

APAT

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici

**TECNICHE DEL TELERILEVAMENTO PER IL CONTROLLO
DELLA EVOLUZIONE DEI FENOMENI DI SUBSIDENZA NELLE
AREE VULCANICHE: *LE ACQUE ALBULE – TIVOLI (RM)***

Dott. Ing. Alessandro Angelini

TUTOR: *Dr. Mario Aversa*

Servizio per la Promozione della Formazione Ambientale

INDICE

PREMESSA	1
METODOLOGIA.....	3
INTRODUZIONE.....	5

PARTE PRIMA

IL TELERILEVAMENTO

1.1 BREVI CENNI SUL TELERILEVAMENTO	8
1.1.1 <i>La radiazione elettromagnetica</i>	<i>11</i>
1.2 STRUMENTI E PIATTAFORME.....	16
1.2.1 <i>Tecniche passive nel visibile (VIS) e nel vicino infrarosso (NIR)</i>	<i>20</i>
1.2.2 <i>Le Tecniche attive</i>	<i>43</i>
1.2.3 <i>La tecnica dei Diffusori Permanenti</i>	<i>49</i>
1.3 LA FOTOINTERPRETAZIONE.....	58
BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE	68

PARTE SECONDA

ANALISI TERRITORIALE

1.1 ASPETTI FISICO - GEOGRAFICI	70
1.1.1 <i>Inquadramento geografico areale.....</i>	<i>70</i>
1.1.2 <i>Il Bacino delle Acque Albule.....</i>	<i>87</i>
1.1.3 <i>Evoluzione storica ed assetto del territorio</i>	<i>95</i>
1.2 I FENOMENI DI SUBSIDENZA.....	119
1.3 ANALISI DEL RISCHIO	125
1.3.1 <i>Il Rischio</i>	<i>125</i>
1.3.2 <i>Le emissioni gassose in area vulcanica</i>	<i>127</i>
1.3.3 <i>Le informazioni telerilevate</i>	<i>131</i>
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	144
BIBLIOGRAFIA	146

PREMESSA

La presente indagine, nata tenendo conto delle specifiche professionalità dell'allievo, in questo caso un Dottore in *Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*, si è concretizzata in un lavoro scientifico estremamente proficuo ed utile.

Da una parte, infatti, si è ritenuto realizzare un piccolo, pregevole compendio sui principi del *Telerilevamento* che risulta, senza dubbio, anche di semplice consultazione e guida, dall'altra si è entrati propriamente nel merito della tematica affrontata. In questo modo si è ritenuto di chiarire ai "profani" quali siano le specifiche potenzialità applicative e quali siano i risultati oggettivi che si possono conseguire.

La seconda parte del lavoro svolto, peraltro realizzato con una buona dose di entusiasmo (concretizzatosi in numerose visite e sopralluoghi *in situ*), è stata eseguita in tempi "operativi" utili al conseguimento degli obiettivi prefissati che erano, nel caso geografico di studio, finalizzati ad "esplorare" con i dati forniti da questo tipo di tecnologia un territorio antico, anch'esso sede di *Mito* e *Leggenda*, quale quello del famoso *Comprensorio Tiburtino* dove affiorano le decantate acque dello *Stige*, il fiume degli *Inferi* della mitologia greca e romana, ed un connesso manifestarsi di fenomeni e strani eventi *inter laudatas ad Styga missus aquas*.

Lo stesso *Marziale*, infatti, in un famoso epigramma ¹, peraltro di difficile interpretazione, abbina all'area di nostro interesse fenomeni di natura misteriosa (ed altresì pericolosa) i quali sembrerebbero essersi verificati proprio ai tempi in cui l'autore delle amate sentenze latine visse.

Il fascino delle indicazioni di natura classica, le fotografie aeree (storiche e non), le immagini telerilevate da satellite nonché gli attuali registrati movimenti di subsidenza areale in un distretto dell'*hinterland* della Capitale, recentemente oggetto di fortissima antropizzazione, hanno contribuito a fornire e definire un quadro del *Rischio Territoriale* che desta non poche preoccupazioni tra la popolazione che ivi risiede e lavora.

Appare chiaro che l'indagine esplorativa stessa non poteva essere del tutto esaustiva in virtù del poco tempo concesso all'allievo per effettuare il periodo di formazione previsto ed anche dell'inesistente sostegno economico per i necessari sopralluoghi di verifica.

¹ MARZIALE, *Tutti gli epigrammi*, a cura di Alberto Gabrielli, Torino, UTET, 1957, pp.778, cfr. pag.233.

Ma tale periodo, invece, nel quale sia la serietà professionale dimostrata, ricca di spunti e di intuizioni di non poca preziosità, sia l'opera di sprono ben recepita si sono ben distinte, ha comunque permesso di arrivare alla presentazione di risultati scientifici che certamente possono essere considerati degni di nota.

Senza attestare encomi di sorta, il presente lavoro dimostra senza dubbio le oggettive potenzialità di formazione nel settore di giovani preparati ai quali spetta, ed è questo l'augurio, un radioso futuro scientifico.

METODOLOGIA

L'approfondimento di tematiche sulla valutazione del *Rischio territoriale*, in una area dell'*hinterland romano* che ha mostrato, nel corso dei secoli, particolari evidenze di attività e fenomeni conosciuti anche anticamente, è stato il chiaro obiettivo della presente indagine.

Si è scelto di indagare su alcune particolari manifestazioni areali quali emissioni gassose, ribollimento delle acque, variazione del livello di falda, etc.. al fine di comprenderne il contesto geografico fisico, geomorfologico e tettonico strutturale.

Tali fenomeni di *vulcanismo secondario* apparivano come misteriosi segni e venivano localmente interpretati dall'uomo e fino alle soglie dell'Era Moderna solamente come manifestazioni sovranaturali o divine.

Come è noto, nell'area presa in esame, sono presenti, oltre che il classico diffuso odore di uova marce, tipico dell'anidride solforosa, numerose sorgenti di acqua sulfurea, tra le quali le cosiddette *Acque Albule*, già famosissime presso gli antichi Romani per le loro proprietà termali e curative. Esse sono di sicuro arealmente le più degne di nota ed è per questo motivo che la località del loro affioramento è oggi comunemente nota anche come *Terme di Roma*.

Attraverso l'adozione di un approccio multidisciplinare, è stato possibile valutare effettivamente quanto il *Rischio areale* sia stato di fatto troppo sottovalutato fino ad ora.

Oltre alle fonti di dati più tradizionali, come ad esempio la *cartografia tematica* esistente sulla zona (cartografia storica e non), le preziose fonti bibliografiche (le quali riportano informazioni e descrizioni più o meno accurate sul manifestarsi, anche in tempi piuttosto recenti, di particolari fenomeni quali emissioni gassose, ribollimento delle acque, variazione del livello di falda, etc.) e le fotografie aeree, sono stati presi in considerazione dati modernamente più recenti, in particolare quelli provenienti dai nuovi sofisticati sensori montati su piattaforme satellitari.

In particolare, tra questi ultimi, al fine di ottenere una visione d'insieme la più completa possibile, si sono raccolti i dati di subsidenza areale registrati mediante l'innovativa tecnica dei *Diffusori Permanenti*, tecnica basata sull'analisi multitemporale di dati satellitari di tipo Radar.

Appare quindi evidente come, l'uso combinato di fonti e tecnologie differenti, sia l'unica strada da seguire per poter affrontare le problematiche del *Rischio territoriale*, analizzando tutti gli aspetti che contribuiscono alla sua determinazione ad una scala di rappresentazione adeguata (areale), per poi (eventualmente) scendere a scale di dettaglio approfondendo così l'analisi particolareggiata di aspetti di interesse specifico.

La sola analisi di singole criticità, se non opportunamente inserita in un contesto più ampio che miri ad evidenziare le correlazioni tra le diverse manifestazioni, permette difficilmente di individuare con certezza le cause sia naturali che antropiche e quindi, consequenzialmente, le possibili soluzioni di intervento per fenomeni che, per loro stessa natura, mostrano dimensioni ed aree di influenza significative e tutt'altro che trascurabili.

INTRODUZIONE

La presente indagine è stata svolta con lo scopo di meglio comprendere ed analizzare il dissesto idrogeologico registrato ed attualmente in atto nella cosiddetta e nota area delle *Acque Albule - Tivoli* (ROMA).

Le principali manifestazioni di tale dissesto infatti sono rappresentate dai documentati fenomeni di subsidenza che interessano l'area.

Si è metodologicamente proceduto, in primo luogo, ad inquadrare dal punto di vista geomorfologico la porzione di territorio in esame all'interno di una più vasta regione di competenza afferente all'*apparato vulcanico dei Colli Albani* e ciò al fine di evidenziare, ove ne sussistessero indicazioni oggettive, una specifica "natura areale" dei fenomeni registrati.

Precedenti e qualificati studi hanno già evidenziato come alcune fenomenologie vulcaniche riscontrate di tipo secondario (emissioni gassose tra cui la CO₂, presenza e variabilità nelle portate delle sorgenti di acque termali, etc.) sembrerebbero essere in stretta relazione con una ripetuta ciclica e potenziale attività del *Vulcano laziale* peraltro, secondo molti dichiarato inequivocabilmente solo quiescente.

È stato quindi necessario procedere ad una attenta analisi delle informazioni storiche disponibili così da poter mostrare come i fenomeni vulcanici dell'area laziale, ed in particolare quelli correlabili alle specificità territoriali del comprensorio delle *Acque Albule*, siano in continua evoluzione e tutt'altro che inattive.

L'area indagata presenta, senza dubbio, caratteristiche e problematiche particolari anche e soprattutto per la presenza di importanti centri abitati ed insediamenti produttivi (primi fra tutti quelli legati alla attività di estrazione del rinomato *travertino*) che contribuiscono significativamente alla determinazione del *Rischio* presente sull'area.

È infatti noto che il **Rischio Totale** (R_{TOT}), nella classica formulazione $R_{TOT} = P \times V \times E$, rappresenti il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un evento dannoso.

Il valore del *Rischio totale* dipende quindi dalla **Pericolosità** (P) e dalla **Vulnerabilità** (V), ma anche e soprattutto dagli *elementi esposti*, cioè l'**Esposizione** (E), e di quest'ultima, prima fra tutti l'incolumità stessa delle persone, l'elemento più importante di cui tenere conto ogni qual volta si proceda ad una valutazione del *Rischio* in quanto tale.

Dall'analisi comparata di tutti i dati al momento disponibili, è stato possibile evidenziare come tutta l'area sia stata oggetto, soprattutto negli ultimi decenni, di profonde modificazioni nell'assetto territoriale.

Occorre, prima di tutto, ricordare che i dati demografici e l'analisi combinata della cartografia, delle foto aeree e delle immagini satellitari, mostrano come la pressione antropica esercitata sull'area sia cresciuta esponenzialmente in modo da favorire una urbanizzazione tanto intensa quanto rapida.

Questa repentina modificazione del *territorio tiburtino* ha portato inevitabilmente ad una espansione dei centri abitati, uno stravolgimento ambientale incontrollato tale da rappresentare una esplosione della cementificazione areale.

Infatti, le unità abitative si sono ormai sviluppate in modo tangibile fin proprio a ridosso dei fronti di cava di estrazione del *travertino*, rappresentando un *continuum* tra *industria localizzata* ed *insediamento residenziale* abbinato, di fatto quasi una mostruosità abusiva del *paesaggio*, oramai difficilmente sanabile.

L'altissima densità abitativa ed il continuo sfruttamento delle risorse del sottosuolo (incluse le acque sotterranee), uniti alla oggettiva subsidenza areale (registrata mediante uso di dati telerilevati, *interferometria differenziale* e tecnica dei *Diffusori Permanenti*), fanno sì che la *contestualizzazione* del *Rischio areale* sia sempre in continua evoluzione.

Proprio per questo, appaiono dunque necessari studi ulteriori ed urgenti interventi atti a mitigare e ridurre i possibili *effetti catastrofici* a cui l'area sembrerebbe inequivocabilmente predisposta.

I dati Radar (opportunamente elaborati) hanno infatti evidenziato come tale pericolosa subsidenza areale abbia mostrato, negli ultimi decenni, significativi tassi di incremento.

La velocità di abbassamento verticale degli edifici ha raggiunto, in alcuni casi, valori superiori a 10 *mm/anno*.

Occorre ricordare che l'area ha già ottenuto una ***Dichiarazione di Stato di Emergenza*** in relazione a questi fenomeni, registrati nei Comuni di ***Guidonia Montecelio*** e ***Tivoli*** (Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, 29 settembre 2006).

PARTE PRIMA

IL TELERILEVAMENTO

1.1 Brevi cenni sul Telerilevamento

Telerilevamento è un termine derivante dall'unione del prefisso *tele* (dal greco *τηλε* "lontano") e del termine di lingua italiana *rilevamento*. Per *Telerilevamento*, meglio conosciuto nell'uso scientifico comune come *remote sensing*, si intende più in generale il *rilevamento a grande distanza dell'aspetto e della situazione di un territorio, in particolare delle sue condizioni atmosferiche o ambientali (anche per individuare l'eventuale presenza di prodotti inquinanti), delle sue risorse naturali (boschi, acque, ecc.), di solito effettuato da aerei oppure, attualmente in modo quasi esclusivo, da satelliti artificiali*².

Nel nostro caso la radiazione elettromagnetica costituisce il veicolo di trasporto dell'informazione dall'oggetto osservato (l'ambiente terrestre) al sensore. Gli strumenti utilizzati, siano essi installati su piattaforme aeree o satellitari, misurano le potenze ricevute per effetto delle interazioni tra i campi elettromagnetici e il mezzo osservato; l'entità e le caratteristiche di queste interazioni sono legate alle proprietà fisiche e chimiche del mezzo stesso.

Tale osservazione permette di estrarre quindi due tipi di informazioni: vi è un contenuto qualitativo sulla tipologia di copertura: acque, boschi, minerali, terreni coltivati, terreni edificati ecc.; vi è anche un'informazione geometrica ovvero quella relativa alla posizione e ai contorni delle diverse qualità identificate.

I sistemi di misura di tipo classico (rilevamento) usano, in generale, strumenti che sono a diretto contatto con il mezzo osservato e ne campionano le caratteristiche in singoli punti; hanno il vantaggio di una misura in generale più precisa perché basata su singoli punti ma hanno l'inconveniente di essere spesso molto onerosi e questo ne limita l'utilizzo soprattutto se il fenomeno da osservare è esteso.

I sistemi di Telerilevamento sono invece sistemi di misura indiretta; la misura è effettuata tramite un sensore che è distante dalla zona osservata ed è generalmente in moto relativo (rotatorio e/o traslatorio) rispetto ad essa; presentano il vantaggio di riuscire ad abbracciare una maggiore superficie osservata con un notevole abbattimento dei costi di acquisizione per unità di superficie ma sono in grado di fornire informazioni (o immagini) con un minor grado di dettaglio proprio perché la maggiore distanza (legata alla quota di

² AA.VV., *Vocabolario della lingua Italiana*, Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani, Roma, 1994, pp. 1311, cfr. pag. 767.

volo) da cui vengono effettuate le acquisizioni compromette la risoluzione geometrica del sensore (sul concetto di risoluzione geometrica si tornerà più avanti).

Il Telerilevamento può essere fondamentalmente interpretato come un processo che si sviluppa in sette fasi distinte³ così come mostrato in **Figura 1**:

- ***Sorgente di energia o illuminazione (A)***: la prima necessità del Telerilevamento è quella di avere una fonte di energia elettromagnetica che illumini l'oggetto di interesse; tale energia può essere quella proveniente dal Sole o da un'altra sorgente esterna eventualmente a bordo dello stesso satellite (come avviene per le applicazioni Radar), ma può anche essere spontaneamente emessa dall'oggetto in virtù delle sue caratteristiche fisiche.
- ***Interazione tra radiazione e atmosfera (B)***: l'Atmosfera è il mezzo attraverso il quale si propaga l'informazione elettromagnetica infatti è interposta sia tra la sorgente e il target, sia tra il target e il sensore; come vedremo più avanti condiziona i dati telerilevati in funzione della sua composizione e delle sue caratteristiche chimico-fisiche.
- ***Interazione con la superficie terrestre (C)***: l'interazione dipende sia dalle proprietà della radiazione che da quelle dell'oggetto osservato.
- ***Energia registrata al sensore (D)***: dopo essere stata riflessa o emessa dalla superficie terrestre l'energia viene ricevuta dal sensore e successivamente registrata.
- ***Trasmissione, ricezione e processamento (E)***: l'energia registrata al sensore deve essere trasmessa a terra, in formato elettronico, dove verrà ricevuta, elaborata e trasformata in una immagine.
- ***Interpretazione ed analisi (F)***: l'immagine trasformata è interpretata visivamente e/o digitalmente per estrarre le informazioni sull'oggetto che è stato osservato.
- ***Applicazione (G)***: la fase finale del processo di Telerilevamento permette di utilizzare le informazioni estratte dall'immagine satellitare come ausilio alla risoluzione di un particolare problema (ad esempio di carattere ambientale).

³ Galati G. e Gilardini A., “*Tecniche e strumenti per il telerilevamento ambientale*”, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Monografie Scientifiche, 2001, pp 300, cfr. pag. 10.

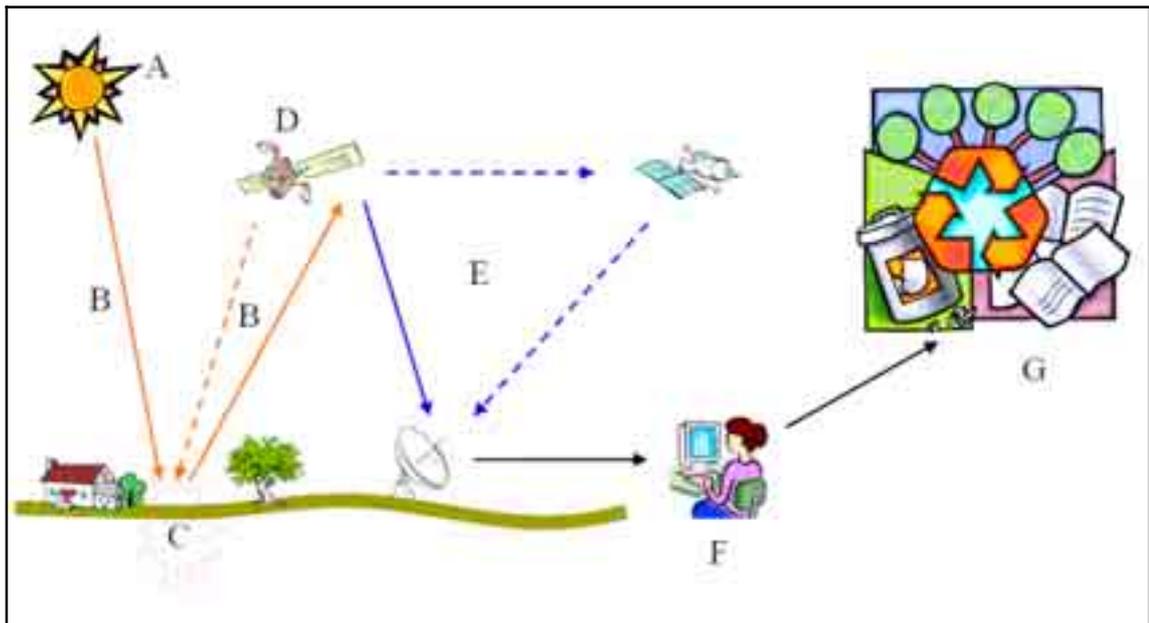


Figura 1: Fasi del processo di Telerilevamento.

Il Telerilevamento non si limita a mostrare i fenomeni visibili ma, grazie alla possibilità di rilevare e misurare realtà non percepibili dall'occhio umano, permette di investigare fenomeni ambientali di difficile interpretazione, rendendo possibile la ripetizione delle misure in intervalli di tempo desiderati.

E' possibile oramai servirsi di queste tecniche e dei loro prodotti senza la necessità di trasformarsi di volta in volta in tecnici della fisica o dell'informatica. Lo sviluppo di diversi pacchetti commerciali ha reso il Telerilevamento una disciplina in espansione e con un'ampia tipologia di applicazioni, come per esempio la produzione di cartografia tematica, l'agricoltura, le analisi geologiche, forestali, e di rischio, il monitoraggio ambientale ecc.

Oggi il Telerilevamento è anche una importante fonte di informazioni per i *Geographical Information System (GIS)* che ormai rappresentano uno strumento indispensabile per l'amministrazione del territorio e delle risorse naturali; infatti la sempre maggiore diffusione dei *GIS* permette di inserire i dati telerilevati in sistemi complessi dove essi possono integrarsi ed interagire con altre informazioni, provenienti da altre fonti, riguardanti il territorio.

1.1.1 La radiazione elettromagnetica

Come si è già introdotto, la radiazione elettromagnetica gioca un ruolo fondamentale nei processi di Telerilevamento essendo il mezzo che trasporta le informazioni sui fenomeni che si intendono studiare.

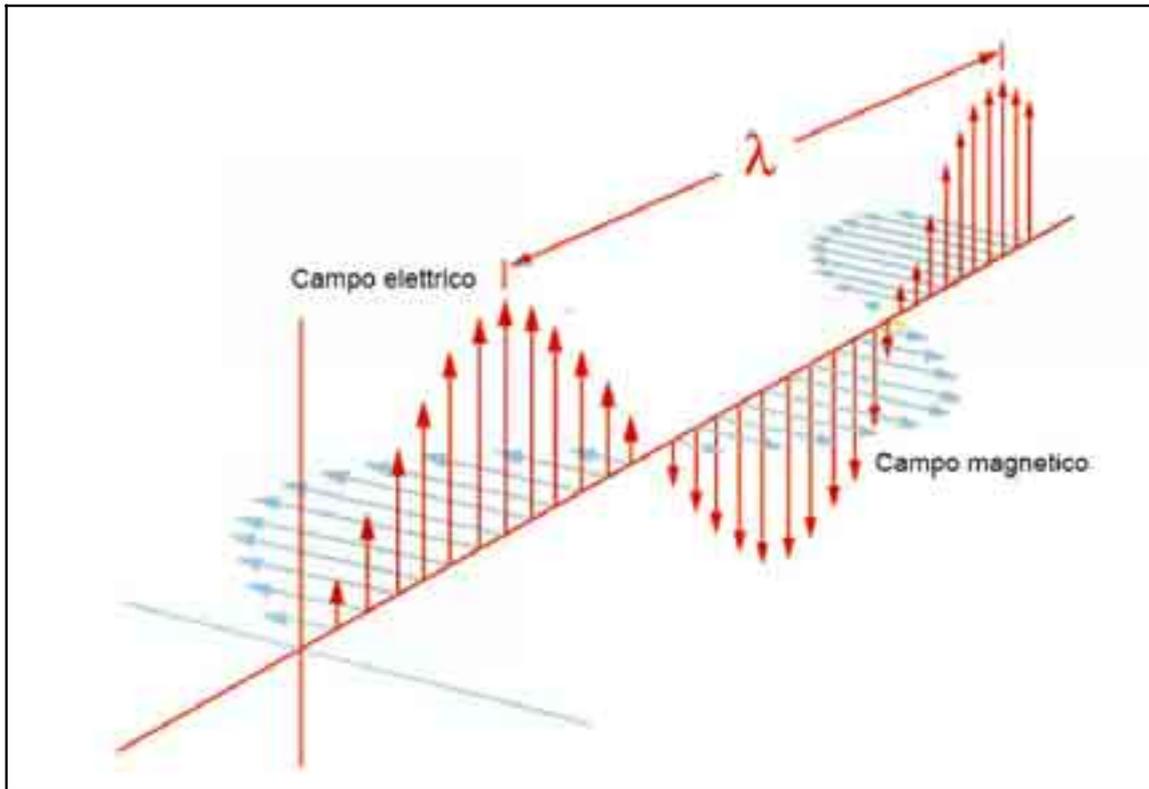


Figura 2: Oscillazioni dei campi elettrico e magnetico di un'onda elettromagnetica. Il campo elettrico e' verticale e si dice che l'onda e' polarizzata verticale. Naturalmente se il campo elettrico giace nel piano orizzontale l'onda si dice polarizzata orizzontale⁴.

