentrazioni di elio e radon venga influenzata dall'assetto strutturale e da quello idrogeologico dell'area. La presenza lungo il bordo settentrionale della piana delle sorgenti mineralizzate indica l'esistenza di fenomeni di *mixing* tra la falda idrica ed apporti di fluidi profondi che risalgono in superficie attraverso le importanti strutture tettoniche dell'area. L'andamento anisotropo (E-W) delle anomalie di elio (fig. 8) in corrispondenza del margine settentrionale della piana ripropone lo stesso controllo strutturale precedentemente ipotizzato in base alla distribuzione dei solfati nelle sorgenti, e non soltanto conferma il ruolo svolto da questi sistemi di discontinuità nell'agevolare la risalita di fluidi profondi e quindi il *mixing* di acque, ma propone anche un metodo di indagine efficace per una migliore definizione delle discontinuità trasversali alla piana, solo ipotizzabili in base al contesto geologico. Congruentemente con l'area di contaminazione a solfati sul bordo settentrionale della piana l'anomalia di elio si presenta estesa tra il lago di Paterno e S. Vittorino (sorgente), ma è molto più ampia rispetto alla zona sorgentizia. Ciò può indicare che il sistema di discontinuità bordiero risulta condizionare la distribuzione dei gas del suolo anche in aree distanti dal margine della piana segnalando in tal modo la sua estensione al di sotto della coltre di sedimenti quaternaria.

È opportuno, inoltre, ricordare che l'elio, essendo di origine più profonda rispetto alle altre specie gassose, può fornire informazioni sulla presenza di elementi tettonici di importanza regionale. L'anomalia localizzata nel centro della piana, ed allungata in direzione N-S, appare essere legata a motivi strutturali riconducibili al prolun-

gamento al di sotto dei sedimenti fluvio-lacustri della *Faglia di Micciani-Fiamignano*, dando parziale conferma agli indiziari allineamenti di *sinkholes* ed alla correlazione dei laghetti solfati calcici con la sorgente di San Vittorino Ferruginosa

Anche il radon mostra una distribuzione anisotropa delle anomalie di concentrazione (fig. 11) sebbene nel settore occidentale della piana questa venga in parte mascherata dalla presenza di valori estremamente elevati (fino a 600 Bq/L) in corrispondenza dell'affioramento di travertini nei pressi dell'abitato di Caporio. La presenza di concentrazioni di radon molto elevate rispetto a quelle del settore orientale può essere imputata ad una circolazione di fluidi che interessa probabilmente uno spessore maggiore di sedimenti al di sopra del basamento. Pertanto, poiché il tragitto che il gas deve compiere per raggiungere la superficie è maggiore, maggiore è la possibilità che esso si accumuli nei fluidi circolanti e venga trascinato sotto forma di microbolle di gas. Inoltre, la presenza dei travertini indica sicuramente che le emergenze di questo settore siano arricchite in anidride carbonica, la quale, come è noto in letteratura, costituisce il *carrier* per le specie gassose in tracce come il radon. In quest'area la mappa di figura 11 mostra due andamenti paralleli in senso appenninico delle isoplete tra Piano dei Micciani e Terme Vespasiano, ed a ridosso del bordo sud-occidentale della piana correlabili rispettivamente all'orientazione della *Faglia di Micciani-Fiamignano* e della *faglia bordiera*.

Nel settore orientale le anomalie di radon mostrano, come per l'elio, un allungamento in direzione E-W, ben visibile tra gli abitati di Vasche e Case di Paterno. Tale anomalia conferma:

- il controllo della tettonica sulla migrazione dei fluidi verso la superficie, come del resto viene messo in evidenza dall'allineamento delle sorgenti termali ricche in solfati;
- la presenza di discontinuità tettoniche di importanza regionale.

## CONCLUSIONI

I risultati degli studi preliminari svolti presso la Piana di San Vittorino forniscono alcuni significativi riscontri circa il controllo strutturale e le influenze dell'assetto idrogeologico sui processi che presiedono alla formazione dei *sink-hole*.

In particolare dal confronto del rilevamento geologico e delle carte gravimetriche appare evidente che la Piana di S. Vittorino rappresenta una depressione tettonica delineatasi fin dal Pleistocene inferiore ma evolutasi completamente nel Pleistocene medio, dopo la formazione dei travertini di Canetra e Vasche, che appaiono dislocati da tettonica recente.

I rilievi gravimetrici mostrano inoltre che la parte più depressa è localizzata quasi al centro della conca, in buon accordo con quanto si ricava dall'assetto morfostrutturale dell'area, dove i blocchi di M. Nuria e di M. Paterno risultano i più sollevati, quelli di Micciani e Cittaducale ribassati rispetto ai primi, mentre la dorsale di Carcariola, che nella carta gravimetrica corrisponde ad una zona di massimo relativo, è posta in posizione intermedia tra i blocchi di Micciani e Cittaducale e la depressione di S. Vittorino, di cui costituisce lo sbarramento occidentale.

Dal confronto delle carte di distribuzione delle sorgenti e dei deflussi idrici, e delle carte di distribuzione dei gas appaiono ancora più evidenti gli effetti del controllo strutturale recente sulle manifestazioni citate. L'allineamento delle sorgenti solfato-calciche, insieme alle variazioni delle concentrazioni di solfati sembra strettamente legato alla presenza di fluidi idrotermali lungo dislocazioni a direttrice ENE-WSW, al bordo meridionale di M. Paterno.