In accordo con la teoria ondulatoria, l'energia raggiante può essere descritta come un'onda composta di semplici onde sinusoidali, ciascuna delle quali è caratterizzata da una propria lunghezza d'onda λ e dotata di una componente elettrica (E) ed una magnetica (M), che si propagano nello spazio su piani ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione x ⁵ (**Figura 2**).

Un'onda viene definita dalla sua lunghezza d'onda λ che è la distanza tra due picchi consecutivi dell'onda espressa generalmente in micron ($1\mu m = 10^{-6} m$), oppure dalla frequenza ν , che è il numero di picchi d'onda che passano in un dato punto in un fissato

⁴ Prati C., "Fondamenti di Telerilevamento", Politecnico di Milano, pp 69, cfr. pag.4.

⁵ Dermanis A., Biagi L., "Telerilevamento, informazione territoriale mediante immagini da satellite", Casa Editrice Ambrosiana, 2002, pp 279, cfr. pag. 11.

intervallo di tempo, normalmente espressa in Hertz (Hz) o cicli al secondo. Il prodotto di queste due grandezze è costante e rappresenta la velocità di propagazione dell'onda :

$$c = \lambda \nu \quad \left[\frac{m}{s} \right]$$

dove c , che è la velocità della luce, vale circa 300.000 km/s (più precisamente, 299.793 km/s , nel vuoto). La potenza elettromagnetica emessa da un corpo dipende dalla particolare natura del corpo stesso, dalla sua composizione chimica, dal suo stato fisico, dalla sua temperatura ecc...

L'insieme di tutte le possibili lunghezze d'onda costituisce quello che viene comunemente indicato come spettro della radiazione elettromagnetica (**Figura 3**).

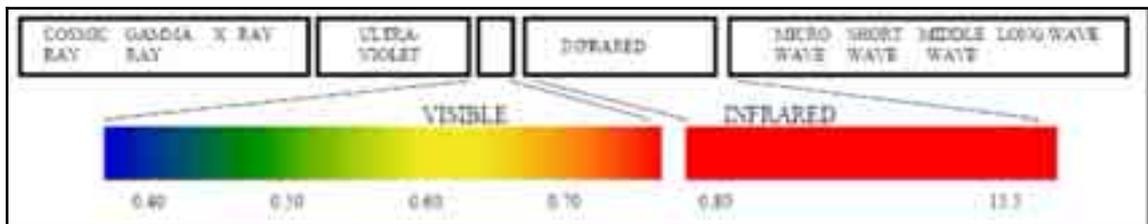


Figura 3: Spettro elettromagnetico.

È possibile identificare alcuni sottointervalli (più comunemente bande) fondamentali che in ordine di lunghezza d'onda crescente sono⁶:

- i **Raggi γ** $\leq 10^{-4} \mu m$;
- i **Raggi X** $10^{-5} - 10^{-3} \mu m$;
- l'**Ultravioletto (UV)** $0,01 - 0,38 \mu m$;
- il **Visibile (VIS)** $0,4 - 0,7 \mu m$;
- l'**Infrarosso vicino (NIR = Near InfraRed)** $0,7 - 2 \mu m$;
- l'**Infrarosso termico (TIR = Thermal InfraRed)** $4 - 20 \mu m$;
- l'**Infrarosso estremo (FIR = Far InfraRed)** $20 - 1000 \mu m$;
- le **Microonde (μW = Micro Wave)** $10^3 - 10^6 \mu m$.

⁶ SCHIAVON G., Dispense del Corso di Telerilevamento e Diagnostica Elettromagnetica I, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, 2003.

Va ricordato che i limiti tra una regione e l'altra sono assolutamente indicativi, essendo lo spettro, in realtà, un insieme continuo e non interrotto di lunghezze d'onda.

Alcuni materiali, come ad esempio rocce e minerali, quando vengono colpiti dalle radiazioni *UV*, emettono luce visibile dando origine a fenomeni di fluorescenza. La parte dello spettro elettromagnetico compresa fra $0,4 - 0,7 \mu m$ può essere percepita dall'occhio umano e viene quindi definita spettro *visibile (VIS)*; a seconda della lunghezza d'onda l'occhio umano percepisce i diversi colori dell'arcobaleno che vanno dal violetto (corrispondente alle lunghezze d'onda più piccole) al rosso (per lunghezze d'onda maggiori).

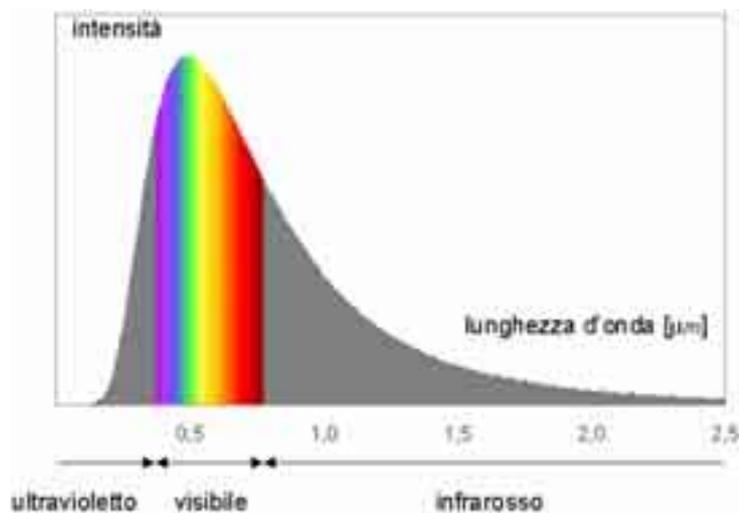


Figura 4: La luce visibile occupa circa il 44% di tutta l'emissione solare.

Le regioni dell'*infrarosso* o *IR* ($0,7 - 1000 \mu m$) sono assolutamente invisibili all'occhio umano e sono relazionabili a fenomeni di interazione *energia-materia* molto diversi tra loro, con meccanismi rispettivamente di *riflessione*, misti di *riflessione-emissione* ed *emissione*.

La componente della radiazione elettromagnetica dell'*infrarosso termico (TIR)* è così chiamata perché legata ai fenomeni di emissione termica dei corpi cosiddetti "caldi" perché posti a temperature diverse dallo zero assoluto. Le *microonde* o μW , poste ben oltre il visibile e l'infrarosso, sono rilevabili con strumenti sia in modalità passiva (tra 1 e 10 mm) che attiva (per lunghezze d'onda dell'ordine dei centimetri). In quest'ultimo caso si parla anche di banda *RADAR (Radio Detection And Ranging)* in quanto lo strumento utilizzato in questi rilievi è appunto un sistema radar. Le μW hanno il grande vantaggio di

poter essere impiegate in qualsiasi situazione operativa, perché non influenzate dalle condizioni meteorologiche o dalle perturbazioni atmosferiche.

Nel caso dell'osservazione della superficie terrestre l'atmosfera terrestre rappresenta il mezzo all'interno del quale si propaga l'energia elettromagnetica riflessa ed emessa dal suolo. Durante questo percorso l'energia elettromagnetica interagisce con i costituenti presenti in atmosfera e subisce fenomeni di assorbimento e/o di diffusione la cui entità può variare nel tempo e nello spazio in relazione alla composizione e allo stato fisico dell'atmosfera stessa. L'energia che viene misurata dal sensore non coincide esattamente con quella emessa o riflessa dalla superficie terrestre ma contiene termini di disturbo non sempre trascurabili. Per ovviare a questi inconvenienti vengono maggiormente utilizzati, per quanto riguarda il Telerilevamento da satellite, sensori in grado di registrare le emissioni relative allo spettro del visibile e dell'infrarosso perché le emissioni in queste bande sono la parte di radiazione solare che maggiormente sono in grado di attraversare l'atmosfera terrestre minimizzando così gli effetti di attenuazione e disturbo.

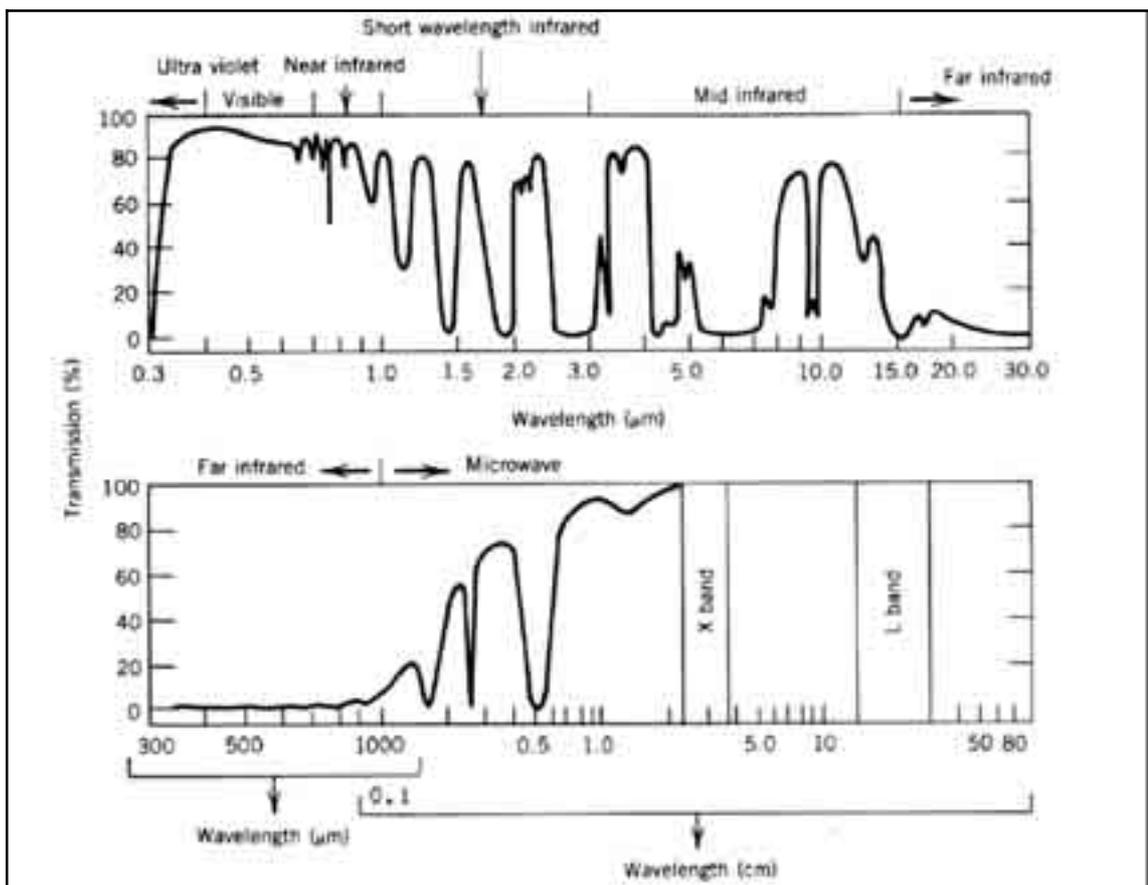


Figura 5: Trasmissività atmosferica: VIS e IR (sopra), μW (sotto).

In **Figura 5** è rappresentata la curva della trasmissività atmosferica che mostra cioè l'andamento della percentuale di potenza che si propaga attraverso l'atmosfera al variare della lunghezza d'onda. Dal diagramma si nota l'alternarsi di zone dello spettro caratterizzate da una elevata trasmissività, dette *finestre atmosferiche*, e di zone cosiddette opache dove la trasmissività risulta essere molto bassa.

È opportuno tenere presente che il diagramma in esame (**Figura 5**) si riferisce alle condizioni di aria chiara. La presenza di nebbia o nubi introduce una attenuazione supplementare che varia relativamente poco con λ ma che rende più opache anche le finestre atmosferiche nella regione del visibile, dell'infrarosso vicino e dell'infrarosso termico all'aumentare del rapporto λ/d dove con d si intende il diametro delle gocce d'acqua presenti in atmosfera. Per quanto riguarda la regione delle microonde, la nebbia e le nubi non precipitanti ($d \leq 100 \mu m$) hanno scarso effetto sulle misure a microonde. L'attenuazione supplementare può diventare significativa solo nel caso di forti piogge caratterizzate da $d \cong 1 mm$.

1.2 Strumenti e piattaforme

È possibile classificare i vari sensori per il Telerilevamento in base alla lunghezza d'onda e alla loro natura (attivi o passivi)⁷.

Nei sistemi attivi. La sorgente di potenza elettromagnetica è installata a bordo del satellite stesso, si operano misure sulla parte che viene riflessa verso il sensore. Esempio di sistema attivo è il RADAR (RADio Detection And Ranging) che opera a microonde. Il LIDAR (LIght Detection And Ranging) opera prevalentemente nel visibile (VIS) e nell'ultravioletto (UV), la sorgente è costituita da un laser mentre il ricevitore da un telescopio.

I sistemi passivi. Sono in genere, definiti “radiometri” e se operano su più bande vengono detti “multispettrali”. Effettuano delle misure operando come dei veri e propri ricevitori, anche se diverso è il processo fisico che genera la potenza ricevuta (e quindi il tipo di informazione) nelle diverse bande. Nel VIS e NIR il sole è la sorgente primaria di energia; il radiometro misura la parte di questa che viene riflessa (verso il radiometro stesso) dalla superficie terrestre, e l'informazione riguarderà l'attitudine di quest'ultima a riflettere. Nel TIR e μW la sorgente primaria di energia è la Terra stessa, e il radiometro misurerà la potenza direttamente emessa. I contributi delle due sorgenti (Sole e Terra) sono mostrati in **Figura 6**.

Il Sole è assimilato ad una sorgente posta a circa $5900K$, mentre la Terra è una sorgente posta a circa $300K$. In base alla legge di Wien il massimo di emissione (ovvero il massimo della funzione di Planck) si ha per un determinato valore di lunghezza d'onda:

$$\lambda_{\max} (\mu m) = 2898 / T(K)$$

pertanto per il Sole la massima emissione si ha per $\lambda_{\max} = 0.48 \mu m$ mentre per la Terra si ha per $\lambda_{\max} = 9.66 \mu m$.

La maggior parte della potenza emessa dalla Terra ricade nella regione dello spettro compresa tra $4 \mu m$ e $30 \mu m$, ovvero in corrispondenza del TIR; fortunatamente questa

⁷ **Schiavon G.**, “Dispense dal Corso di Telerilevamento e Diagnostica Elettromagnetica I”, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, (2003)

regione è compresa in una larga finestra atmosferica (a parte una zona di bassa trasmissività atmosferica a $9.7\mu m$ legata alla presenza di O_3).

Per lunghezza d'onda superiori ai $7\mu m$ la radiazione solare reirradiata dalla superficie terrestre risulta essere bassa rispetto a quella emessa (in genere può essere trascurata); ciò consente di utilizzare questa regione dello spettro per effettuare misure della temperatura della superficie terrestre non perturbate dalla radiazione solare.

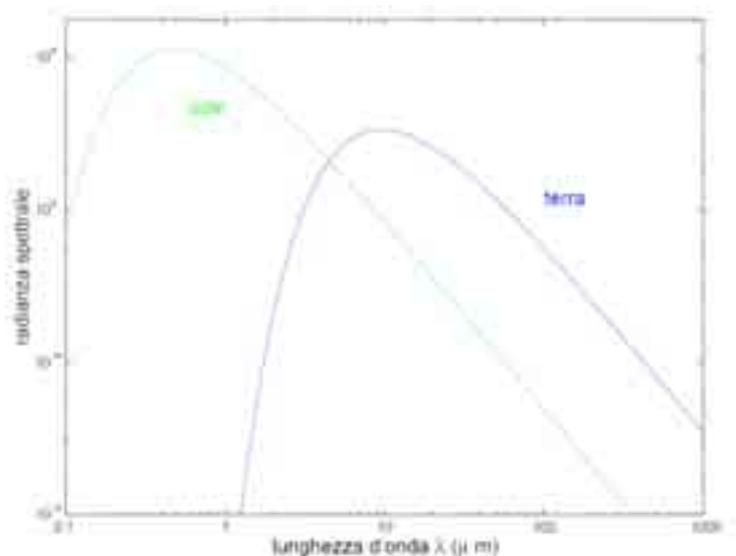


Figura 6: Emissione del Sole e della Terra.

I sensori sono installati su delle piattaforme (**Figura 7**) che assicurano tutti i servizi necessari al loro funzionamento. Il sistema di Telerilevamento avrà caratteristiche che dipendono in maniera sostanziale dal tipo di piattaforma.

Si distinguono in particolare le piattaforme poste a terra (piattaforme terrestri) e le piattaforme aerospaziali. Queste ultime sono costituite da aerei, elicotteri e palloni oppure da piattaforme spaziali orbitanti intorno alla Terra (satelliti).

Le **piattaforme terrestri** assicurano un rilevamento continuo di una porzione limitata di territorio. In alcuni casi si usano sensori su piattaforme terrestri per scopi di ricerca scientifica, ovvero per sperimentare tecnologie hardware di nuovi sensori e/o sviluppare modelli matematici di interpretazione dei dati da essi telerilevati su porzioni di territorio ben note. In altri casi sensori a terra vengono usati per la calibrazione di strumenti aerotrasportati. Esistono anche sensori su piattaforme terrestri utilizzati come strumenti di acquisizione di dati ambientali a scopi operativi, come nel caso del radar meteorologico per

la misura delle precipitazioni atmosferiche in una determinata area o del radiometro a microonde per la misura di profili meteorologici.

Le **piattaforme aeree** permettono la rilevazione di dati da altezze variabili da qualche centinaio di metri a una decina di chilometri o più mentre le **piattaforme spaziali** (o *orbitanti*), orbitano intorno alla Terra ad altezze variabili da circa 200 km a 36.000 km dalla superficie terrestre.

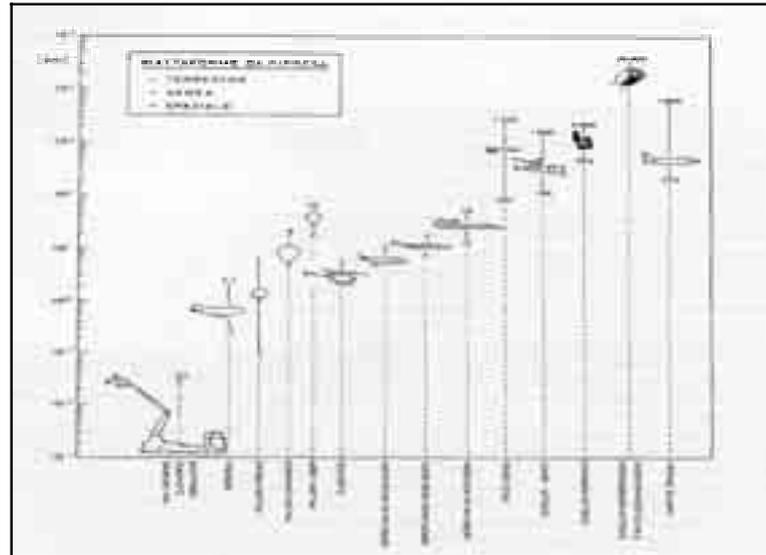


Figura 7: Piattaforme di ripresa per il Telerilevamento e loro quote di utilizzo.

Ogni sistema di Telerilevamento (montato su piattaforme *aeree* o *terrestri*, *attivo* o *passivo*) può essere caratterizzato mediante i seguenti parametri di risoluzione:

- **risoluzione spaziale** (Figura 8) è l'area minima esplorata dallo strumento (pixel). Tale area è espressa o in termini di angolo (IFOV *Instantaneous Field of View*) o, nota la distanza tra oggetto e strumento, come misura areale;
- **risoluzione radiometrica** è la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia radiante;
- **risoluzione spettrale** è l'intervallo di lunghezza d'onda cui è sensibile lo strumento, o, nel caso di sensori multispettrali, l'ampiezza minima in lunghezza d'onda;
- **risoluzione temporale** è l'intervallo di tempo che intercorre tra due rilievi successivi della stessa zona.

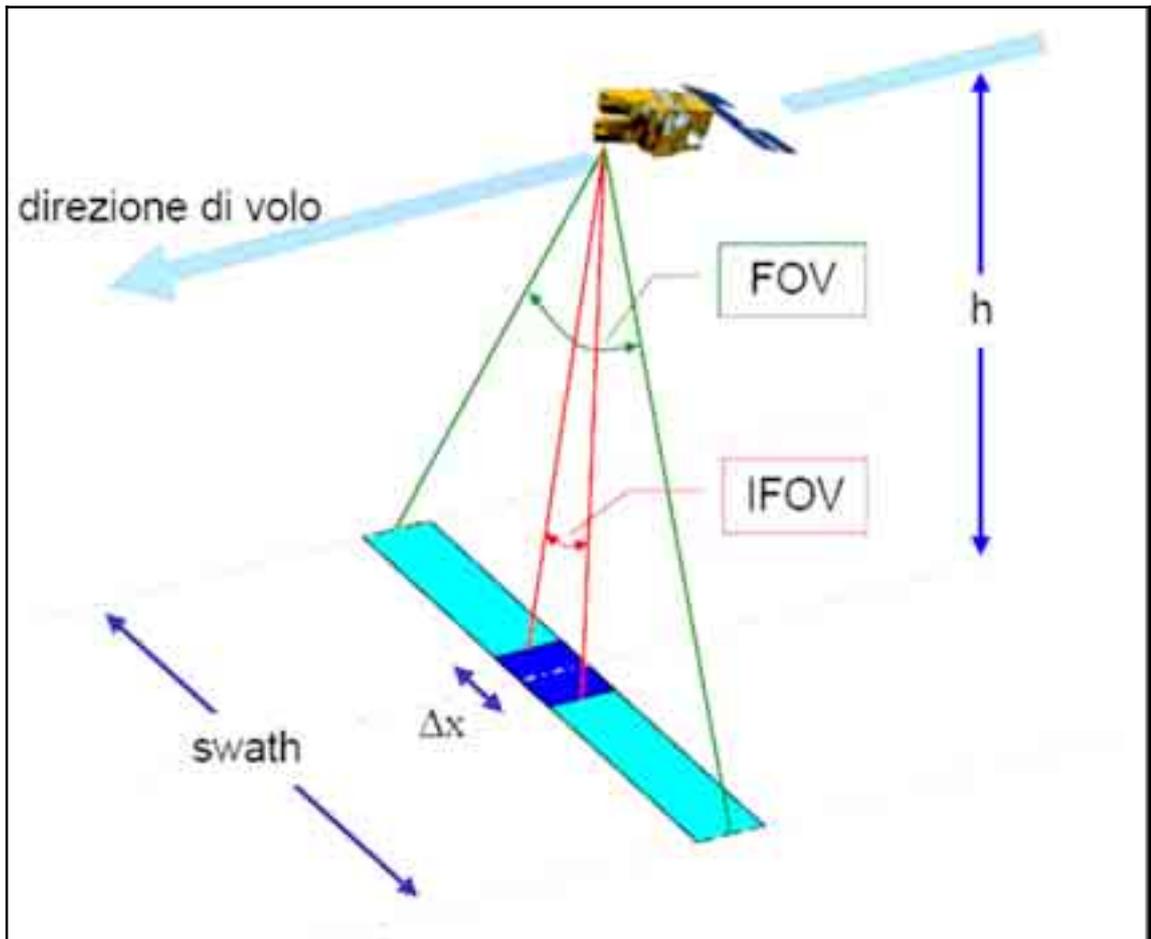


Figura 8: Geometria di acquisizione.

1.2.1 Tecniche passive nel visibile (VIS) e nel vicino infrarosso (NIR)

Come precedentemente detto, l'informazione sulle proprietà fisiche e geometriche dell'oggetto osservato nasce da una interazione elettromagnetica infatti, l'osservabile di base del telerilevamento passivo è l'energia elettromagnetica riflessa o emessa dal suolo e incidente sul sensore. Le **fotografie aeree**, che registrano la radiazione elettromagnetica nell'intera parte del visibile (a volte anche nell'infrarosso grazie all'utilizzo di particolari pellicole), hanno rappresentato il primo strumento per l'osservazione della Terra; la fotointerpretazione di queste immagini analogiche sfrutta prevalentemente le informazioni di forma e di tessitura presenti nell'immagine per poter distinguere i diversi oggetti rappresentati e quindi anche per poter effettuare classificazioni della copertura/uso del suolo.

Il Telerilevamento, invece, si basa principalmente sull'analisi dei valori assunti dai pixel in relazione alla lunghezza d'onda osservata. I sensori montati su satellite sono in grado di registrare la radiazione elettromagnetica entro una determinata banda spettrale relativamente ad una porzione (*pixel*) della superficie terrestre.

È da precisare che la tendenza è quella di montare sui satelliti sensori che abbiano diverse bande caratteristiche in modo da poter riconoscere le firme spettrali degli oggetti osservati tramite la misura in più punti dello spettro elettromagnetico.

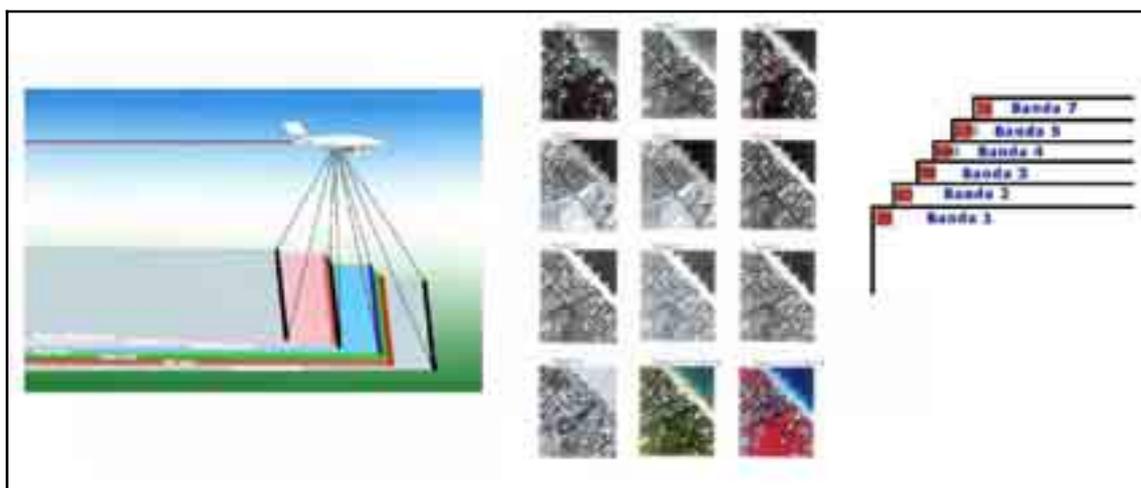


Figura 9: Schematizzazione del processo di acquisizione multispettrale.

Il numero delle bande disponibili e la parte totale dello spettro coperto rappresentano quindi una delle caratteristiche più importanti per il Telerilevamento; si parla di **Telerilevamento multispettrale**, quando le bande disponibili sono dell'ordine della decina,

mentre si parla di *Telerilevamento iperspettrale*, quando le bande sono dell'ordine del centinaio.

La scena al suolo viene ripresa in tante diverse parti dello spettro, per produrre altrettante immagini diverse della stessa realtà, resa poi in maniera numerica e con un opportuno codice cromatico.

La profondità alla quale penetra in la radiazione è, in genere, paragonabile alla lunghezza d'onda della stessa e perciò, i sistemi che operano nel *VIS* e nel *NIR* (caratterizzati da bassi valori di lunghezza d'onda) sono particolarmente adatti a ricevere informazioni superficiali.

La “*risposta spettrale*” di un oggetto alle radiazioni elettromagnetiche è la percentuale di energia per ogni lunghezza d'onda riflessa, trasmessa o assorbita del oggetto stesso ed è rappresentabile con un grafico dove sull'ascissa sono riportate le lunghezze d'onda dello spettro e sull'ordinate la percentuale di luce riflessa, trasmessa o assorbita. Tale risposta prende il nome di “*curva o firma spettrale*” dell'oggetto ed è caratteristica di ogni materiale. Quest'ultimo parametro contiene l'informazione sulle proprietà fisiche del mezzo osservato. Infatti, il mezzo, a seconda della propria natura e del proprio stato, tenderà ad essere, alle varie λ , più assorbente o più riflettente.

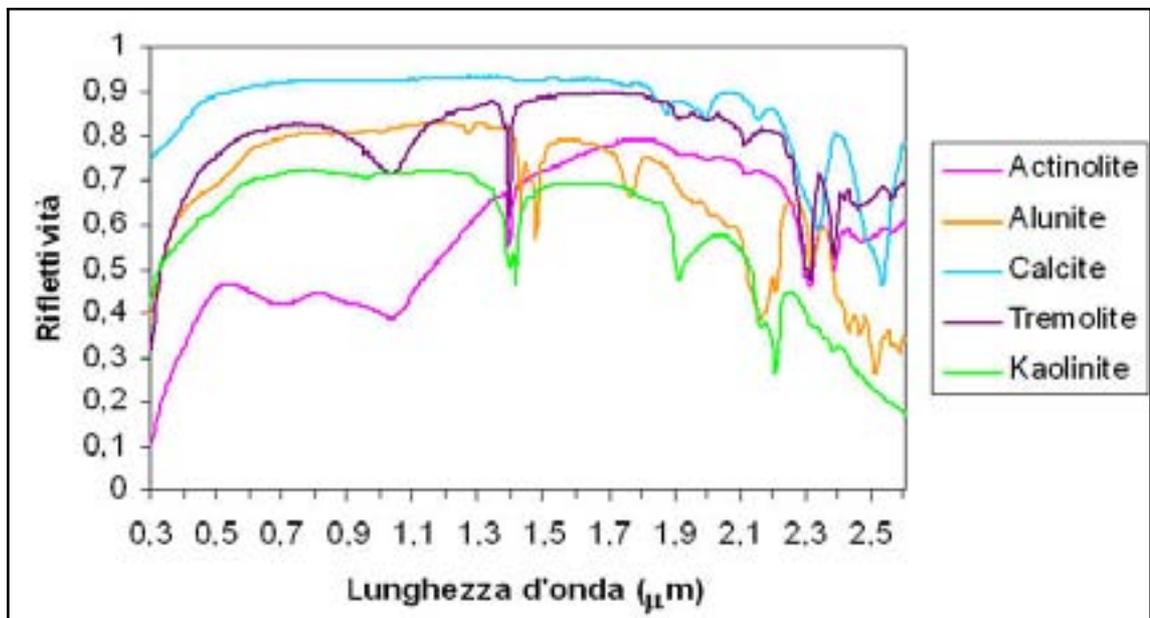


Figura 10: Firme spettrali per alcuni minerali.

Nella **Figura 10** sono illustrate le firme spettrali per alcuni minerali, determinate mediante analisi di laboratorio presso la Brown University.

Si deve notare che la firma spettrale di un materiale non può essere sempre determinata in termini assoluti, questo perché una tipologia di copertura del suolo non può essere univocamente definita, infatti, include al suo interno tutta una serie di diverse tipologie di materiali: si pensi ad esempio che all'interno di una ipotetica classe foresta possono essere presenti diverse tipologie di alberi, caratterizzati ognuno da una propria firma spettrale.

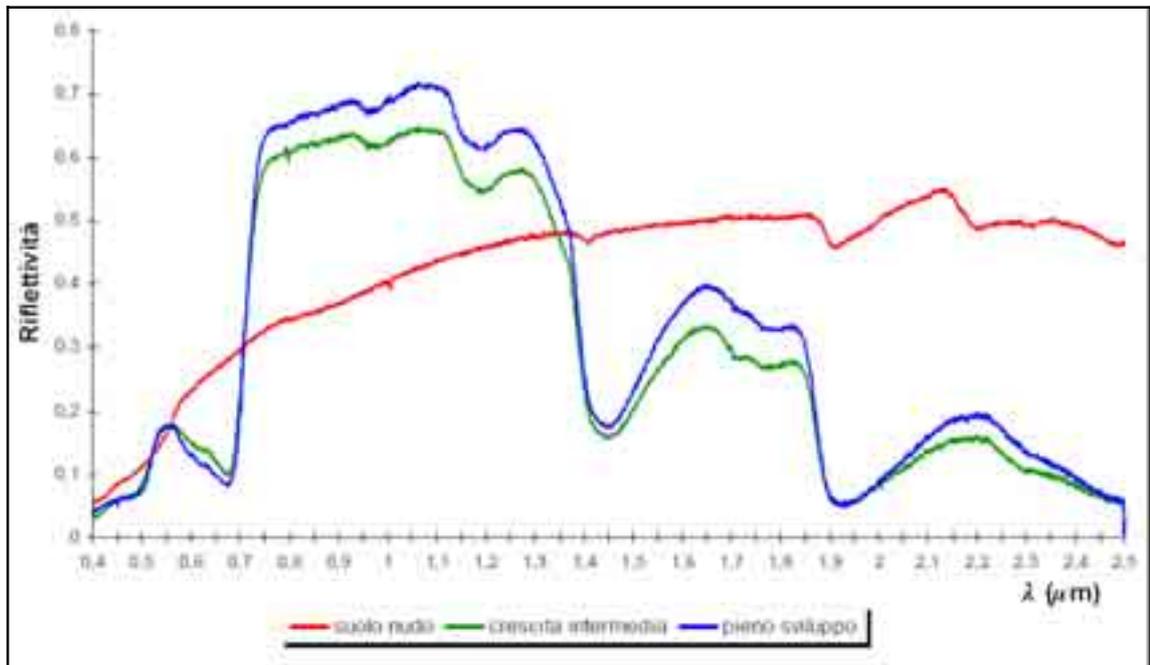


Figura 11: Riflettività per diversi tipi di copertura del suolo: suolo nudo, sviluppo intermedio, pieno sviluppo della vegetazione.

In **Figura 11** è invece mostrato l'andamento sperimentale della riflettività passando da suolo nudo ad una pianta di erba medica completamente sviluppata.

Si nota che nel caso di suolo nudo la funzione riflettività $\rho(\lambda)$ ha un andamento crescente e senza forti discontinuità mentre, al crescere della pianta, si individuano tre diversi effetti:

- la $\rho(\lambda)$ decresce nel visibile e si ha la progressiva accentuazione del massimo in corrispondenza del verde;
- nella zona tra $0.8\mu\text{m}$ e $1.2\mu\text{m}$ si hanno valori crescenti della $\rho(\lambda)$ che indicano l'aumento della biomassa;
- si hanno dei minimi sempre più accentuati in corrispondenza delle bande di assorbimento dell'acqua che diventa sempre più presente nelle piante che nel suolo.

1.2.1.1 La classificazione nello spazio multispettrale

L'uso dei dati telerilevati da satellite acquisiti con sensori passivi permette di estrarre informazioni territoriali, inerenti principalmente alla copertura del suolo (*land cover*) anche per quelle aree dove il prodotto dell'evoluzione antropica presenta una alta frammentazione delle tipologie d'uso del suolo.

Il processo di **classificazione** ha lo scopo di suddividere in classi che rappresentino diverse tipologie di coperture del suolo ogni pixel di una immagine, o più in generale ogni porzione di territorio dell'area minima rappresentabile secondo la scala utilizzata.

Tradizionalmente la classificazione rappresenta lo strumento attraverso cui è possibile realizzare carte tematiche di una determinata area.

Una mappa tematica ottenuta mediante il processo di classificazione è costituita da un insieme di pixel ai quali è associata, oltre alla informazione di tipo spaziale, anche una informazione che non è più semplicemente spettrale, ma di tipo *semantico* che specifica un attributo relativo ad un particolare tema di interesse, detto *classe* o categoria.

Ormai l'uso di dati satellitari sta sostituendo, in molti campi di applicazione, il metodo tradizionale basato principalmente sul lavoro in campo e su ricognizioni *in situ*. Come già accennato, i principali vantaggi dell'uso dei sensori montati su satellite sono legati al drastico abbattimento dei costi dei rilievi e alla possibilità di poter mantenere continuamente aggiornati i dati rilevati. Occorre tuttavia tenere presente che l'informazione estratta dai dati telerilevati ha il limite di essere una rappresentazione mediata dell'oggetto osservato. Si ricorda ad esempio che, da un punto di vista geometrico, l'unità di informazione elementare è rappresentata dai singoli *pixel* caratterizzati sempre da dimensioni finite e discrete che sono però la rappresentazione di fenomeni che si manifestano con continuità sul territorio.

Ogni *pixel* di una immagine telerilevata rappresenta una porzione del territorio la cui dimensione varia a seconda della risoluzione del sensore utilizzato; ad ogni *pixel* è associato, per ciascuna banda di acquisizione, un valore numerico che rappresenta il valore di riflettività del terreno.

La sempre maggiore diffusione di sensori multispettrali ha favorito lo sviluppo dei processi automatici di classificazione che mirano a raggruppare i vari pixel di una immagine in classi in base ad opportuni principi di similarità.

Ad ogni classe è poi possibile attribuire una *etichetta* mediante il confronto tra i valori misurati per ogni classe (eventualmente anche parametri statistici come media e deviazione standard) con i valori noti a priori per le diverse tipologie di copertura del suolo.

L'etichettatura dei pixel dell'immagine avviene sulla base del confronto tra le caratteristiche spettrali degli oggetti osservati.

Per ottenere questo risultato, i dati multispettrali vengono rappresentati in uno spazio a k dimensioni, denominato spazio delle caratteristiche o spazio multispettrale, dove k indica il numero delle bande spettrali utilizzate dal sensore. In questo spazio, ogni pixel di un'immagine individua un punto le cui coordinate sono date dai valori delle misure spettrali del pixel in ogni banda.

Un pixel è quindi rappresentabile come un vettore x a k componenti spettrali indicato con $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\}$.

È importante considerare che i valori presenti nelle immagini si discostano sempre da quelli di riferimento perché numerosi sono i fattori di disturbo che possono condizionare le misure effettuate. Lo scopo del presente lavoro non è quello di analizzare in dettaglio tutti i fenomeni in grado di costituire un disturbo per il Telerilevamento, ma a titolo di esempio, è opportuno ricordare che l'energia elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie terrestre attraversa l'atmosfera e interagisce con essa subendo fenomeni di assorbimento e di diffusione la cui entità può variare nel tempo e nello spazio.

È opportuno ricordare che i valori dei pixel, oltre a dipendere significativamente dagli effetti dell'atmosfera, sono funzione di alcuni parametri di calibrazione tipici di ogni sensore utilizzato.

Il principio comune a tutti i metodi di classificazione è quello di unire in una stessa classe i pixel tra loro “vicini” e di separare in classi distinte i pixel fra loro “lontani”. Non è possibile individuare un metodo univoco per la classificazione perché diverse sono le nozioni proposte di distanza nello spazio “*multispettrale*”. Nella definizione di tali nozioni assume un ruolo fondamentale la statistica che rappresenta lo strumento fondamentale per analizzare le incertezze dei valori osservati.

È tuttavia possibile distinguere due concetti alternativi di classificazione: la **classificazione assoluta** e la **classificazione relativa**.

La *classificazione assoluta* si basa sulla disponibilità di una ampia libreria contenente le caratteristiche di riflessività spettrale di tutte le diverse coperture del suolo che si vuole classificare, e mira ad identificare le classi di copertura del suolo mediante una determinazione a priori. La sua applicazione richiede una efficace riduzione degli effetti atmosferici e la disponibilità di dati acquisiti per un gran numero di bande omogeneamente distribuite. Tali requisiti sono soddisfatti quasi esclusivamente dai cosiddetti sensori iperspettrali (numero di bande dell'ordine delle centinaia) che nella maggior parte dei casi sono alloggiati su aereo, così come avviene nel caso del sensore *MIVIS* della *Daedalus Enterprise* che è in grado di acquisire su 102 bande differenti con lunghezze d'onda che vanno da $0.4 - 12.7 \mu m$ coprendo la regione dello spettro che va dal *VIS* fino al *TIR*.

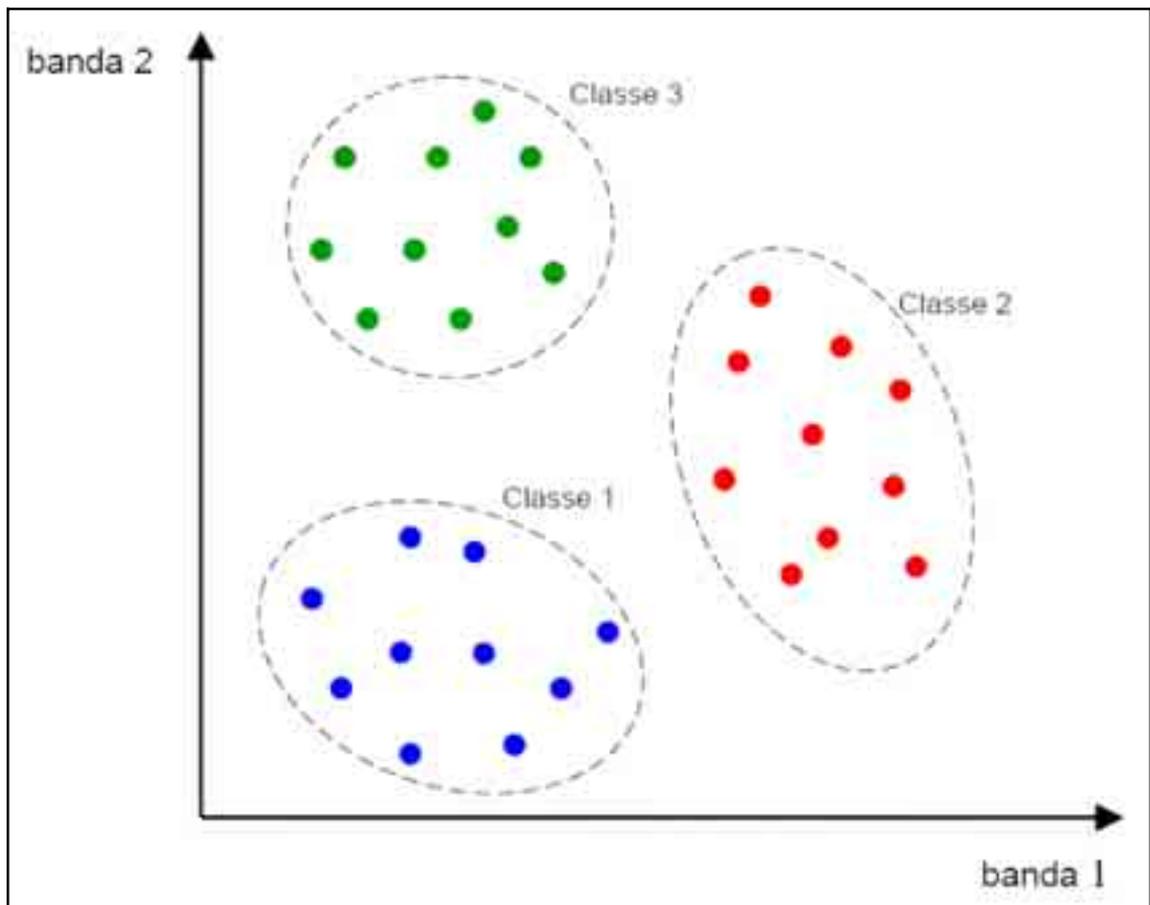


Figura 12: Esempio di classificazione in uno spazio multispettrale a due dimensioni (Angelini A. 2005).

Nel processo di *classificazione relativa* i pixel di una immagine vengono attribuiti alla medesima classe quando i valori assunti nelle diverse bande risultano “vicini” nello spazio multispettrale e a classi differenti se sono “lontani”, così come schematicamente mostrato nell'esempio riportato in **Figura 12**.

La scelta che caratterizza i differenti approcci è nella definizione di distanza e nel modo in cui le regioni dello spazio multispettrale sono associate ai diversi tipi di copertura del suolo possibili. È opportuno sottolineare che solo raramente si procede ad una classificazione assoluta confrontando direttamente i dati acquisiti con le firme spettrali ottenute in laboratorio infatti, allo stato attuale, la classificazione relativa costituisce la prassi.

1.2.1.2 La classificazione relativa

Come si è già detto, nel processo di classificazione relativa i *pixel* di una immagine vengono assegnati alla medesima classe quando i loro valori nelle diverse bande di acquisizione risultano essere simili in base a criteri che variano a seconda del particolare algoritmo di classificazione relativa che si intende applicare. Per poter stabilire poi la giusta corrispondenza tra le classi individuate e le reali categorie di copertura del suolo è sempre necessario poter disporre di dati di taratura; la raccolta di tali dati può essere effettuata mediante una campagna misure effettuate direttamente sul campo. Si sottolinea che la raccolta dei dati necessari alla taratura comporta comunque un lavoro ridotto rispetto a quello richiesto dall'approccio classico, questo perché tali dati sono necessari solo per un numero ristretto di pixel e non su tutti i pixel come richiesto dall'approccio classico di classificazione. In linea teorica la raccolta dei dati per la taratura dovrebbe precedere il processo di classificazione, tali dati dovrebbero infatti essere riferiti all'epoca di acquisizione dell'immagine satellitare; si fa eccezione per le analisi di piccoli cambiamenti nel tempo (ad esempio nel caso di studi di carattere geologico) o nei casi in cui si intendano studiare fenomeni che presentano una certa ripetitività annuale (come ad esempio per alcuni studi sulla vegetazione).

È possibile distinguere fra due tipi di classificazione relativa, a seconda che i dati di taratura sia disponibili prima o dopo il processo di classificazione:

- classificazione non supervisionata (*unsupervised*);
- la classificazione supervisionata (*supervised*).

Nel caso della *classificazione non supervisionata*, le regioni dello spazio multispettrale che definiscono i gruppi di *pixel* (*cluster*) vengono definite senza l'ausilio di altre informazioni esterne. Non è necessario conoscere a priori né la natura delle classi da individuare né il loro esatto numero, l'unico approccio seguito è quello di formare cluster di pixel in base a un criterio di prossimità reciproca nello spazio multispettrale che mira a

formare un numero di gruppi di pixel in modo che risultino internamente compatti e reciprocamente disgiunti. Una volta formati i vari cluster, la loro classe di appartenenza (ad esempio il tipo di copertura del suolo) viene identificata mediante una analisi sul campo che possa portare a stabilire la classe di alcuni pixel appartenenti a ciascun cluster.

Tale approccio è per sua natura legato a metodi di tipo iterativo in cui i pixel vengono uniti o divisi in base a uno schema predefinito di classificazione. I più noti classificatori non supervisionati sono il metodo *K-means* e *l'ISODATA*.