L'allineamento dei laghetti e dei *sinkholes*, Lago di Micciani-S. Vittorino, coincide con il prolungamento settentrionale della *Faglia di Micciani-Fiamignano* alla cui attività sembra tra l'altro legata la notevole anomalia di radon nella porzione nord-occidentale della piana ed all'anomalia di elio che attraversa la piana in direzione NNW-SSE.

Un altro elemento che sembra confermare l'ipotesi di un notevole controllo strutturale è dato dalla coincidenza fra gli allineamenti delle anomalie dei gas del suolo e delle principali facies idrogeochimiche con le principali dislocazioni rilevate nell'area.

#### OPERE CITATE

- BONI C., CAPELLI G. & PETITTA M. (1995) - *Carta idrogeologica della alta e media valle del F. Velino*. Elaborazione cartografica e stampa SystemCart, Roma.
- BOSI (1975) - *Osservazioni preliminari su faglie probabilmente attive nell'Appennino Centrale*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 827-859.
- BERTINI T., BOSI C., MESSINA P. & SPOSATO A. (1986) - *Elementi di tettonica compressiva pliocenica nella zona di Borgo S. Pietro (Rieti)*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 547-553.
- BRADY B.T. & RICE R.S. (1977) - *Helium determinations as an exploration technique at the Ambrosia Lake uranium district, McKinley County, New Mexico*. Open File Report 77-699, U.S. Geological Survey, Denver, Col.
- CAPOTORTI & MARIOTTI G. (1991) - *Le strutture sabine della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'area del Lago del Salto (RI)*. Studi Geol. Cam. Vol. spec. 2, CROP **11**, 27-31.
- CIOTOLI G., ETIOPE G., LOMBARDI S., NASO G. & TALLINI M. (1993) - *Geological and soil gas investigations for tectonics prospecting: preliminary results over the Val Roveto fault (Central Italy)*. Geologica Romana, **29**, 483-493.
- CIOTOLI G., ETIOPE G., GAMBINO P. & LOMBARDI S. (1994) - *Elio e radon nei gas del suolo quali traccianti di discontinuità tettoniche: confronto con l'analisi del campo di fratturazione nella valle dell'Ofanto (Appennino meridionale)*. Geologica Romana, **30**, 761-768.
- CIOTOLI G., GUERRA M., LOMBARDI S. & VITTORI E. (1998) - *Soil-gas survey for tracing seismogenic faults: a case study in the Fucino basin (central Italy)*. In stampa su JGR.
- DALL'AGLIO M. & CAMPANILE R. (1996) - *Rinaturalizzazione del bacino del F. Tevere alla luce dei peculiari caratteri geochimici del suo bacino. Caratterizzazione geochimica delle acque del bacino del F. Velino*. Atti del 4° Seminario della International Association for Environmental Design «Rinaturalizzazione fluviale», Roma, 1° Marzo 1996, 78-97.
- DAVIS J.C. (1986) - *Statistics and data Analysis in geology*. John Wiley & Sons, second edition, 645 pp.
- DUDDRIDGE G.A., GRINGER P. & DURRANCE E.M. (1991) - *Fault detection using soil gas geochemistry*. Quaterly J. of Engineering Geology, **24**, 427-435.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R. & LOMBARDI S. (1993) - *Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy*. Quaternary Proceedings, **3**, 47-56.
- FRIDMAN A.I. (1990) - *Application of naturally occurring gases as geochemical pathfinders in prospecting for endogenetic deposits*. J. Geochem. Explor., **38**, 1-11.
- HOLLAND P.W. & EMERSON D.E. (1990) - *The global helium 4 content of near-surface atmospheric air*. Theophrastus Pub. Athens, pp. 97-113.
- KING C-K., KING B-S., EVANS W.C. & ZANG W. (1996) - *Spatial radon anomalies on active faults in California*. App. Geochemistry, **11**, 497-510.
- LOMBARDI S., DI FILIPPO M. & ZANTEDESCHI L. (1984) - *Helium in Phlegraean Fields, Central Italy*. Geophys. Res. Lett., **17**, 849-852.
- LOMBARDI S., BENVIGNU F., BRONDI A. & POLIZZANO C. (1993) - *Field investigation with regard to the impermeability of clay formations: Helium-4 soil gas surveys in sedimentary basins as a tentative study of secondary permeability in clayey sequences. Final report*. Work carried out under contract with the European Atomic Energy Community in the framework of its shared cost R&D programme «Management and Storage of Radioactive Waste (1985-1989) Part A, Task 4: «Geological disposal studies». EUR 14585 EN.
- LOMBARDI S., ETIOPE G., GUERRA M., CIOTOLI G., GRAINGER P., DUDDRIDGE G.A., GERA F., CHIANTORE V., PENSIERI R., GRINDROP P. & IMPEY M. (1996) - *The refinement of soil gas analysis as a geological investigative technique. Final Report*. Work carried out under a cost sharing contract with the European Atomic Energy Community in the framework of its 4<sup>th</sup> R&D programme on «Management and Storage of Radioactive Waste» (1990-1994) Part A, Task 4: «Disposal of Radioactive Waste». EUR 16929 EN.
- ROBERTS A.A., FRIEDMAN I., DONOVAN T.J. & DENTON E.H. (1975) - *Helium survey, a possible technique for locating geothermal reservoirs*. Geophys. Res. Lett., **2**(6), 209-210.
- SINCLAIR A.J. (1974) - *Selection of threshold values in geochemical data using probability plots*. J. Geochem. Explor., **3**, 129-149.
- SINCLAIR A.J. (1991) - *A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited*. Journ. Geochem. Explor., **41**, 1-22.