Si parla invece di *classificazione supervisionata* quando l'utente definisce quali sono le classi di interesse, individua e sceglie con l'ausilio di rilievi sul terreno o di immagini ad una più alta risoluzione, un certo numero di pixel che sono ritenuti rappresentativi di ognuna delle classi di interesse. Questi pixel sono dei veri e propri pixel di addestramento (*training pixel*) e vengono forniti al computer per addestrarlo a riconoscere i prototipi di ogni classe in modo tale che apprenda e si costruisca le regole di decisione in base alle quali riconoscere gli elementi di una classe da quelli di un'altra. Si ritiene necessario specificare che molto più spesso si tende ad individuare sulle immagini delle porzioni di territorio ritenute omogenee e rappresentative di ogni singola classe di interesse; tali regioni vengono comunemente indicate come *regioni di interesse* o *ROI (Region Of Interest)* e per loro definizione sono costituite da un insieme di training pixel. I pixel restanti, comunque in numero molto maggiore, vengono classificati in base alla loro somiglianza con i pixel di training, dove il concetto di somiglianza è da considerarsi esteso a tutte le bande dello spazio multispettrale.

Occorre precisare che diverse definizioni del concetto di distanza generano specifici algoritmi di classificazione che possono quindi presentare differenze in termini di semplicità computazionale e efficacia teorica. Un fattore critico per il successo di questo tipo di classificazione è legato alla corretta individuazione dei pixel campione che devono essere in numero sufficiente per ogni classe e non ambigui.

Si richiede, quindi, una corretta valutazione delle aree omogenee dell'immagine, così da evitare la presenza di pixel misti. Nella maggior parte dei casi si rende necessario un rilievo sul campo per la corretta identificazione delle classi; inoltre, per le classi di copertura del suolo variabili nel tempo (come le coperture vegetate e in particolare i campi coltivati), il rilievo in campo dovrebbe essere condotto nello stesso periodo dell'acquisizione dell'immagine satellitare.

I metodi di classificazione supervisionata differiscono tra loro, come si è già anticipato, per le differenti definizioni di distanza (multispettrale) tra pixel utilizzata per la definizione delle classi.

I classificatori *supervised*, una volta definite dall'utente le *ROI* e il relativo set di training pixel, procedono al calcolo di tutta una serie di parametri di tipo statistico come il valor medio in ogni banda dei pixel che appartengono alla medesima classe e le matrici di covarianza. I più diffusi algoritmi di classificazione supervisionata sono quelli basati sulla minima *distanza euclidea*, la classificazione mediante *parallelepipedi* e il metodo della *massima verosimiglianza*.

1.2.1.3 Classificazione non supervisionata

Rientrano nei metodi di classificazione non supervisionata (*unsupervised*) tutti quelli che non richiedono la disponibilità di informazioni esterne note a priori per l'assegnazione dei pixel dell'immagine alle diverse classi di interesse; spesso si suppone di non conoscere a priori né la natura delle classi né il loro numero esatto.

L'unico approccio possibile è quindi quello di formare dei *cluster* di *pixel* in base a determinati criteri di reciprocità, questa operazione che prende il nome di clusterizzazione ha l'obiettivo di definire un numero (al limite ignoto) di gruppi in modo che risultino internamente compatti e reciprocamente disgiunti.

L'algoritmo delle medie mobili (K-means)

L'idea di base di questo metodo di classificazione *unsupervised* è quello di fissare a priori un numero K di classi da identificare e di migliorare sequenzialmente la clusterizzazione, assegnando ogni pixel alla classe con media più vicina, e quindi di ricalcolare la media stessa.

Si scelgono inizialmente K pixel rappresentativi delle medie delle K classi da individuare, si assegnano ad ogni classe tutti i pixel che hanno distanza euclidea minima dalla media della classe stessa, a questo punto si ricalcola la media dei valori per ogni classe e si procede nello stesso modo appena descritto.

L'algoritmo termina quando non vengono più effettuati riarrangiamenti sui valori delle medie di ognuna delle K classi. Come si è già detto nel caso di immagini multispettrali

ogni pixel è rappresentabile come un vettore x a B componenti spettrali dove con B è indicato il numero delle bande di acquisizione.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_B \end{bmatrix}$$

Da ciò ne consegue che anche le medie m_i sono dei vettori le cui componenti sono calcolati come le medie, per ogni banda B , dei pixel x appartenenti alla classe ω_i considerata.

$$m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in \omega_i} x \quad i = [1, 2, 3, \dots, K]$$

dove n_i indica il numero di pixel x appartenenti alla classe ω_i .

Avendo detto che l'algoritmo assegna ogni pixel ad una determinata classe in base al principio della minima distanza, evidentemente la scelta più semplice per la funzione di distanza è quella di ricorrere alla usuale distanza euclidea:

$$\rho(m_i, x) = \|x - m_i\| = \sqrt{(x - m_i)^T (x - m_i)}$$

I passi fondamentali dell'algoritmo illustrato sono i seguenti:

1. selezione delle posizioni dei K pixel rappresentativi dei valori medi m_i , $i = [1, 2, 3, \dots, K]$;
2. assegnazione di ogni pixel x alla classe ω_i in modo tale da minimizzare il valore della distanza $\rho(m_i, x) = \|x - m_i\|$;
3. calcolo dei nuovi valori medi $m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in \omega_i} x$ per ciascuna classe.

Qualora i valori medi rimangano inalterati l'algoritmo termina, altrimenti si riparte dal punto 2.

L'algoritmo Isodata

È un algoritmo che condivide con il precedente il principio di assegnare ogni pixel al cluster con centro più vicino e quello di ricalcolare le posizioni dei centri dopo l'assegnazione. Differisce dal metodo *K-means* poiché il numero di *cluster* non è fissato in alcun modo durante le iterazioni, ma è lasciato libero di variare in base a tre processi fondamentali:

1. l'eliminazione di *cluster*;
2. l'unificazione di *cluster*;
3. la divisione di *cluster*.

I *cluster* con un numero piccolo di pixel vengono eliminati; i *cluster* reciprocamente molto vicini vengono uniti; i pixel molto dispersi vengono suddivisi in due. Il numero di *cluster* può quindi decrescere (per eliminazione o unione) o aumentare (per divisione) durante l'applicazione dell'algoritmo. Rispetto all'algoritmo di base esistono numerose varianti che sono comunque accomunate dalle medesime caratteristiche fondamentali. I parametri essenziali per l'elaborazione che devono essere forniti dall'utente sono:

K_0	numero iniziale di cluster;
K_{\max}	numero massimo ammesso di cluster;
n_{\min}	numero minimo ammesso di pixel in un cluster (al di sotto del quale il cluster viene eliminato);
i_{\max}	numero massimo di iterazioni;
d_{\min}	distanza minima tra i centri di due cluster (al di sotto di tale distanza due cluster vengono unificati);
L_{\max}	numero massimo di cluster che possono essere unificati ad ogni iterazione;
σ_{\max}	valore massimo di deviazione standard in un cluster (al di sopra del quale il cluster viene diviso).

Un cluster ω_i viene eliminato quando il numero di pixel contenuti è inferiore al valore n_{\min} impostato dall'utente; ogni pixel x del cluster eliminato viene assegnato al cluster ω_k

con centro m_k più vicino ad x fra tutti i cluster non eliminati in modo tale che sia minima la distanza:

$$\rho(m_k, x) = \|x - m_k\| = \sqrt{(x - m_k)^T (x - m_k)}.$$

Per tutte le coppie di cluster (ω_i, ω_j) vengono calcolate ad ogni passo le distanze:

$$\rho(m_i, m_j) = \|m_i - m_j\| = \sqrt{(m_i - m_j)^T (m_i - m_j)}.$$

Si identificano tutte le coppie per cui tale valore di distanza sia inferiore alla distanza minima d_{\min} imposta dall'utente ed, indicando con L_p il numero di coppie candidate per l'unione, il numero di coppie da unire realmente L è individuato mediante il soddisfacimento della seguente condizione:

$$L = \min(L_p, L_{\max})$$

Cioè $L = L_p$ a meno che il numero dei cluster candidati sia superiore al massimo valore ammesso: in quest'ultimo caso vengono unificate solo le $L = L_{\max}$ coppie tra tutte quelle candidate. Le coppie candidate vengono infatti organizzate in ordine di distanza decrescente e vengono selezionate per l'unione solo le prime L . Quindi per $k = 1, 2, \dots, L$ due cluster ω_{ik} e ω_{jk} che non siano stati già uniti in un passo precedente vengono uniti e viene calcolato il nuovo centro comune per il cluster unione:

$$m_k^* = \frac{1}{n_{ik} + n_{jk}} (n_{ik} m_{ik} + n_{jk} m_{jk})$$

Tutti i pixel vengono quindi assegnati alla nuova classe ω_k^* .

Per ogni cluster ω_i si calcolano gli elementi diagonali della matrice di covarianza C_i in base alla:

$$(\sigma_i^k)^2 = (C_i)_{kk} = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in \omega_i} (x^k - m_i^k)^2$$

che segue dalla:

$$(C_i) = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in \omega_i} (x - m_i) \cdot (x - m_i)^T$$

Si determina quindi la deviazione standard massima:

$$\sigma_{i,\max} = \max_k \sigma_i^k = \sigma_{k_{\max}}$$

dove k_{\max} indica la posizione di tale valore sulla diagonale e cioè il numero di banda con la massima dispersione. Per ogni cluster ω_i si calcola la distanza media fra i pixel che vi appartengono ed il suo centro:

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in \omega_i} \|x - m_i\|$$

e la distanza media totale tra tutti i pixel ed i rispettivi centri:

$$\bar{d} = \frac{1}{K} \sum_i \sum_{x \in \omega_i} \|x - m_i\| = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N n_i \bar{d}_i$$

dove K rappresenta il numero di cluster nel passo corrente.

Un cluster viene quindi diviso quando:

$$\sigma_{i,\max} > \sigma_{\max} \quad \text{e} \quad K \leq \frac{1}{2} K_{\max}$$

La divisione avviene selezionando un numero reale $0 < \lambda \leq 1$ e calcolando due nuovi valori per i centri:

$$m_i^+ = m_i + \lambda \sigma_{i,\max} i_{k_{\max}} \quad \text{e} \quad m_i^- = m_i - \lambda \sigma_{i,\max} i_{k_{\max}}$$

dove $i_{k_{\max}}$ è un vettore i cui elementi sono tutti nulli eccetto quello in riga k_{\max} , che è posto pari ad 1. quindi i due nuovi centri m_i^+ e m_i^- sono calcolati aggiungendo o sottraendo la quantità $\lambda \sigma_{i,\max}$ dall'elemento del vettore m_i corrispondente alla maggiore deviazione standard. I nuovi centri m_i^+ e m_i^- sostituiscono il vecchio centro m_i e vengono usati per ricalcolare l'attribuzione di tutti i pixel al nuovo insieme di centri; i pixel di ω_i non vengono semplicemente assegnati ad uno dei due nuovi cluster ma possono essere assegnati ad altri cluster così come i pixel di altri cluster possono essere assegnati ad uno dei due nuovi cluster.

I passi fondamentali dell'algoritmo illustrato sono i seguenti:

- selezione dei valori predefiniti dei parametri, selezione di K_0 pixel come centri iniziali dei cluster;
- definizione dei cluster, ogni pixel è assegnato al cluster con centro più vicino;

- eliminazione dei cluster con numero di pixel inferiore al valore imposto dall'utente ed assegnazione dei loro pixel ai cluster con centro più vicino;
- calcolo dei nuovi vettori medi m_i per ciascun cluster e della distanza media \bar{d}_i per ogni cluster e \bar{d} per tutti i cluster;
- decisione sull'opportunità di unificare dei cluster (salta al passo 7) o di continuare con la divisione dei cluster (salta al passo 6);
- se esistono cluster che soddisfano i criteri per la divisione si procede alla divisione dei cluster altrimenti si riparte dal passo 2;
- si uniscono i cluster;
- se l'algoritmo ha già raggiunto il numero massimo di iterazioni si termina altrimenti si torna al passo 2.

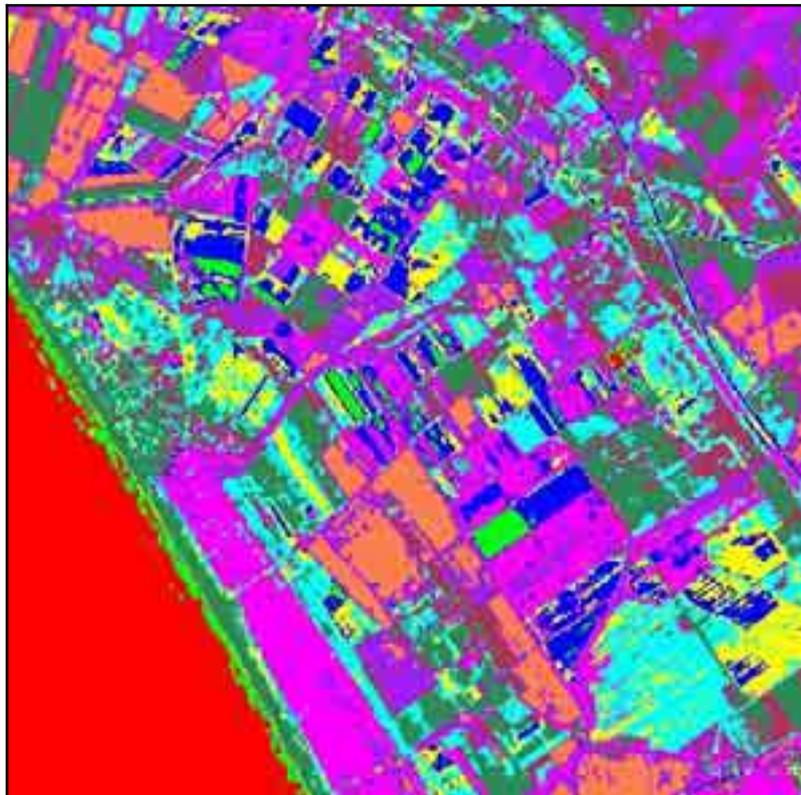
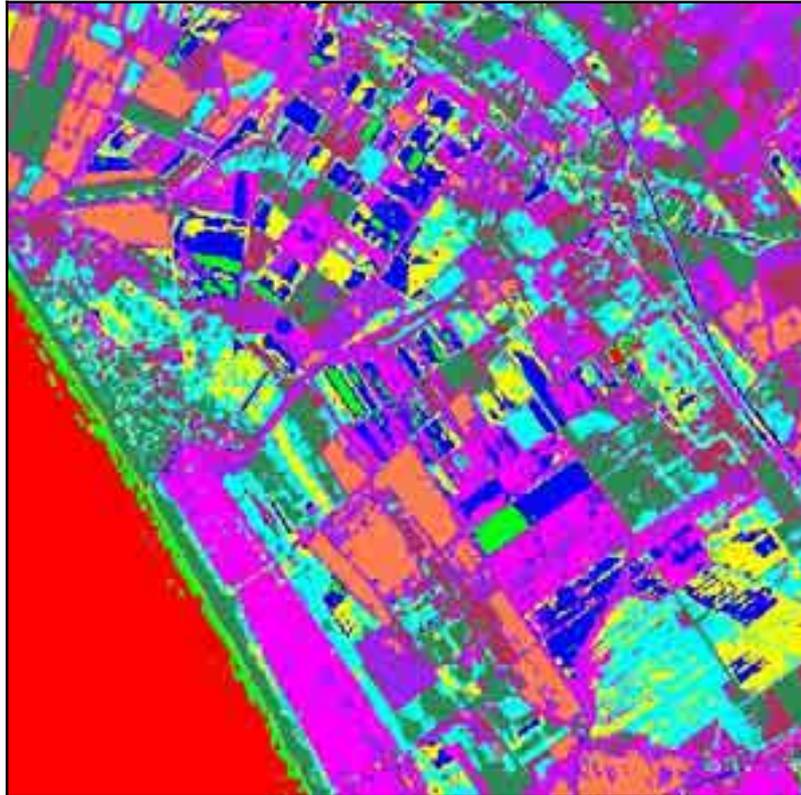


Figura 13: Esempio di classificazione di una porzione di una immagine ASTER mediante l'applicazione dell'algoritmo *K-means* (sopra) e *ISODATA* (sotto); si sono forzati gli algoritmi a produrre lo stesso numero di classi (10): le differenze sono pressoché trascurabili (*Angelini A. 2005*).

1.2.1.4 La classificazione supervisionata

La *classificazione supervisionata* (supervised classification) si basa sull'ipotesi di conoscere a priori le classi di appartenenza per un numero sufficiente di pixel, chiamati *pixel campione*. I pixel restanti, comunque in numero molto maggiore, vengono quindi classificati in base alla loro somiglianza con i pixel campione.

Il concetto di somiglianza naturalmente va esteso a tutte le bande, ovvero viene valutata la vicinanza nello spazio multispettrale. Un elemento essenziale nella classificazione supervisionata è la definizione delle classi $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$ cui dovranno essere assegnati i pixel dell'immagine. Vi sono inoltre applicazioni con obiettivi molto specifici, ove la selezione di classi dovrebbe essere lasciata al giudizio dell'utente; per esempio l'identificazione delle parti di foresta distrutte da incendi, l'analisi delle terre coperte da esondazioni, il monitoraggio di colture specifiche sono tutte applicazioni finalizzate all'individuazione di un particolare tipo di classe e non alla distinzione delle altre, che possono essere genericamente accorpate.

Altro fattore critico per il successo della classificazione è l'identificazione nell'immagine dei pixel campione. Innanzitutto essi devono essere in numero sufficiente per ogni classe; la loro assegnazione inoltre non deve essere ambigua. Ciò richiede una valutazione delle aree omogenee dell'immagine, per evitare la presenza di pixel misti e per localizzare correttamente i pixel sul terreno.

Si ricorda infatti che, nella maggior parte dei casi, è necessario un rilievo sul campo per l'identificazione delle classi. I pixel noti per ciascuna delle classi predefinite $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$ formano rispettivamente insiemi di campioni S_1, S_2, \dots, S_K , che contengono un numero di pixel pari a n_1, n_2, \dots, n_K .

Si debbono innanzitutto calcolare le stime $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_K$ dei corrispondenti vettori medi m_1, m_2, \dots, m_K mediante la:

$$\hat{m}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in S_i} x, \quad i = 1, 2, \dots, K$$

La maggior parte degli algoritmi richiede inoltre la stima delle matrici di *covarianza*:

$$\hat{C}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in S_i} (x - \hat{m}_i)(x - \hat{m}_i)^T, \quad i = 1, 2, \dots, K$$

La distinzione fra le stime \hat{m}_i, \hat{C}_i e i corrispondenti valori veri m_i, C_i è essenziale, poiché i primi sono calcolati a partire da un numero sostanziale piccolo di campioni in ciascuna classe; seguendo un approccio probabilistico rigoroso il valore vero dovrebbe viceversa corrispondere all'insieme (sostanzialmente fittizio) infinito di tutti i pixel della classe. Comunque, poiché gli effetti atmosferici, che variano da immagine a immagine, influiscono anche sulla singola immagine, dobbiamo assumere un atteggiamento più pragmatico e considerare m_i, C_i come rappresentativi di tutti i pixel di una particolare immagine.

Per semplicità gli algoritmi vengono presentati utilizzando i valori teorici di media e covarianza, ma rimane sottinteso che, nel processo di stima, essi vengono sostituiti con le stime campionarie disponibili.

La classificazione in base alla minima distanza euclidea

L'approccio più semplice alla classificazione supervisionata si basa unicamente sui vettori medi m_i disponibili per le classi ω_i ; come misura di similarità ω_i fra pixel con valori x e x' viene utilizzata la distanza euclidea.

La distanza euclidea è una generalizzazione semplice ma efficace della distanza piana, fornita dal ben noto teorema di Pitagora, alle B dimensioni dello spazio multispettrale.

Ogni pixel x dell'immagine viene assegnato alla classe ω_i con il centro m_i più vicino:

$$\|x - m_i\| = \min_k \|x - m_k\| \Rightarrow x \in \omega_i$$

Lo spazio multispettrale B -dimensionale viene diviso in regioni Ω_i , una per ogni classe ω_i . Il confine fra ogni coppia di classi ω_i e ω_j è un iperpiano di dimensione $B-1$, perpendicolare al segmento congiungente i centri m_i e m_j (**Figura 14**) e passante attraverso il suo punto centrale $\frac{1}{2}(m_i + m_j)$.

L'uso della distanza euclidea per la classificazione risulta soddisfacente finché la dispersione dei pixel all'interno di ogni classe è simile.

In molte situazioni, però, un pixel è così lontano da qualunque centro delle classi che il metodo di assegnazione alla classe più vicina non avrebbe comunque senso: in tale

situazione è opportuno introdurre un'ulteriore classe, ovvero la classe dei pixel *non classificati* ω_0 .

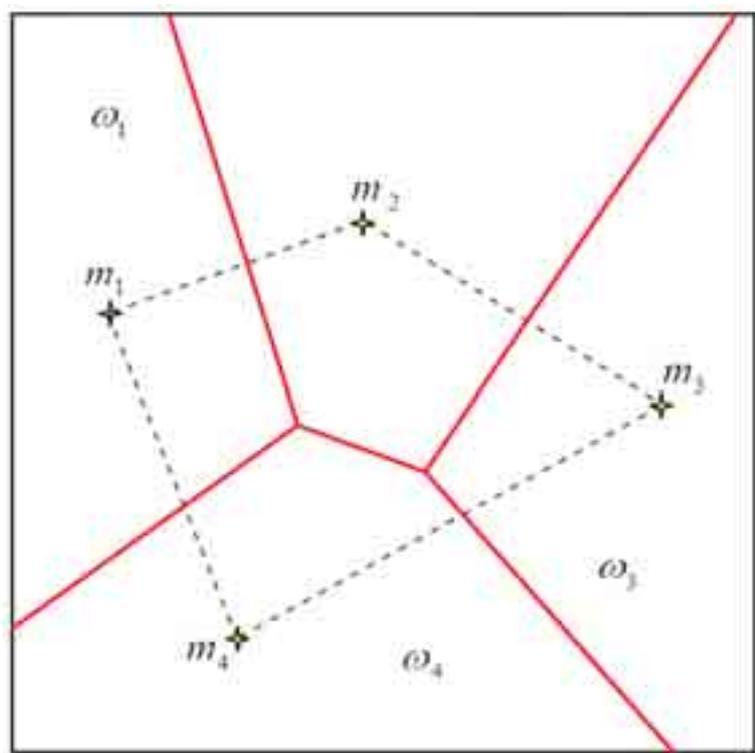


Figura 14: Esempio di classificazione in uno spazio multispettrale a due dimensioni, mediante distanza euclidea semplice (Angelini A. 2005).

Un particolare pixel x viene assegnato alla classe ω_i con centro più vicino m_i , solo quando la distanza non supera un particolare **valore di soglia** (threshold) T :

$$\|x - m_i\| = \min_k \|x - m_k\| \quad \text{e} \quad \|x - m_i\| \leq T \quad \Rightarrow x \in \omega_i$$

I pixel con la distanza minima dai centri delle classi maggiore del valore di soglia vengono assegnati alla classe ω_0 , ovvero rimangono non classificati:

$$\min_k \|x - m_k\| > T \quad \Rightarrow x \in \omega_0$$

La situazione geometrica relativa alle regioni ω_i dello spazio multispettrale che definiscono le diverse classi è illustrata in **Figura 15**.

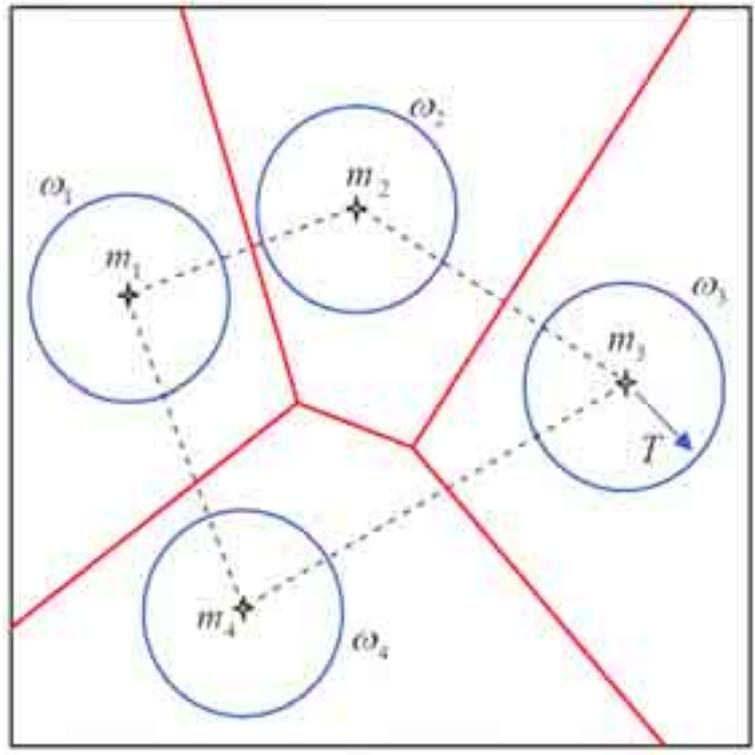


Figura 15: Esempio di classificazione in uno spazio multispettrale a due dimensioni, mediante distanza euclidea con valore di soglia T (Angelini A. 2005).

La classificazione mediante parallelepipedi

Un metodo che tiene conto della dispersione dei pixel di classe nota per ogni classe, almeno parzialmente, è il metodo di *classificazione mediante parallelepipedi* (*parallelepiped classification*).

In tale metodo per ogni classe vengono considerati unicamente gli elementi diagonali della matrice di covarianza C_i , ovvero le varianze, mentre vengono ignorati gli elementi fuori diagonale, ovvero le correlazioni.

A partire dalla deviazione standard per ogni banda j e per ogni classe ω_i

$$\sigma_i^j = \sqrt{(C_i)_{jj}} \quad j = 1, 2, \dots, B$$

Viene costruito un parallelepipedo P_i con centro geometrico m_i e contenete i pixel x che soddisfano la

$$x = [x^1 \dots x^j \dots x^K]^T \in P_i \Leftrightarrow \hat{m}_i^j + k\sigma_i^j \leq x^j \leq \hat{m}_i^j - k\sigma_i^j \quad j = 1, 2, \dots, B$$

k è una costante positiva (per esempio $k=3$), selezionata in modo tale che i parallelepipedi P_i non si intersechino.

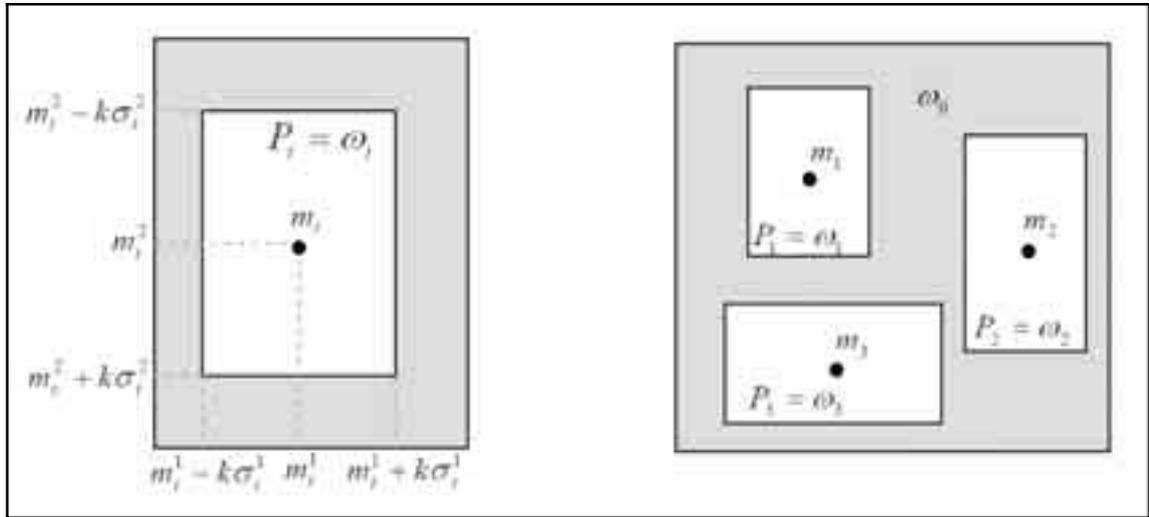


Figura 16: Rappresentazione di una classificazione in uno spazio multispettrale a due dimensioni, mediante parallelepipedi (Angelini A. 2005).

Introducendo anche la classe ω_0 per i pixel non classificati, il processo assume la forma semplice mai rigorosa

$$\begin{aligned} x \in P_i & \Rightarrow x \in \omega_i \\ x \notin \bigcup_i P_i & \Leftrightarrow x \in \omega_0 \end{aligned}$$

Ciò significa che se un pixel cade in un parallelepipedo viene assegnato alla classe corrispondente, in caso contrario rimane non classificato.

La situazione geometrica per le regioni Ω_i dello spazio multispettrale è illustrata in **Figura 16**.

La classificazione mediante distanza di Mahalanobis

La *distanza di Mahalanobis* è una variante della distanza euclidea; in effetti rappresenta una distanza euclidea pesata in cui le matrici di covarianza C_i delle classi vengono ignorate, mentre viene utilizzata la matrice di covarianza globale

$$C = \frac{1}{N} \sum_i \sum_{x \in S_i} (x - m_i)(x - m_i)^T = \frac{1}{N} \sum_i n_i C_i \quad N = \sum_i n_i$$

La distanza di Mahalanobis è definita mediante la

$$d_M(x, x') = \sqrt{(x - x')^T C^{-1} (x - x')}$$

Ciascun pixel viene classificato nella classe ω_i il cui centro m_i dista meno, secondo la definizione di distanza di Mahalanobis, rispetto al pixel stesso. Quindi la classificazione viene condotta secondo la

$$d_M(x, m_i) < d_M(x, m_k), \quad \forall k \neq i \quad \Leftrightarrow x \in \omega_i$$

Come nel caso della classificazione mediante distanza euclidea, anche in questo caso è possibile introdurre un valore di soglia T:

$$d_M(x, m_i) < d_M(x, m_k), \quad \forall k \neq i \quad \text{e} \quad d_M(x, m_i) < T \quad \Rightarrow x \in \omega_i$$

$$d_M(x, m_i) > T \quad \forall i \quad \Rightarrow x \in \omega_0$$

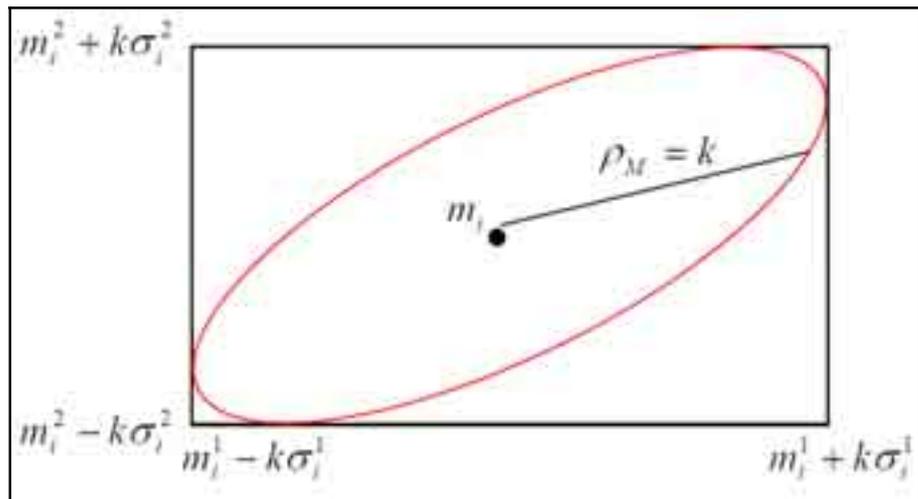


Figura 17: Rappresentazione di una classificazione in uno spazio multispettrale a due dimensioni, mediante distanza di Mahalanobis (Angelini A. 2005).

La differenza di base fra il metodo dei parallelepipedi e la classificazione mediante distanza di Mahalanobis con valore di soglia è nella forma delle regioni Ω_i assegnate a ciascuna classe. I parallelepipedi vengono infatti sostituiti da iperellissoidi (così come mostrato in Figura 17) con l'equazione:

$$(x - m_i)^T C^{-1} (x - m_i) = T^2$$

Il metodo di massima verosimiglianza

Per comprendere il modo in cui agisce questo algoritmo si parte dal presupposto che siano già stati identificati dei campioni per ogni classe in legenda, e che i valori dei pixel campione siano stati riportati nello spazio delle bande. L'algoritmo a massima verosimiglianza (*maximum likelihood*) si basa sulla ipotesi che ogni classe spettrale possa essere descritta da una distribuzione di probabilità nello spazio multispettrale, ossia da una distribuzione multivariata con tante variabili quante sono le bande utilizzate. Questa distribuzione descrive la probabilità di trovare un pixel appartenente ad una certa classe in una certa regione dello spazio delle bande. Questa ipotesi è ragionevole in quanto la maggior parte dei pixel campione di una classe hanno valori molto simili e sono posizionati nel centro del gruppo; man mano che ci si allontana dal centro del gruppo ci sono meno pixel. La loro distribuzione assomiglia quindi ad una distribuzione di probabilità.

La distribuzione di probabilità più adatta a descrivere i valori dei pixel è la normale multivariata o Gaussiana, in quanto ci consente una trattazione matematica agevole della procedura di classificazione. Inoltre è robusta, ossia non è molto sensibile alle violazioni dell'ipotesi di normalità della distribuzione dei valori dei pixel nelle classi. Si ipotizza quindi che la distribuzione di probabilità dei valori dei pixel appartenenti alle varie classi sia normale multivariata.

Se si accetta questa ipotesi (ritenuta ragionevole per un gran numero di applicazioni, soprattutto alla luce della grande disponibilità in letteratura di studi che si basano proprio sulla applicazione di tale metodologia) allora possibile determinare la funzione di densità di probabilità (o funzione di massima verosimiglianza $l_i(x)$) unicamente in base ai vettori medi e alle matrici di covarianza, secondo la:

$$l_i(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{B}{2}} |C_i|^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - m_i)^T C_i^{-1} (x - m_i)\right]$$

Per classificare un pixel bisogna invece capire a quale classe ha la maggior probabilità di appartenere. Questo equivale a calcolare la probabilità al pixel x corrisponda la classe ω_i per ognuna della classi in legenda, e confrontare i risultati: il pixel verrà assegnato alla classe a cui ha la maggior probabilità di appartenere.

Nel metodo di *classificazione di massima verosimiglianza* ogni pixel x viene quindi assegnato alla classe ω_i cui corrisponde il valore massimo della funzione di verosimiglianza $l_i(x)$:

$$l_i(x) > l_k(x) \quad \forall k \neq i \quad \Leftrightarrow x \in \omega_i$$

In linea generale si può anche utilizzare, anziché la funzione di verosimiglianza $l_i(x)$, una qualunque funzione alternativa $d_i(x)$: ciò ammesso che, per ogni coppia $i \neq k$ valga la:

$$l_i(x) > l_k(x) \quad \Leftrightarrow \quad d_i(x) > d_k(x)$$

A partire da tale considerazione conviene sostituire la funzione di verosimiglianza con la funzione di decisione del tipo:

$$d_i(x) = 2 \ln[l_i(x)] + B \ln 2\pi = -\ln|C_i| - (x - m_i)^T C_i^{-1} (x - m_i)$$

in tal caso la classificazione viene calcolata mediante la:

$$d_i(x) > d_k(x) \quad \forall k \neq i \quad \Leftrightarrow x \in \omega_i$$

Se si utilizza un valore di soglia T allora la regione Ω_i (che non interseca alcuna altra regione) ha la forma di un iperellissoide. Le superfici di separazione fra due regioni sono forme quadratiche in x e quindi sono ipersuperfici quadratiche (ellissoidiche, paraboliche o iperboliche): infatti in tal caso il termine quadratico $x^T (C_i^{-1} - C_j^{-1}) x$ non si annulla come nei casi della distanza di Mahalanobis ($C_i = C_j = C$) e della distanza euclidea $C_i = C_j = I$.

È ovvio che i metodi di classificazione basati sulla distanza di Mahalanobis o quella euclidea rappresentano casi speciali del metodo di massima verosimiglianza.

1.2.2 Le Tecniche attive

Come si è già accennato nei paragrafi precedenti, la caratteristica principale dei sistemi attivi (o meglio, dei sensori attivi che costituiscono lo specifico sistema di telerilevamento) è legata alla sorgente di potenza elettromagnetica. Questa, infatti, è installata a bordo del satellite stesso, mentre le misure che si operano sono legate alla parte di energia elettromagnetica che viene riflessa verso il sensore. Esempio di sistema attivo è il *RADAR* (Radio Detection And Ranging) che opera a microonde. Il *LIDAR* (Light Detection And Ranging) opera prevalentemente nel visibile (*VIS*) e nell'ultravioletto (*UV*), la sorgente è costituita da un laser montato a bordo della piattaforma per il rilevamento mentre il ricevitore è un telescopio.

1.2.2.1 I sistemi RADAR ⁸

RADAR è l'acronimo di *Radio Detection And Ranging*. Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, scattering).

Il trasmettitore radar genera un impulso elettromagnetico a microonde molto breve e potente (ad esempio alcuni *MW* per pochi μs), che viene emesso tramite un'antenna fortemente direttiva. Incontrando oggetti aventi caratteristiche elettromagnetiche diverse da quelle dello spazio circostante, gli impulsi vengono parzialmente riflessi e quindi captati dal ricevitore. Lanciato l'impulso, il trasmettitore si spegne e il ricevitore "ascolta" gli eventuali echi dell'impulso inviato. Una volta colpita la superficie terrestre l'energia dell'impulso radar viene reirradiata in tutte le direzioni e parte di essa torna all'antenna trasmittente con un'intensità fortemente ridotta rispetto a quella che si era emessa e ciò richiede ricevitori molto sensibili.

Il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione consente di valutare la distanza (*ranging*) a cui si trovano i singoli bersagli radar, cioè di localizzare gli oggetti lungo la direzione detta di range.

⁸ **ROCCA F., COLESANTI C., FERRETTI A., RATTI R.**, *T.R.E.: una spin - off universitaria per l'elaborazione di dati radar satellitari*, MONDODIGITALE, N. 4, Dicembre 2002.

La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*).

Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata. Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

L'idea alla base del *SAR* (*Synthetic Aperture Radar*) consente di aggirare la stessa limitazione (compromesso risoluzione-estensione dell'area osservata), invece di far ruotare l'antenna si è pensato di sfruttare il moto della piattaforma su cui è installato il sistema radar per effettuare una scansione dell'area di interesse.

Il radar ad apertura sintetica (*SAR*) è un sistema di Telerilevamento attivo operante nel campo delle microonde ed è uno strumento costituito da un radar di tipo convenzionale montato su una piattaforma mobile (un aeroplano o un satellite).

L'antenna del radar (**Figura 18**) è puntata verso terra ortogonalmente alla direzione di moto della piattaforma con un angolo compreso tra 20 e 80 gradi rispetto alla direzione di Nadir (denominato angolo di *off-nadir*).

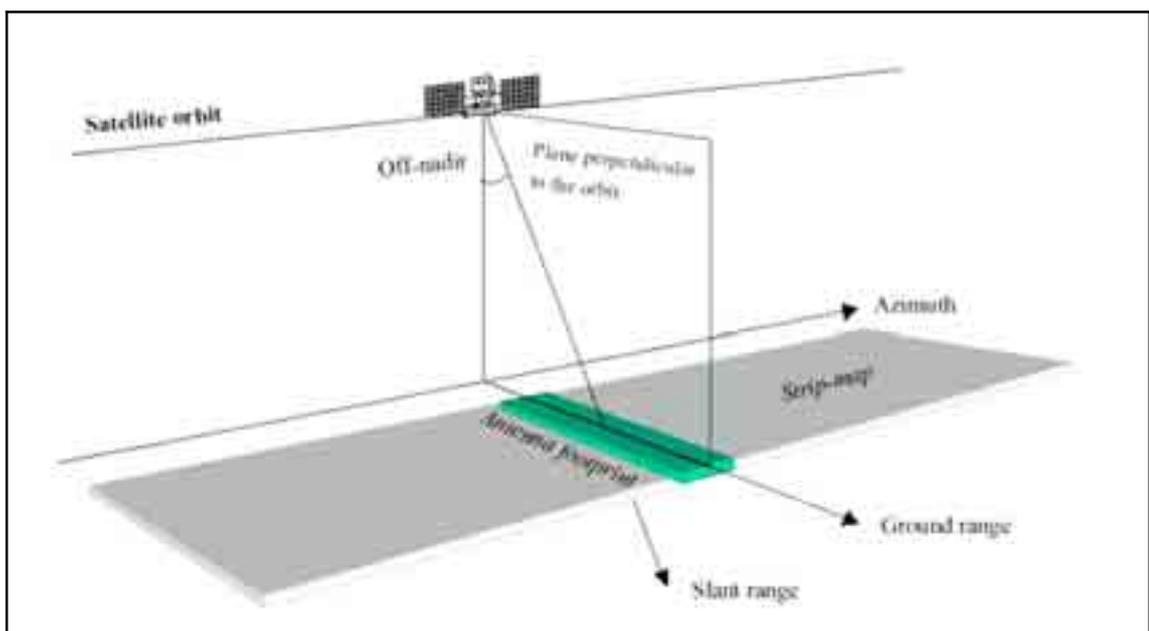


Figura 18: sistema SAR satellitare, schema di acquisizione.

I vantaggi del *SAR* rispetto ai consueti sistemi ottici sono legati alla capacità di operare di notte e in presenza di nuvole (ci sono aree della terra di cui non esistono immagini ottiche da satellite a causa della copertura nuvolosa perenne).

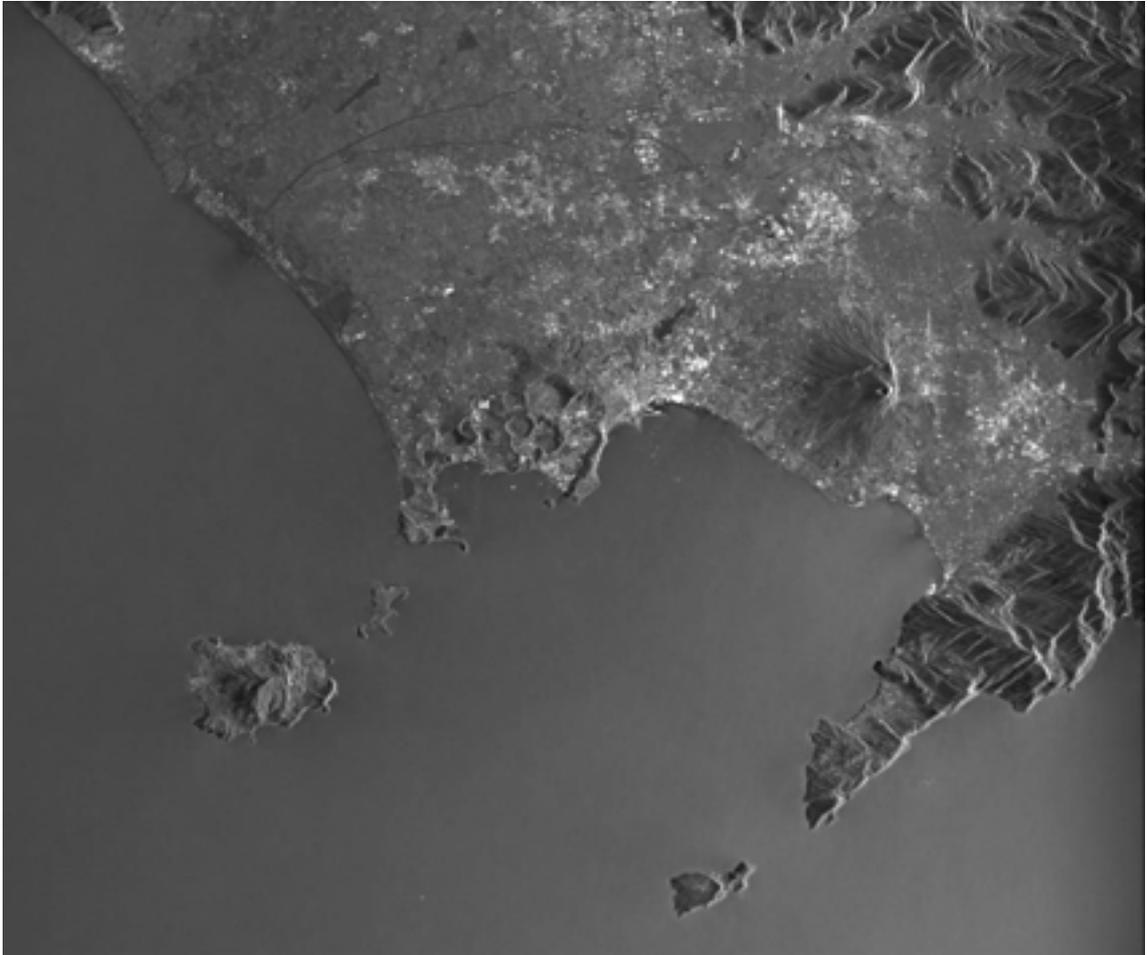


Figura 19: Immagine SAR del golfo di Napoli ottenuta grazie all'elaborazione dei dati acquisiti dai sensori ERS-1 ed ERS-2 dell'ESA, (l'immagine è stata estratta dal sito <http://www.irea.cnr.it/ricerca/tlrmicroonde/ricercat11.html> consultato in data 5 giugno 2006).

Inoltre, il *SAR* può fornire immagini coerenti che contengano cioè sia l'informazione d'intensità (legata alla riflettività degli oggetti) sia l'informazione di fase (legata alla distanza tra bersaglio e radar). La coerenza del sistema SAR consente alcune applicazioni di grande interesse pratico, ma è causa del cosiddetto fenomeno di *speckle* visibile come una variazione casuale dell'intensità dell'immagine intorno al valor medio della retrodiffusione (lo stesso effetto di granulosità che si nota puntando un laser su una parete non perfettamente liscia). Una singola cella di risoluzione, o un pixel, corrisponde, come abbiamo detto, ad un'area a terra che contiene molti diffusori che interagiscono in maniera differente con la radiazione incidente. Questa interazione multipla produce echi che

interferiscono tra loro in modo costruttivo o distruttivo. L'interferenza costruttiva determina un forte segnale di ritorno ed è associata a pixel molto chiari, mentre l'interferenza distruttiva determina bassi segnali di ritorno e pixel molto scuri ed è proprio lo sfasamento costruttivo o distruttivo del segnale elettromagnetico a conferire alle immagini *SAR* il caratteristico aspetto "sale e pepe" (Figura 19).

1.2.2.2 I sistemi LIDAR

LIDAR (*Light Detection and Ranging*; or *Laser Imaging Detection and Ranging*) è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser, oltre a determinare la concentrazione di specie chimiche nell'atmosfera. Come per il radar, che al posto della luce utilizza onde radio, la distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale retrodiffuso. La sorgente di un sistema *LIDAR* è un laser, ovvero un fascio coerente di luce ad una ben precisa lunghezza d'onda, che viene inviato verso il sistema da osservare.

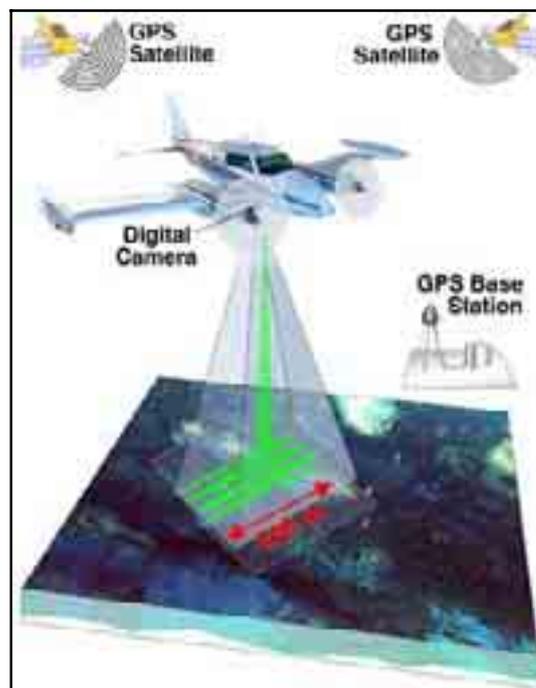


Figura 20: Sistema di acquisizione LIDAR con strumentazione a bordo di un aereo.

Il *LIDAR* (*Light Detection and Ranging*) è quindi una tecnica di telerilevamento "attivo" che consente l'esecuzione di rilievi topografici di alta risoluzione. Il rilievo viene

effettuato con un mezzo aereo (aeroplano o elicottero) sul quale è installato un laserscanner composto da:

- un **trasmettitore** (essenzialmente un laser);
- un **ricevitore** (costituito da un telescopio);
- un **sistema di acquisizione dati**.

La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad una elevata risoluzione. Il laser scanner rileva la topografia della superficie terrestre acquisendo un elevato numero di coordinate tridimensionali (XYZ) di punti al suolo. Tali coordinate sono calcolate mediante misure di distanza effettuate con fasci di raggi laser inviati dallo strumento aerotrasportato in combinazione con le informazioni derivanti da sistemi *GPS* e inerziali.



Figura 21: Immagine LIDAR del WORLD TRADE CENTER (New York) del 27 settembre 2001, (dal sito <http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s798b.htm> consultato in data 5 giugno 2006).

Possibili campi in cui trovano applicazione i sistemi LIDAR sono:

- Impiego su satelliti (telescopi LIDAR) per la determinazione di mappe di ozono, polveri sottili, elementi chimici oppure di mappe topografiche di eccezionale qualità;
- Impiego su aeromobili per la determinazione di profili di zone agricole o urbane e industriali da monitorare (inquinamento, abusi edilizi, etc);
- Impiego terrestre da parte delle forze di polizia per determinare la velocità delle automobili.

1.2.3 La tecnica dei Diffusori Permanenti ⁹

Una delle tecniche che meglio permettono di analizzare e di monitorare i lenti movimenti del terreno è la tecnica dei Diffusori Permanenti (*Permanent Scatterers*) messa a punto da un team di ricercatori del Politecnico di Milano. Tale tecnica ha mostrato la sua efficacia e la sua affidabilità in molti casi di studio (in Italia e all'estero) in tutti quei casi in cui fosse necessario monitorare con estrema precisione i movimenti della superficie terrestre.

Negli ultimi decenni si è osservata una notevole diffusione di dati satellitari acquisiti mediante sensori di tipo attivo (in particolare dati Radar). Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*).

Il trasmettitore radar genera un impulso elettromagnetico a microonde molto breve e potente; una volta colpita la superficie terrestre l'energia dell'impulso radar viene irradata in tutte le direzioni e parte di essa torna all'antenna trasmittente con un'intensità fortemente ridotta rispetto a quella che si era emessa e ciò richiede ricevitori molto sensibili.

Partendo dai dati acquisiti mediante i sensori radar posti su piattaforme satellitari, si è sviluppata una innovativa tecnica basata sull'Interferometria SAR ¹⁰ (*InSAR*). Tale tecnica nasce dall'esigenza di misurare gli spostamenti superficiali ed ottenere modelli digitali del terreno.

A differenza di un'immagine ottica (tipicamente ottenuta da sensori di tipo passivo operanti nelle bande del visibile), l'immagine radar è di tipo complesso.

Ogni pixel contiene un'informazione sia sull'ampiezza del segnale che sulla sua fase. Tipicamente tale relazione è esprimibile mediante la formula:

$$s(i, j) = a(i, j) + jb(i, j)$$

⁹ AA.VV., Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di Sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, APAT, Roma, 20-21 maggio 2004, pp. 709, cfr. pp. 505-511. Per un approfondimento sull'argomento del manifestarsi del fenomeno in Italia si consulti anche: AA.VV., Le voragini catastrofiche – un nuovo problema per la Toscana, Edizioni Regione Toscana, Firenze, 2002, pp. 256.

¹⁰ SAR, è l'acronimo di *Synthetic Aperture Radar* (Radar ad apertura sintetica).

dove $a(i,j)$ rappresenta l'ampiezza del segnale retrodiffuso dalla superficie verso il sensore mentre $jb(i,j)$ la sua fase. La fase del segnale trasporta un'informazione relativa alla distanza percorsa dal segnale radar tra il satellite e l'oggetto osservato.

Confrontando i termini di fase di due immagini della stessa area, acquisite in tempi diversi, l'interferometria SAR permette di fornire stime sulla quota topografica o di movimento. Questo è possibile mediante la generazione di quello che viene generalmente indicato con il termine di Interferogramma, cioè un'immagine che contiene le differenze di fase dei pixel omologhi.

Per sfruttare a pieno il potenziale dei dati SAR è stata messa a punto dal Politecnico di Milano e successivamente sviluppata dalla società Tele Rilevamento Europa (T.R.E) la tecnica detta dei *Diffusori Permanenti* (in inglese *Permanent Scatterers, PS*).

La tecnica dei Diffusori Permanenti consente di monitorare con grande precisione i fenomeni di deformazione del terreno permettendo, per ogni *PS*, di rappresentare il trend medio di deformazione e creare delle vere e proprie mappe di deformazione della zona di interesse.

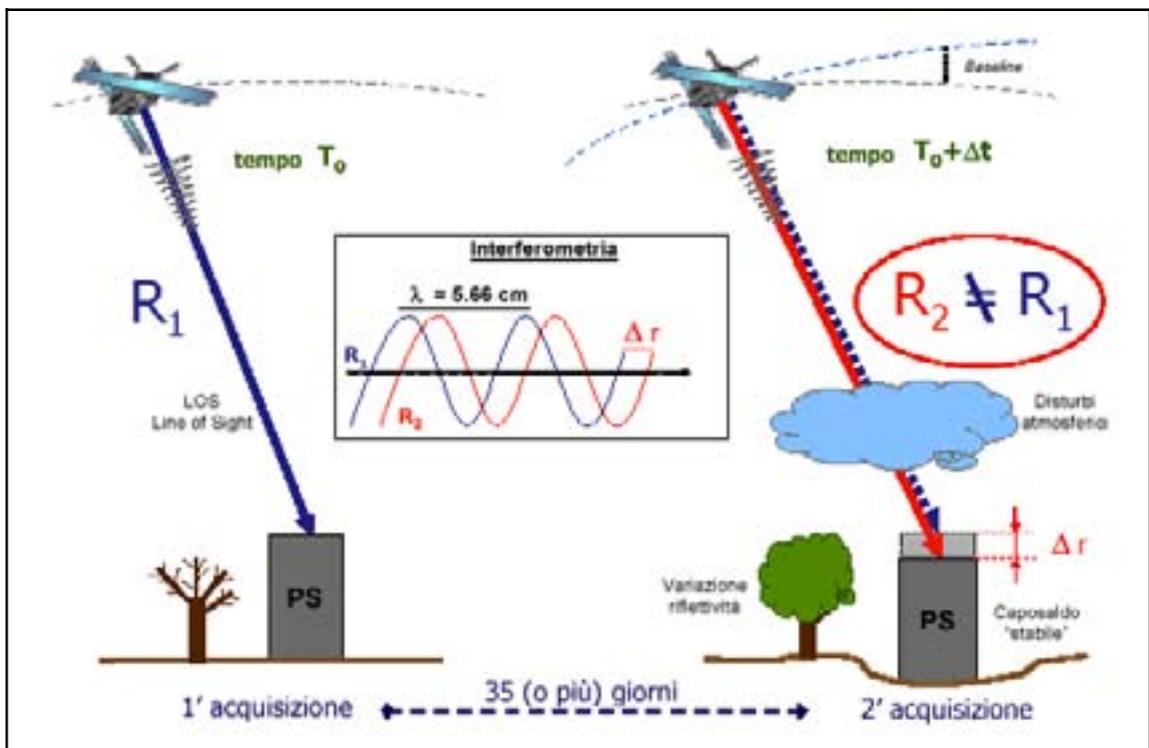


Figura 22: Rappresentazione della base teorica della tecnica interferometrica, dei *Permanent Scatterers* e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR.

Tale tecnica consiste nella preliminare identificazione e nella successiva analisi della risposta di fase di riflettori naturali stabili (costruzioni, rocce, ecc.) detti proprio Diffusori Permanenti. Partendo dalla disponibilità di lunghe serie temporali di immagini SAR è possibile stimare ed isolare con estrema precisione i vari contributi alla fase interferometrica ed in particolare il contributo legato alla velocità di spostamento di ogni singolo *PS*.

Si utilizza il SAR come un vero e proprio strumento di misura delle deformazioni del terreno. In corrispondenza dei *PS* si possono ottenere *DEM* (*Digital Elevation Model*) con la precisione di un metro e la valutazione di movimenti millimetrici del terreno.

In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di *PS* raggiunge valori molto alti: 100 – 400 *PS*/km². I *PS* vengono correttamente posizionati nella cella di risoluzione al suolo e in corrispondenza di ciascuno si effettua una misura di deformazione per ogni acquisizione disponibile è così possibile ricostruire l'intera serie temporale di deformazione del *PS*; l'accuratezza arriva (nei punti migliori) a 1-2 mm su ogni singola misura. Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (*LOS*, *Line of Sight*), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra di coordinate note e supposti fermi o espressamente indicati ad esempio da misure *GPS* o di livellazione ottica. In corrispondenza di ogni singolo *PS* si ricava, inoltre, il trend medio di deformazione con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno.

L'accuratezza è in funzione del numero di immagini e della "qualità" del *PS* stesso, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso il *PS* sia immune a fenomeni di disturbo. Un ulteriore aspetto vantaggioso è costituito dalla ricchezza di dati disponibili nell'archivio ERS dell'ESA. È possibile avviare un'analisi *PS* oggi, avendo a disposizione dati acquisiti a partire dal 1992 e potendo, quindi, ricostruire la storia passata dell'area di interesse. Risultati significativi ottenuti con la tecnica *PS* sono stati validati facendo uso di dati di livellazione ottica, di misure effettuate presso stazioni *GPS* (*Global Positioning System*) e attraverso lo studio di fenomeni di dilatazione termica di strutture. In definitiva, i *PS* costituiscono una sorta di "rete geodetica naturale" che consente l'analisi di fenomeni di deformazione superficiale.

Nel caso non sia possibile ottenere misure di una specifica area di interesse o di una particolare infrastruttura o edificio, per la totale assenza di bersagli radar con caratteristiche di *Permanent Scatterers*, è possibile installare degli specifici riflettori artificiali che, per caratteristiche costruttive, si comportano da capisaldi radar. Si tratta di

manufatti in metallo di tipo passivo che non richiedono una particolare manutenzione, e che, successivamente al momento dell'installazione, si possono identificare e monitorare nelle immagini SAR.

In **Figura 23** sono rappresentati due tipi di riflettori artificiali:

- il tipo **corner**, un triedro cavo di lato pari a circa 170 cm utile ad essere installato in aree extra-urbane;
- il tipo **planar**, una lastra quadrata di circa 120 cm di lato, più adatto ad una collocazione in ambiente urbano visto il limitato impatto ambientale.



Figura 23: Riflettori di tipo corner e planar.

Si procede, inizialmente, con uno studio statistico dei valori di ampiezza che porta alla selezione di un insieme di punti (*PSC – Permanent Scatterers Candidates*) che vengono individuati mediante un indice, detto indice di stabilità sull'ampiezza, in grado di fornire informazioni sulla stabilità dei valori di riflettività nell'arco di tempo coperto dalla serie di immagini disponibili.

Si procede con l'analisi ispezionando la differenza di fase (chiamata "connessione") tra tutte le coppie di *PSC* poste ad una distanza minore di D ; per i punti appartenenti a queste coppie il disturbo atmosferico viene assunto quasi costante. Si assume inoltre che i movimenti del terreno seguano una legge di tipo lineare. Con tali assunzioni è possibile stimare e rimuovere il contributo atmosferico. Al termine dell'analisi vengono selezionati solo quei punti che presentano un'elevata stabilità di fase (superiore ad una soglia prefissata): ciò porta alla definizione dei *PS* veri e propri.

L'elaborazione dei dati di fase per ogni *PS* consente di ricostruire lo spostamento del punto per ogni acquisizione. Infatti, una volta compensato il disturbo atmosferico in

corrispondenza di ogni singolo *PS*, è possibile stimare in ciascun interferogramma differenziale l'eventuale contributo di fase dovuto al solo movimento. Successivamente, dalla serie temporale degli spostamenti si stima la velocità (supposta costante nel periodo), con accuratezza massima di 1 mm/anno.

Tutti i dati di velocità sono relativi ad un punto assunto come riferimento. Va inoltre considerato che le misure SAR rilevano i movimenti lungo la direzione individuata dalla congiungente satellite-bersaglio radar (linea di vista, Line of Sight - LOS); nel caso dei sensori ERS, la LOS è quasi verticale ($\sim 23^\circ$), per cui l'analisi *PS* fornisce misure di *deformazione pseudo-verticale*. Nel caso si abbiano a disposizione dati provenienti da orbite diverse è possibile eseguire anche delle stime di deformazioni orizzontali, ma solo nella direzione che va da **E** verso **W** e viceversa.

L'informazione associata ad ogni *PS* viene infine geocodificata in modo da assegnare ad ogni bersaglio una coppia di coordinate e il tutto viene inserito in un *GIS* per l'interpretazione.

Analisi di deformazione nell'area urbana di Milano¹¹

Si ritiene interessante illustrare molto brevemente qualche risultato ottenuto nel corso di un'analisi di deformazione dell'area urbana di Milano avvalendosi di 80 immagini radar acquisite dai sensori SAR ERS-1/2 tra maggio 1992 e dicembre 2000.

I principali obiettivi dello studio sono l'acquisizione di dati di deformazione su larga scala per la valutazione dell'eventuale impatto dell'innalzamento della falda freatica nell'area urbana milanese; fenomeno particolarmente accentuato verso **SE** (San Donato e San Giuliano); acquisizione di dati puntuali di deformazione per identificare fenomeni che interessano singoli edifici o isolati; integrazione delle misure *PS* in ambiente *GIS*, per consentire all'utente di consultare e rappresentare i dati in base alle proprie esigenze.

L'analisi ha consentito di individuare un elevato numero di punti di misura affidabili (*PS*); la densità spaziale media è superiore a $200 \text{ PS}/\text{km}^2$. In corrispondenza di ogni *PS* si ricava il valore di quota con un'accuratezza inferiore al metro. Ciò consente di georeferenziare la posizione dei *PS* (passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche) con un'accuratezza sufficiente a proiettare correttamente i *PS* su

¹¹ FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., *Measuring subsidence with SAR interferometry applications of the permanent scatterers technique*, Natural Hazards Workshop, Igls, AUSTRIA, June 2000, pp 81-90.

corrispondenti strutture e edifici. Per ogni *PS* si è ricavato il trend medio di deformazione nell'intervallo temporale 1992-1999, attribuendo, inoltre al *PS* un parametro di qualità (con valore compreso tra 0 e 1) che riassume l'accuratezza (tra 0.1 e 1 *mm/anno*) del trend determinato. Per i punti di misura ritenuti più interessanti si è ricostruita l'intera serie temporale di deformazione con accuratezza compresa tra 1 e 3 *mm* su ogni singolo dato. I parametri relativi ai *PS* (coordinate SAR, coordinate geografiche, altimetria, trend medio di deformazione, parametro di qualità ed, eventualmente, serie temporale completa) sono stati raccolti in un *database* (.dbf) accessibile in ambiente ArcView GIS.

I dati possono essere agevolmente sovrapposti ad altri *layer*, in particolare al tessuto urbano e al grafo stradale, in modo da rendere estremamente pratica la consultazione dei risultati dell'indagine *PS*. L'analisi *PS* consente di affermare che non sono in atto significativi fenomeni di deformazione del terreno su larga scala. Il forte innalzarsi della falda freatica nel corso degli ultimi anni non ha (per il momento) innescato fenomeni di deformazione superficiale, quantomeno su aree vaste. Ciò è perfettamente in linea con quanto ci si aspetta: si tratta della ricarica della falda freatica a valle di un intenso prelievo idrico protratto per anni che ha causato subsidenza irreversibile.

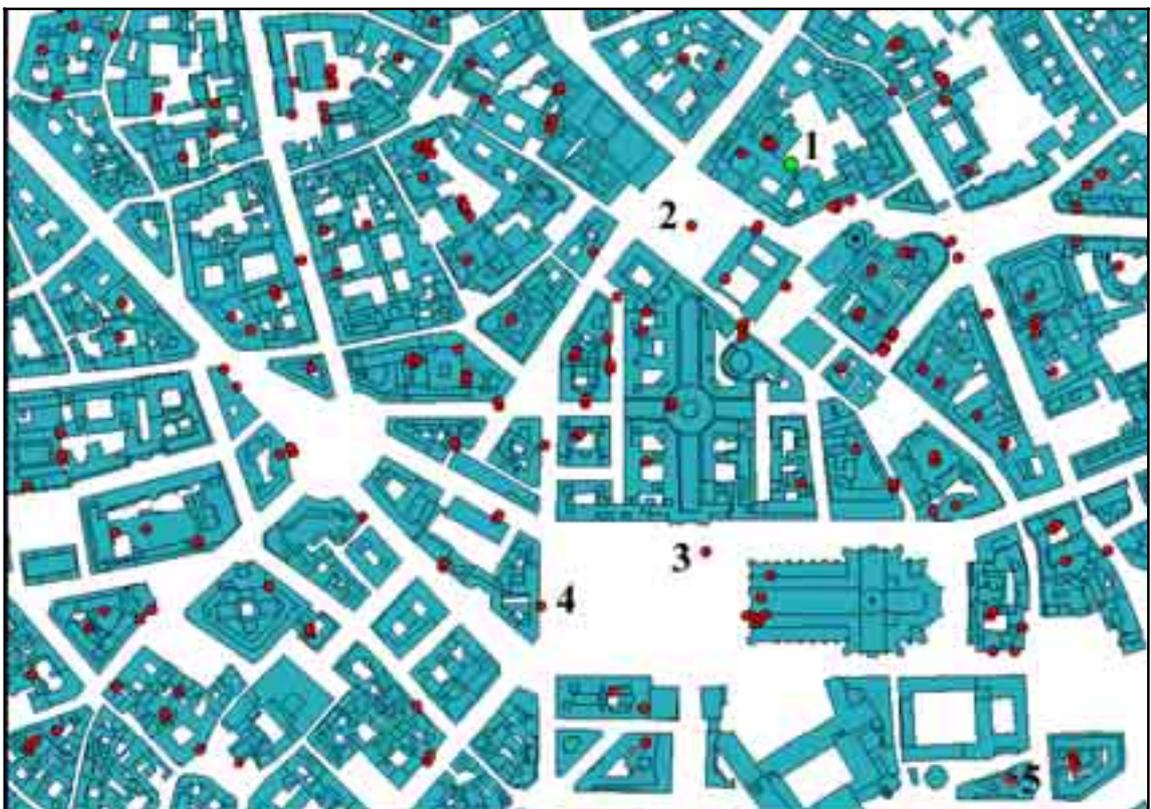


Figura 24: Analisi di deformazione di edifici nel centro storico di Milano integrate in ambiente GIS. Il punto 1 (indicato con il colore verde) e' assunto come punto stabile (Punto di Riferimento). Il moto di tutti i punti rossi e' relativo al Punto di Riferimento.

In **Figura 24** è raffigurato il centro storico della città con i *PS* la cui deformazione ben si lascia riassumere in un trend medio. Si è fatto uso di dati *GIS* relativi al territorio del Comune di Milano, i *PS* sono stati sovrapposti alla cartografia urbana.

Una quota significativa di edifici presenta caratteristiche di *PS*. Si ricorda inoltre che tutte le misure sono di tipo differenziale rispetto al *PS* rappresentato in colore verde (1 in **Figura 24**), tale *PS* è stato preso come punto fisso di riferimento perché mostra coerenza pari ad 1.

Anche altre strutture, eventualmente molto particolari, possono costituire punti di misura radar affidabili: per esempio, il monumento a Leonardo da Vinci nel centro di Piazza alla Scala (2 in **Figura 24**), oppure uno degli ingressi della metropolitana in piazza Duomo (3 in **Figura 24**).

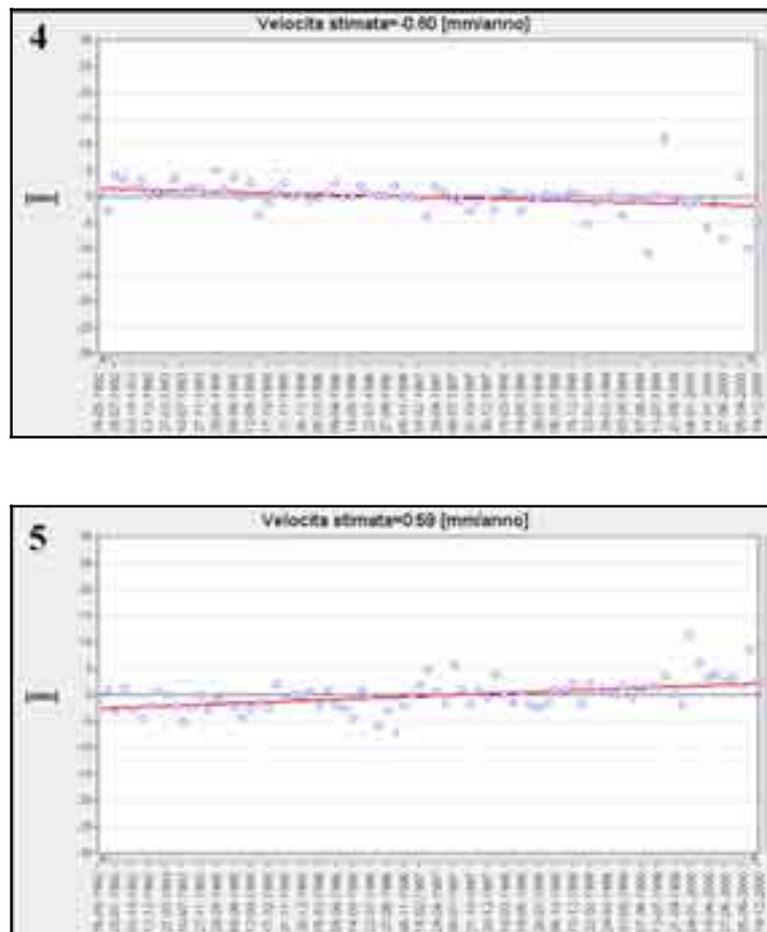


Figura 25: Serie temporale di deformazione degli edifici 4 e 5 a partire dal 1992.

Nell'identificazione dei *PS* si è richiesta la coerenza di fase nell'intero intervallo 1992-2000. Per questo motivo il Duomo mostra parecchi *PS* concentrati solo verso la facciata; l'abside e le navate laterali sono state, infatti, oggetto di protratti interventi di restauro

nell'ultimo decennio. Gli interventi alla facciata, invece, sono stati eseguiti negli anni '80, prima che cominciassero le acquisizioni ERS. Si riporta in Figura 25 la serie temporale di deformazione dell'edificio 4 e 5 in Figura 24.

*Analisi di deformazione nell'area urbana di Parigi*¹²

Un caso interessante di abbassamento, studiato utilizzando la tecnica *PS* è quello di Parigi. Sono state utilizzate 61 immagini ERS, tutte ricampionate rispetto alla stessa immagine master e si sono così ottenuti 60 interferogrammi. Dopo la scelta iniziale dei *PS* (sono stati identificati circa 3 *PS/km*²), sono stati valutati separatamente gli incrementi di fase tra ogni *PS* e tutti gli altri che si trovavano a distanza inferiore di 1 km. L'intervallo di *baseline* normale è di +/-1100 m, mentre la *baseline* temporale massima è superiore ai 6 anni. Se ora accettiamo, temporaneamente, l'ipotesi di velocità costante di ogni pixel (in direzione *LOS*), possiamo stimare sia l'elevazione residua che la differenza di velocità *LOS* dei pixel. Questa operazione è stata eseguita separatamente per tutte le coppie di *PS* posti a meno di 1km, rimuovendo così gli effetti dell'elevazione residua in riferimento al DEM medio e gli effetti della velocità in direzione *LOS* e stimando i valori della fase *srotolati*. Dopo la stima sia dell'elevazione che della velocità media degli obiettivi, è stata eseguita l'analisi della serie storica dei residui di fase in corrispondenza di ogni *PS*. L'obiettivo è identificare possibili contributi di movimento non lineari. L'APS è stato quindi interpolato sulla griglia regolare originale e rimosso da ogni dato. Ogni APS è in realtà dato dalla differenza della componente atmosferica di fase dell'immagine secondaria e dell'APS dell'acquisizione principale. Facendo la media dei 60 APS è stato possibile per ottenere una stima del contributo principale e quindi di ogni singolo contributo. Dopo la rimozione APS è possibile stimare non solo il campo di velocità medio dell'area ma anche un campo di spostamento come una funzione del tempo, interpolando possibilmente le mappe di spostamento su una griglia temporale regolare. Nella **Figura 26** è mostrato un esempio di movimento non lineare di un pixel a Parigi situato nell'area della Stazione St. Lazaire dove i lavori per la costruzione di una nuova linea di metropolitana hanno causato fenomeni di abbassamento. La conferma della precisione dei risultati si è ottenuta confrontando la dilatazione dell'edificio metallico di La Cité des Sciences con le temperature rilevate a Parigi. Il risultato viene mostrato nella Figura 26.

¹² **Ferretti A., Prati C., Rocca F:** "Permanent Scatterers in SAR Interferometry".IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.39, N.1, 2001, p.8-20.

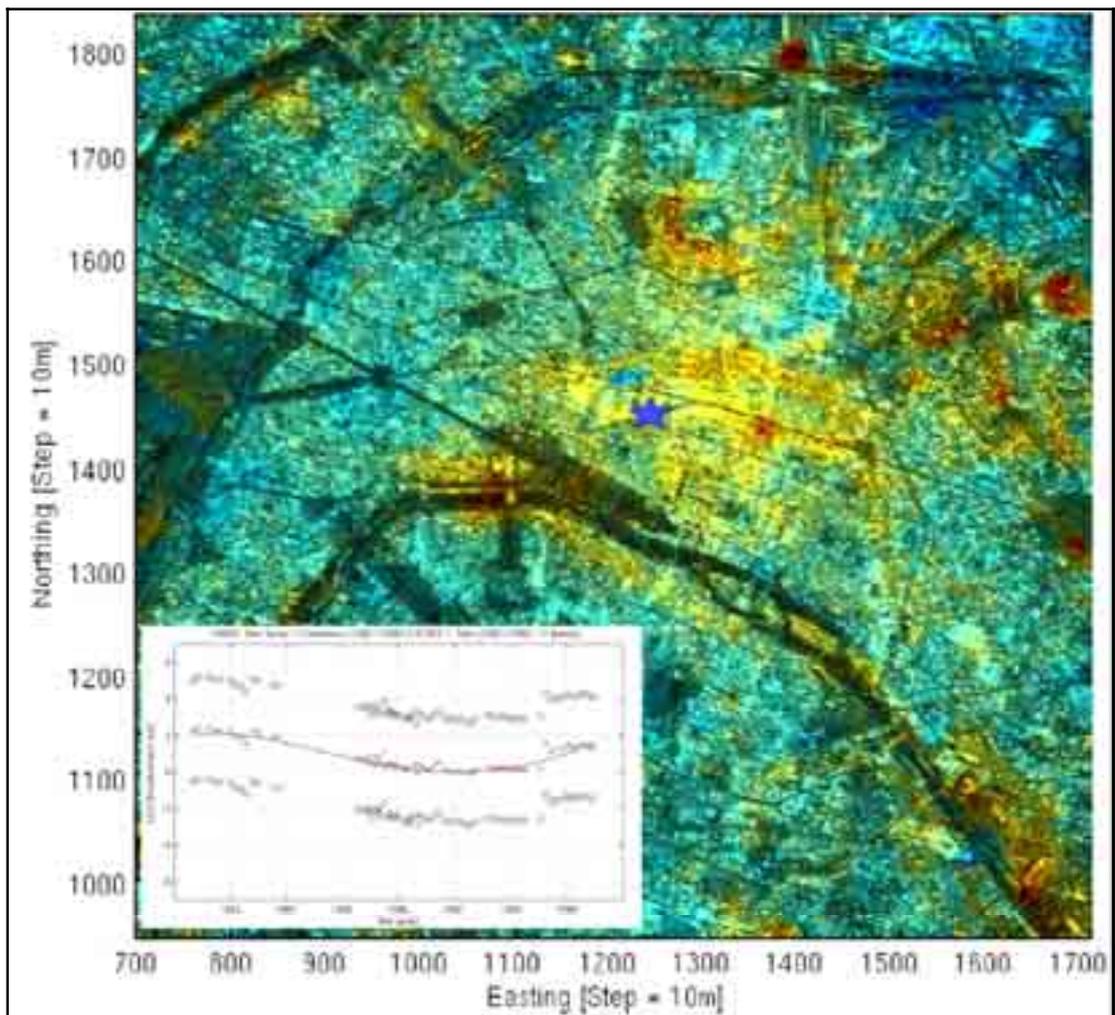


Figura 26: La sequenza temporale rispetto a un singolo pixel in prossimità della Stazione St. Lazaire (stella blu). Nella mappa di deformazione sono indicate in verde-blu le aree stabili, in giallo-rosso le aree con movimento superiore a 4 mm/anno.

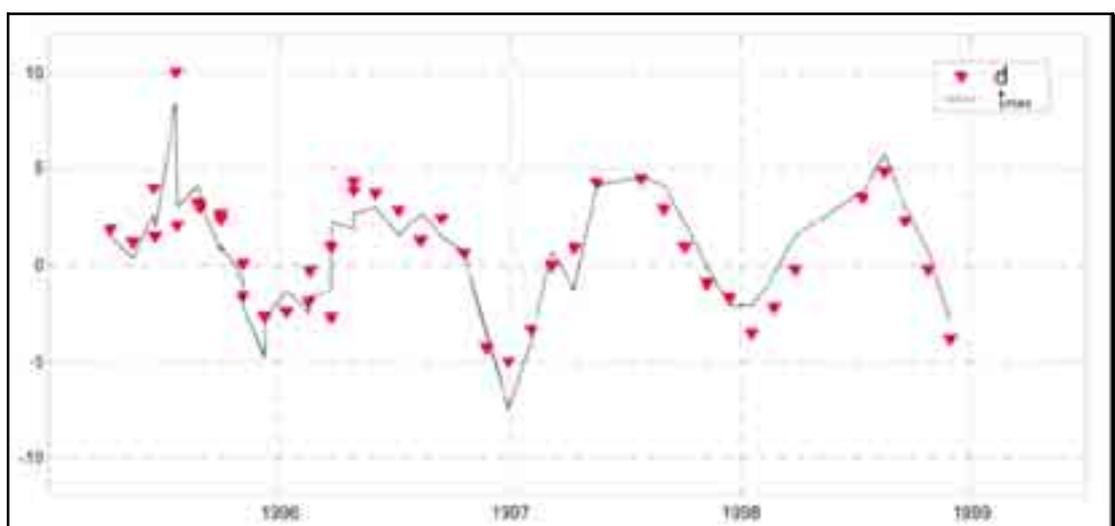


Figura 27: La dilatazione termica, rilevata con la tecnica PS (triangoli rossi), è paragonata alla temperatura giornaliera massima corrispondente (linea continua)

1.3 La Fotointerpretazione

La fotointerpretazione è una tecnica per l'acquisizione dei dati geotopografici contenuti nelle immagini aerofotografiche. Essa è forse la tecnica di analisi del territorio più tradizionale, infatti, la base di partenza è costituita dalle tradizionali fotografie aeree analogiche scattate da macchine da presa posizionate su piattaforme aeree.

L'uso di questo tipo di fotografie, che videro il loro primo impiego per scopi esclusivamente militari, si è via via diffuso proprio perché di ausilio a numerose applicazioni che vanno dalla **pianificazione territoriale** al controllo di **situazioni di emergenza**.

Le fotografie aeree sono in grado di registrare la radiazione elettromagnetica nell'intera parte dello *spettro visibile* (a volte anche nell'*infrarosso* grazie all'utilizzazione di particolari pellicole) ed hanno rappresentato il primo strumento per l'osservazione della Terra.

Generalmente le pellicole utilizzate sono di *tipo pancromatico* e le immagini che se ne ricavano sono in toni di grigio anche se, più recentemente, si è sempre più diffuso l'uso di pellicole a colori in grado di restituire una rappresentazione del territorio più vicina alla realtà.

L'analisi e l'interpretazione di queste immagini analogiche, meglio nota come **fotointerpretazione**, sfrutta prevalentemente le informazioni di **forma** e di **tessitura** presenti nell'immagine così da poter riconoscere ed identificare i diversi oggetti rappresentati.

Rispetto alle osservazioni dirette "*in campagna*", l'indagine analitica e sistematica dei documenti fotografici offre numerosi vantaggi, tra cui:

- **visione globale del territorio;**
- **possibilità di studio dinamico dell'ambiente;**
- **riduzione dei costi;**
- **descrizione di aree inaccessibili.**

Il processo di acquisizione dell'informazione è articolato in tre fasi:

- **fotolettura:** il riconoscimento degli oggetti visibili sulla fotografia aerea;

- **analisi:** determinazione delle caratteristiche fisiche e geometriche degli oggetti riconosciuti;
- **interpretazione:** definizione dei rapporti spazio-temporali tra i singoli oggetti in base ai fattori
 1. *umano*;
 2. *informativo*;
 3. *tecnico*.

Il **fattore umano** è fortemente influenzato dalla formazione professionale e da alcune doti intrinseche richieste al fotointerprete, come ad esempio una buona vista generale, la visione stereoscopica, memoria visiva, intuizione, capacità di sintesi e spirito analitico deduttivo e, in generale, una buona cultura geografica e geomorfologica.

Il **fattore informativo** è costituito prevalentemente dalle fotografie aeree e dalle carte topografiche disponibili, mentre il **fattore tecnico** è costituito soprattutto dagli strumenti di cui può avvalersi il fotointerprete (stereoscopio, lente micrometrica, compasso a doppie punte, fotorestitutori...).

Abbiamo appena visto che il fine ultimo della fotointerpretazione è la definizione della natura, delle dimensioni e della funzione degli oggetti fotografati.

Il processo prevede l'analisi di alcuni parametri fondamentali che sono:

- **forma;**
- **dimensione** (larghezza, lunghezza, altezza);
- **tono o colore;**
- **ombra;**
- **elementi associati.**

L'analisi di ognuno dei parametri elencati concorre, in ugual misura, al buon esito dell'attività di *fotointerpretazione*.

Una tecnica di ausilio al processo di fotointerpretazione è la *stereoscopia*; per *stereoscopia* si intende la visione di uno stesso oggetto o di una medesima porzione di territorio da due punti di osservazione differenti.

La stereoscopia può essere originata da sistemi di visualizzazione artificiale che consentono di apprezzare la tridimensionalità del mondo esterno.

L'uomo gode di una visione stereoscopica naturale del mondo che lo circonda, e questa avviene proprio grazie agli occhi che, essendo in coppia e distanti tra loro, consentono di apprezzare la tridimensionalità dello spazio reale permettendo di osservare lo stesso oggetto da due punti di vista differenti; la **visione monoculare** o *monoscopica* non sarebbe sufficiente a farci apprezzare la profondità (o terza dimensione) dello spazio circostante.

È possibile ottenere un'*immagine stereoscopica* dalle fotografie aeree mediante il corretto uso dello **stereoscopio**. L'uso di due fotografie dello stesso oggetto ma con punti di presa differenti permette, con l'aiuto dello stereoscopio, di apprezzare e valutare la tridimensionalità degli oggetti: gli occhi, infatti, osservano separatamente le due immagini che vengono poi "fuse" nel cervello e interpretate come un'unica immagine tridimensionale.

Funzionamento dello stereoscopio

L'immagine dello stesso oggetto rappresentato sui due fotogrammi (*stereogramma destro* e *stereogramma sinistro*) con un diverso punto di vista (**Figura 28**), è inviata tramite un sistema di specchi agli occhi: l'immagine di sinistra all'occhio sinistro e l'immagine destra all'occhio destro.

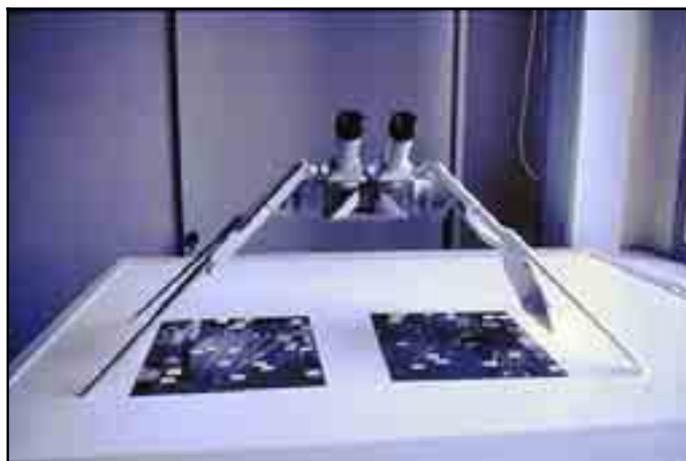


Figura 28: Stereoscopio a specchi (da www.vercelli.polito.it/civili/).

Ogni occhio vede quindi l'oggetto con una diversa angolazione e il cervello interpreta questa differenza come l'angolo di convergenza che gli occhi formano nella realtà quando

si osservano oggetti posti a distanza dall'osservatore; questo consente a chi guarda di apprezzare anche la terza dimensione (che nel caso di fotografie aeree è rappresentata, appunto, dall'altezza o elevazione).

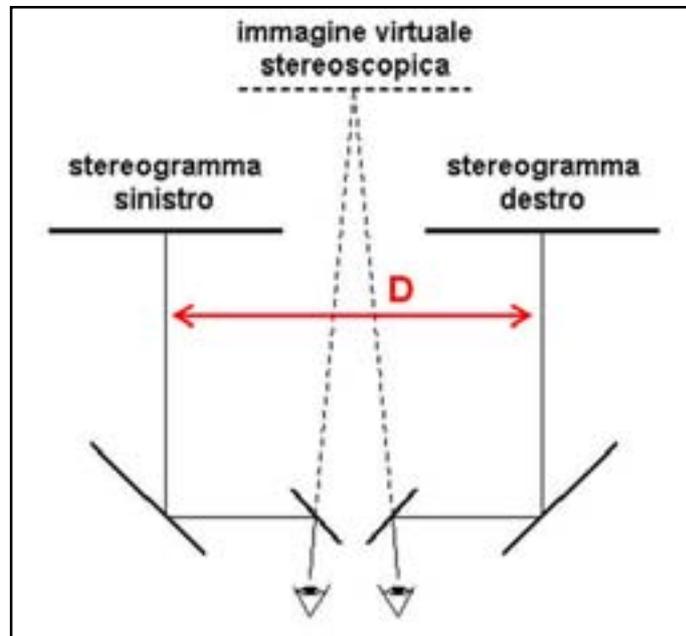


Figura 29: Stereoscopio a specchi, schema di funzionamento (estratto dal sito www.funsci.com/fun3_it/stsc/ consultato in data 3 giugno 2006, parzialmente modificato): **D** rappresenta la distanza fra i due stereogrammi e corrisponde alla interdistanza fra i centri dei campi visivi.

È opportuno ricordare che si definisce *fotografia aerea* o *aerofotografia* una qualsiasi foto scattata da un punto di ripresa aereo.

I tipi di ripresa dipendono dalla macchina fotografica e dal suo posizionamento sul velivolo; si possono, quindi, ottenere fotografie:

- **verticali;**
- **oblique;**
- **panoramiche;**
- **a ventaglio;**
- **multiple.**

La **ripresa verticale** è quella effettuata con l'asse ottico della fotocamera perpendicolare al terreno (con una tolleranza di +/- 5°). Tale tipo di ripresa può essere usata per l'aggiornamento cartografico essendo possibile effettuare su di essa misurazioni

di grande precisione, inoltre lo spostamento del punto di ripresa lungo la rotta consente di usare coppie di fotografie verticali per la visione stereoscopica delle immagini al suolo.

Nella **ripresa obliqua** l'asse ottico della fotocamera è compreso tra il piano orizzontale passante per il centro ottico dell'obiettivo e la verticale: l'angolo compreso tra il piano orizzontale e l'asse ottico è detto angolo di depressione. Questo tipo di ripresa è molto più familiare rispetto a quella di tipo verticale perché più simile al nostro modo di osservare. Infatti, il soggetto si presenta proprio così come siamo abituati a vederlo quotidianamente.

La **ripresa panoramica** permette di abbracciare, per ogni singolo fotogramma, una visuale da orizzonte ad orizzonte su ogni singolo fotogramma. Per ottenere un maggior campo abbracciato, ma con prestazioni superiori alle riprese panoramiche, si usano invece le cosiddette **riprese a ventaglio** che si concretizzano nell'impiego simultaneo di più fotocamere.

Anche le **riprese multiple** consentono di osservare una ampia porzione di territorio mediante l'uso di una unica fotocamera avente più ottiche di ripresa diversamente orientate.

Spesso le fotografie aeree vengono *mosaiccate* e cioè unite insieme a formare un unico *mosaico*. Per **mosaico** si intende la rappresentazione di un'area ottenuta riunendo più fotogrammi di una stessa strisciata, tagliati e montati in maniera tale da ottenere una visione d'insieme come se si trattasse di un'unica fotografia.

Il **riporto del campo abbracciato** consiste invece nell'acquisizione delle tecniche pratiche per l'individuazione su una carta topografica della porzione di territorio ripreso tramite una missione aerofotografica.

In pratica si sovrappone un foglio di carta lucida alla carta topografica evidenziando almeno tre punti di riferimento, riportando poi graficamente sulla carta topografica il campo abbracciato di ogni singolo fotogramma di interesse per ottenere una visione d'insieme di tutta l'area.

Per effettuare operazioni di misura su foto aeree occorre innanzi tutto essere in grado di determinare quale sia la scala di rappresentazione degli oggetti che compaiono nel fotogramma.

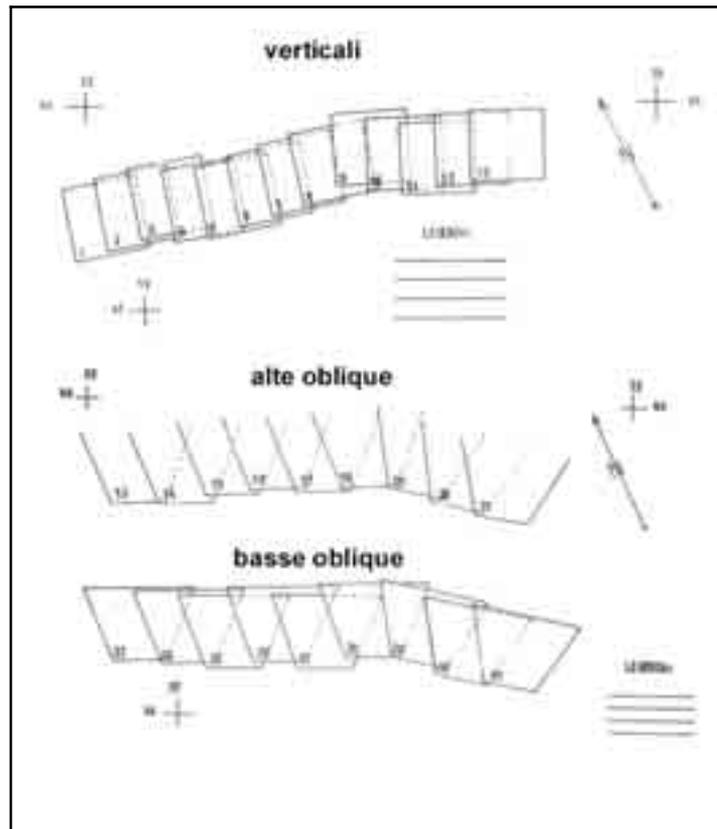
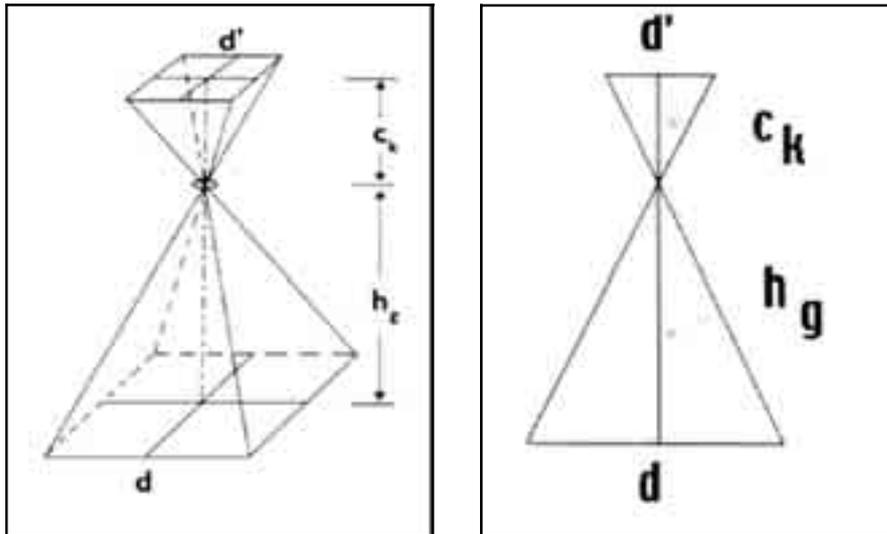


Figura 30: Esempi di riporto per fotografie verticali, alte oblique e basse oblique.

Si deve inoltre ricordare che la scala di rappresentazione dipende sempre dalle caratteristiche della macchina utilizzata (ad esempio la focale dell'obiettivo), dal tipo di ripresa (verticale, obliqua, panoramica) e dalla distanza di ripresa che nelle foto aeree coincide con la quota relativa di volo.

Foto Verticali

Si può assumere praticamente costante il rapporto di scala su tutta la fotografia, essendo l'asse ottico perpendicolare al piano di ripresa. Esistono metodi diversi per la determinazione della scala; a tal proposito si riportano alcune delle relazioni principali delle fotografie verticali.



dove:

d' = lato fotogramma;

d = campo abbracciato sul terreno;

c_k = distanza focale dell'obiettivo;

h_g = quota relativa di ripresa.

Dalla similitudine tra triangoli e dalla relazione $\frac{d'}{d} = \frac{c_k}{h_g}$ si può ricavare la quota di

volo necessaria ad ottenere un determinato campo abbracciato al suolo (e viceversa), una volta che si siano fissati il valore della focale o del formato del fotogramma.

Per ottenere la misura orizzontale reale di un oggetto che compare in una fotografia se ne misura la dimensione sulla foto utilizzando ad esempio la lente micrometrica e si divide il valore ottenuto per la scala della fotografia.

Per determinare la scala di una foto verticale esistono diversi metodi:

rapporto focale – quota relativa

$$S_f = \frac{c_k}{h_g}$$

confronto con un oggetto noto di cui siano note le dimensioni reali

$$S_f = \frac{s'}{s}$$

dove s' è la distanza misurata sulla foto ed s è la distanza reale nota

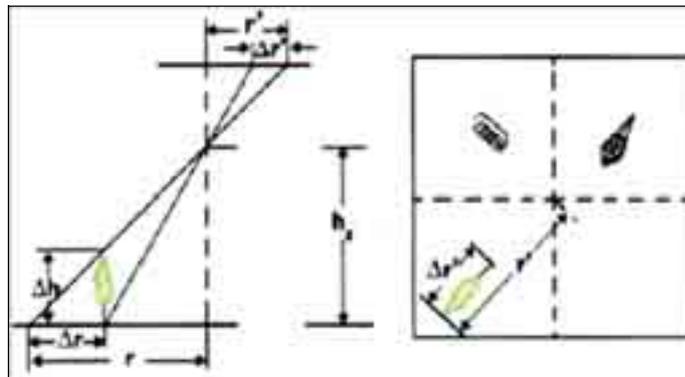
confronto carta-foto

$$S_f = \frac{s'}{s_c \cdot DS_c}$$

dove s' è la distanza misurata sulla foto, s_c è la distanza sulla carta e DS_c è il denominatore di scala della carta.

E' inoltre possibile determinare l'**altezza degli oggetti** rappresentati facendo uso di vari metodi tra i quali:

Metodo dello spostamento radiale



dove:

r' = distanza dal centro della foto alla sommità dell'oggetto;

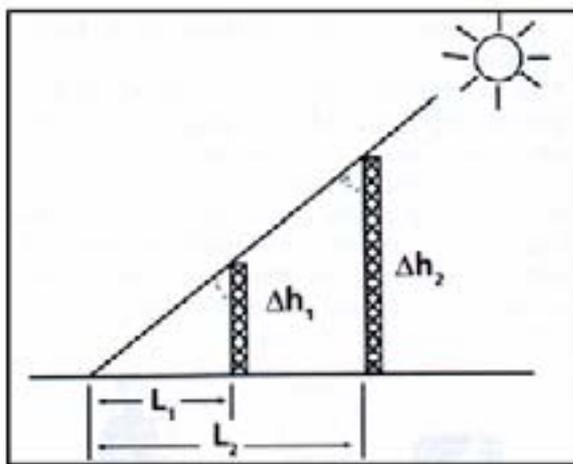
$\Delta r'$ = abbattimento radiale;

h_g = quota di volo;

Δh = altezza incognita

$$\Delta h = \frac{\Delta r'}{r'} \cdot h_g$$

Comparazione delle ombre (con l'ombra di un oggetto di altezza nota)



dove:

Δh_1 = altezza nota;

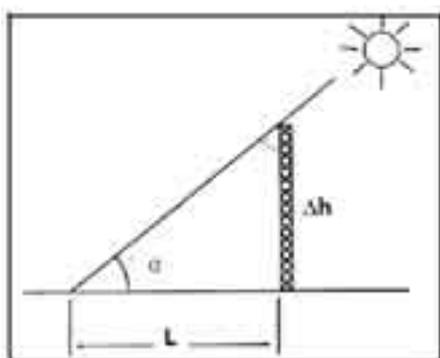
Δh_2 = altezza incognita;

L_1, L_2 = lunghezza delle ombre sulla foto

$$\Delta h = \frac{L_2}{L_1} \cdot \Delta h_1$$

Metodo del fattore ombra

Nota il valore dell'angolo α determinato dall'altezza del sole (ricavabile nota la latitudine e l'ora) e indicando con L la lunghezza dell'ombra sulla foto si ricava l'altezza incognita dalla relazione:



$$\Delta h = \frac{L \cdot \tan \alpha}{S_f}$$

Anche sulle fotografie oblique e panoramiche sono possibili misurazioni di distanze e di altezze anche se le operazioni risultano un po' più complicate, data la particolare tipologia delle macchine da presa utilizzate e la loro posizione rispetto al velivolo e alla direzione di volo.

Ad esempio su una **obliqua** è intuitivo capire che il rapporto di scala (praticamente costante su una verticale) è continuamente variabile e diminuisce quando ci si allontana dal punto principale della foto e si procede verso la parte più alta del fotogramma.

Da notare il fatto che gli oggetti vengono rappresentati in prospettiva e questo equivale a affermare che le linee di fuga (lungo le quali convergono all'orizzonte tutti gli elementi tra loro paralleli) sono ancora delle rette.

E' ancora possibile effettuare misure precise di distanze e di altezze ricorrendo all'uso di alcune nozioni di trigonometria per la risoluzione di triangoli.

I metodi usati per l'effettuazione di misure su foto oblique prendono il nome di:

- **metodo grafico** (il meno preciso ma il più veloce)
- **metodo analitico** (il più preciso)
- **metodo Alderton** (da buoni risultati a patto che sia nota con estrema precisione la velocità al suolo del velivolo)

Le fotografie **panoramiche** hanno il pregio di ricoprire e quindi di rappresentare con una sola strisciata fotografica grandi porzioni di territorio, a questo pregio corrisponde però una mancanza di familiarità con l'immagine rappresentata che risulta quindi meno facilmente interpretabile, infatti, i segmenti tra loro paralleli nella realtà, seguono, sulla foto, delle vie di fuga non più rettilinee ma assimilabili ad archi di parabola.

Si possono effettuare misure di distanze con buona precisione ma risulta praticamente impossibile misurare correttamente le altezze ed esistono due metodi di misurazione:

- **il metodo analitico** è il più preciso perché permette una risoluzione rigorosa della geometria dell'immagine facendo ricorso all'uso di alcune relazioni trigonometriche per le quali si rimanda ai testi di riferimento
- **il metodo grafico** grazie all'uso di un reticolato panoramico sul quale sono contrassegnati una serie di intervalli si possono effettuare operazioni di misura in modo rapido e discretamente preciso.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- **DERMANIS A., BIAGI L.**, Telerilevamento, informazione territoriale mediante immagini da satellite, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2002, pp. 279.
- **FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F.**, *Measuring subsidence with SAR interferometry applications of the permanent scatterers technique*, Natural Hazards Workshop, Igls, AUSTRIA, June 2000, pp. 81-90.
- **FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F.**: *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, N. 1, 2001, pp.8-20
- **GALATI G. E GILARDINI A.**, *Tecniche e strumenti per il telerilevamento ambientale*, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Monografie Scientifiche, 2001, pp. 300.
- **GOMARASCA M. A.**, *Elementi di Geomatica*, AIT – Associazione Italiana di Telerilevamento, pp.660.
- **PRATI C.**, *Fondamenti di Telerilevamento*, Politecnico di Milano, Milano, pp 69.
- **ROCCA F., COLESANTI C., FERRETTI A., RATTI R.**, *T.R.E.: una spin- off Universitaria per l'elaborazione di dati radar satellitari*, MONDODIGITALE, N. 4, 2002.
- **SCHIAVON G.**, *Dispense del Corso di Telerilevamento e Diagnostica Elettromagnetica I*, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Roma, 2003.

PARTE SECONDA

ANALISI TERRITORIALE

1.1 Aspetti fisico - geografici

1.1.1 Inquadramento geografico areale

Il *paesaggio fisico del Lazio*¹³ si presenta morfologicamente estremamente vario e complesso. Al suo interno, si alternano, infatti, vulcani, rilievi e catene montuose, colline, laghi ed ampie valli fluviali che si sviluppano a partire dalle zone più interne dell'*Appennino* fino alla lunga fascia litoranea tirrenica.

Tale varietà morfologica è il frutto di diverse e complesse vicende geologiche le quali hanno interessato questa particolare regione a partire dal *Mesozoico* (248 - 65 milioni di anni fa), energie tettoniche che si manifestano tuttora nella nostra era.

I processi interni alla *Litosfera*, responsabili dell'emersione e del sollevamento recente appenninico e parimenti dell'attività vulcanica *Pleistocenica*, hanno disegnato l'attuale ossatura generale del *rilievo laziale*, dando vita alle strutture morfologiche fondamentali che caratterizzano il paesaggio fisico stesso della regione.

Su queste morfologie hanno agito e, come accennato, continuano tuttora ad agire, le azioni modellatrici esogene degli agenti atmosferici, dello scorrimento delle acque superficiali, delle forze esercitate dal mare e dai ghiacci.

Tali azioni hanno più volte agito sul rilievo originario con una triplice attività di erosione, trasporto e sedimentazione.

Il continuo e costante modellamento fisico ha prodotto una serie di *morfortipi*¹⁴ i quali in particolar modo definiscono *aspetti regionali peculiari e caratteristici in funzione della particolare natura litologica e del grado di tettonizzazione delle stesse rocce affioranti*¹⁵.

¹³ Le informazioni geomorfologiche, geologiche, generali dell'area sono state estratte per la loro esauriente trattazione da:

AA.VV., *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, a cura della Società Geologica Italiana, BE-MA Editrice, Roma, 1998, pp. 377.

¹⁴ Un *morfortipo* rappresenta le forme principali del terreno all'interno delle quali è ubicata una unità topografica. Da: PRATURLON A., *Breve storia delle ricerche geologiche* in AA.VV., *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, op. cit., cfr. pp. 12 -14.

¹⁵ Un accurato lavoro sulla stessa area di indagine è stato recentemente svolto da:

LA PIETRA F., *Il Comprensorio delle Acque Albule: tra Pericolosità ed Emergenza*, Tesi di Laurea in Gestione e Valorizzazione del Territorio, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, pp. 162, cfr. pag. 10.

Così, ad esempio, nelle aree ove emergono i *calcari* (intensamente tettonizzati), afferenti alla cosiddetta *serie laziale-abruzzese*¹⁶, si sono sviluppate forme di modellamento carsico talvolta anche molto accentuato.

Nei territori di affioramento dei litotipi della *serie umbro-marchigiano-sabina*¹⁷, rappresentati da *calcari*, da *calcari marnosi* e *marne*, le forme carsiche, seppur considerevolmente presenti, non sono altrettanto diffuse come quelle invece impostate nelle aree di cui sopra.

Nella *serie umbro-marchigiano-sabina*¹⁸ assumono un ruolo di primo piano tutte quelle forme di modellamento dovute soprattutto all'azione delle acque correnti superficiali. Queste morfologie, infatti, sono particolarmente prevalenti ed evidenti proprio nelle aree di affioramento dei *litotipi vulcanici di deposizione*.

Si registrano, peraltro, evidenti aspetti di intenso processo erosivo in corrispondenza dei *rilievi argillosi pliocenici* (di solito sottostanti) ove possono essere riconosciute *morfologie di tipo calanchivo* che determinano un caratteristico, pittoresco paesaggio geografico come, ad esempio, quello osservabile nel comprensorio settentrionale di *Civita di Bagnoregio* (VT).

L'intensità e la varietà delle forme di modellamento operate dagli agenti esogeni è stata fortemente influenzata dalle ampie oscillazioni climatiche che hanno caratterizzato l'*Era Quaternaria*, con alternanza di periodi freddi, *glaciali* e periodi temperato-caldi, *interglaciali*¹⁹.

Durante queste fasi fredde, alcuni dei rilievi più elevati sono stati ricoperti e modellati dall'azione abrasiva dei ghiacci.

Contemporaneamente, le conseguenti oscillazioni del livello marino si sono spinte fino ad un abbassamento di circa 120 m rispetto a quello attuale, favorendo così, almeno nelle

¹⁶ Essi sono espressione della successione della *piattaforma carbonatica mesozoica*.

¹⁷ Successioni pelagiche meso-cenozoiche del *bacino umbro-marchigiano-sabino*.

¹⁸ Successione calcarea di ambiente costantemente pelagico tra le più continue al mondo; per questo è ben conosciuta, è stata, ed è, oggetto di numerosi studi geologici interdisciplinari. La successione Umbro - Marchigiana, oltre ad avere un'ottima bio e cronostratigrafia, è rappresentata da una litologia molto caratteristica contenente numerosi marker litologici, come ad esempio i "Livelli Anossici". Questi livelli, oltre ad avere un'ottima correlabilità regionale, permettono la correlazione con eventi paleoceanografici globali.

¹⁹ Lungo periodo di abbassamento della temperatura del clima terrestre, che ha comportato una espansione delle calotte glaciali in direzione dell'equatore. Durante gli ultimi milioni di anni si sono cronologicamente alternati diversi periodi glaciali. I periodi più antichi hanno avuto una frequenza ciclica di circa 40.000 anni, i più recenti di circa 100.000 anni.

Vengono definiti come *periodi interglaciali* quelle fasi della storia climatica del pianeta in cui le aree ricoperte dai ghiacci sono state analoghe o inferiori a quelle attuali.

zone più prossime all'area costiera, la classica vasta azione di configurazione morfologica areale esercitata dallo scorrimento finale delle acque verso mare.

Nei periodi *temperato-caldi*, ed in particolar modo negli ultimi 10.000 anni e cioè dalla fine della *ultima fase glaciale*, i rilievi più elevati laziali sono stati modellati dall'energia delle acque di scorrimento superficiale.

Parimenti, il sollevamento del livello marino per cause eustatiche ha provocato il sovralluvionamento delle valli fluviali incise nelle fasi fredde, condizionando l'intera evoluzione morfologica delle zone litoranee.

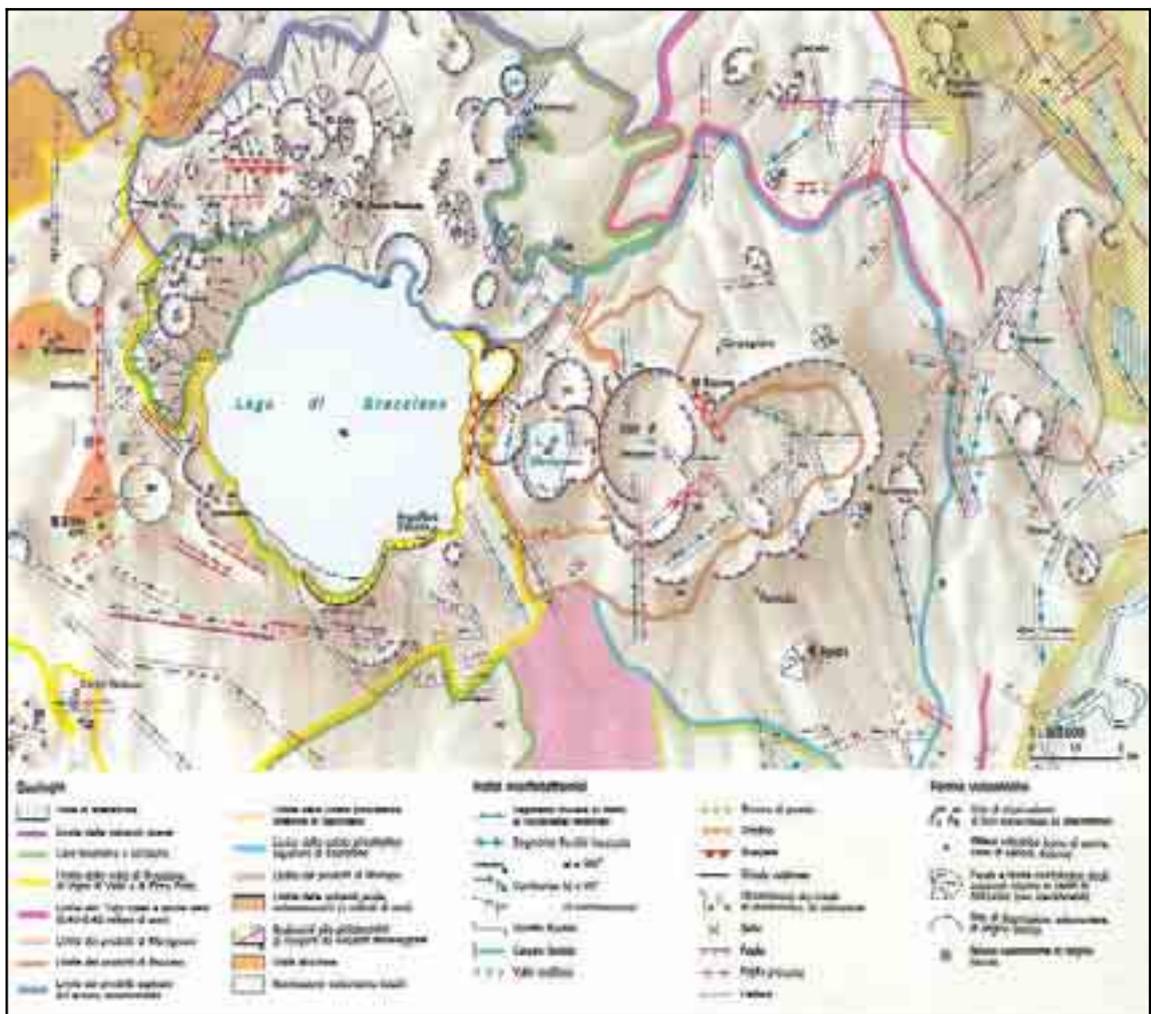


Figura 31: Forme vulcaniche e morfotettonica dei Monti Sabatini (estratto da: FREDI P, *Edifici vulcanici estinti del Lazio*, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dipartimento delle Scienze della Terra, in *Morfologia Vulcanica*, cfr. pag. 341).

A titolo di esempio di un tipico paesaggio laziale, sono riportate in **Figura 31** le forme vulcaniche e morfotettoniche dei *Monti Sabatini*.

L'esame dei tematismi evidenzia caratteristiche morfologiche strettamente dipendenti non soltanto dai prodotti messi in posto dalla attività vulcanica ma anche da tutti quelle evidenze legate alla *tettonica* come testimoniano i numerosi indizi che lasciano presumere l'esistenza di un suo controllo diretto.

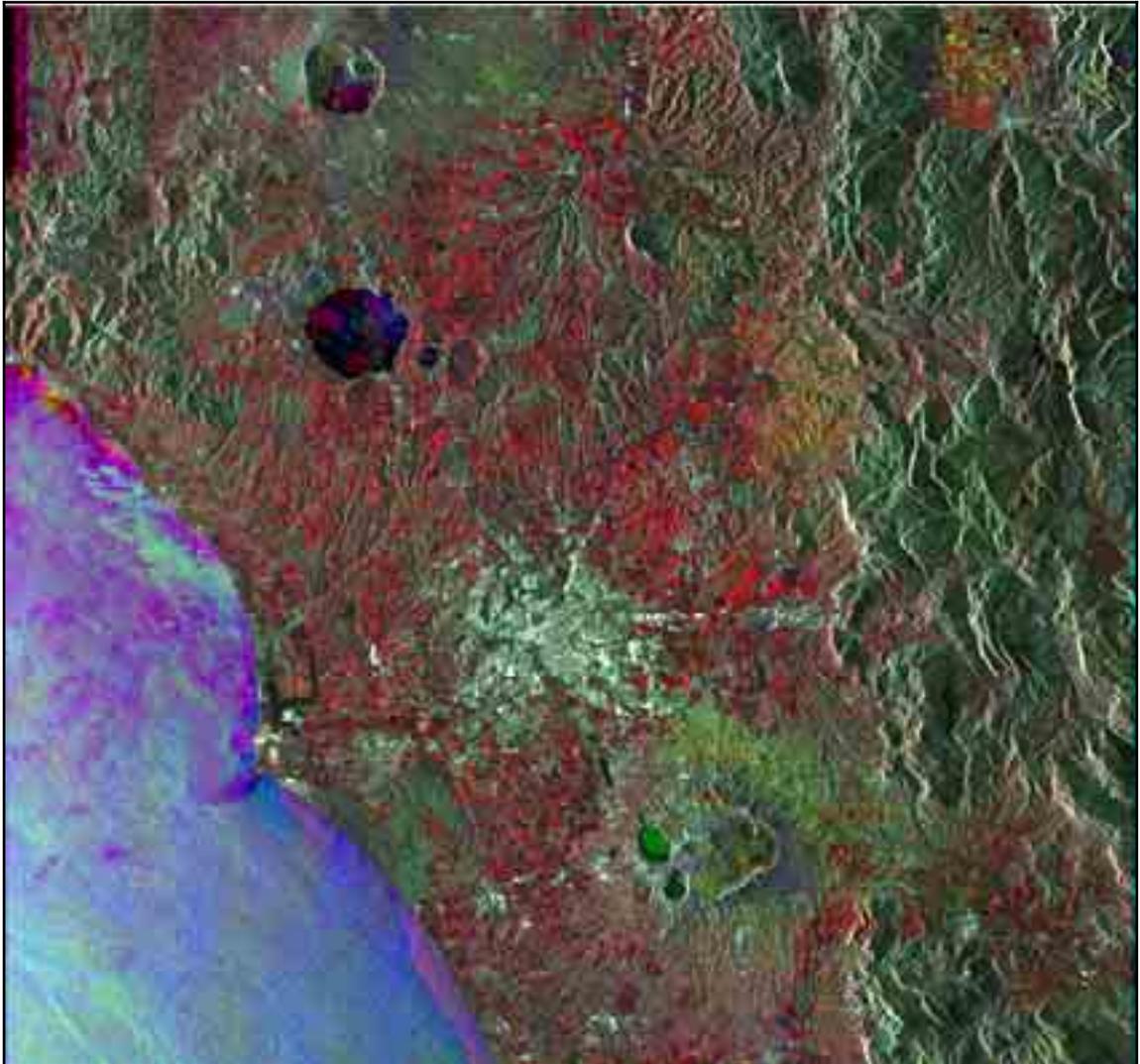


Figura 32: Immagine multitemporale SAR (ripresa dai sensori a bordo dei satelliti ERS1 ed ERS2) rappresentante una porzione di territorio afferente alla Regione Lazio. ESA ESRIN - European Space Agency – Per gentile concessione.

Nella immagine da satellite del territorio laziale (**Figura 32**) appaiono evidenti quelle forme primarie del rilievo la cui origine è strettamente legata all'azione delle forze endogene. Trattasi di forme tettonico-strutturali dovute alle deformazioni della crosta terrestre e che costituiscono vere e proprie strutture geomorfologiche.

E' osservabile nell'area centrale, a partire dalla zona litoranea e con andamento NW-SE, la presenza di un guidato allineamento dei grandi distretti vulcanici pleistocenici.

Tale allineamento si estende poderosamente lungo tutto l'arco tirrenico ed è evidente proprio nel Lazio, in particolare con gli apparati *Vulsino*, *Cimino-Vicano*, *Tolfetano*, *Cerite-Manziale*, *Sabatino* ed *Albano*.

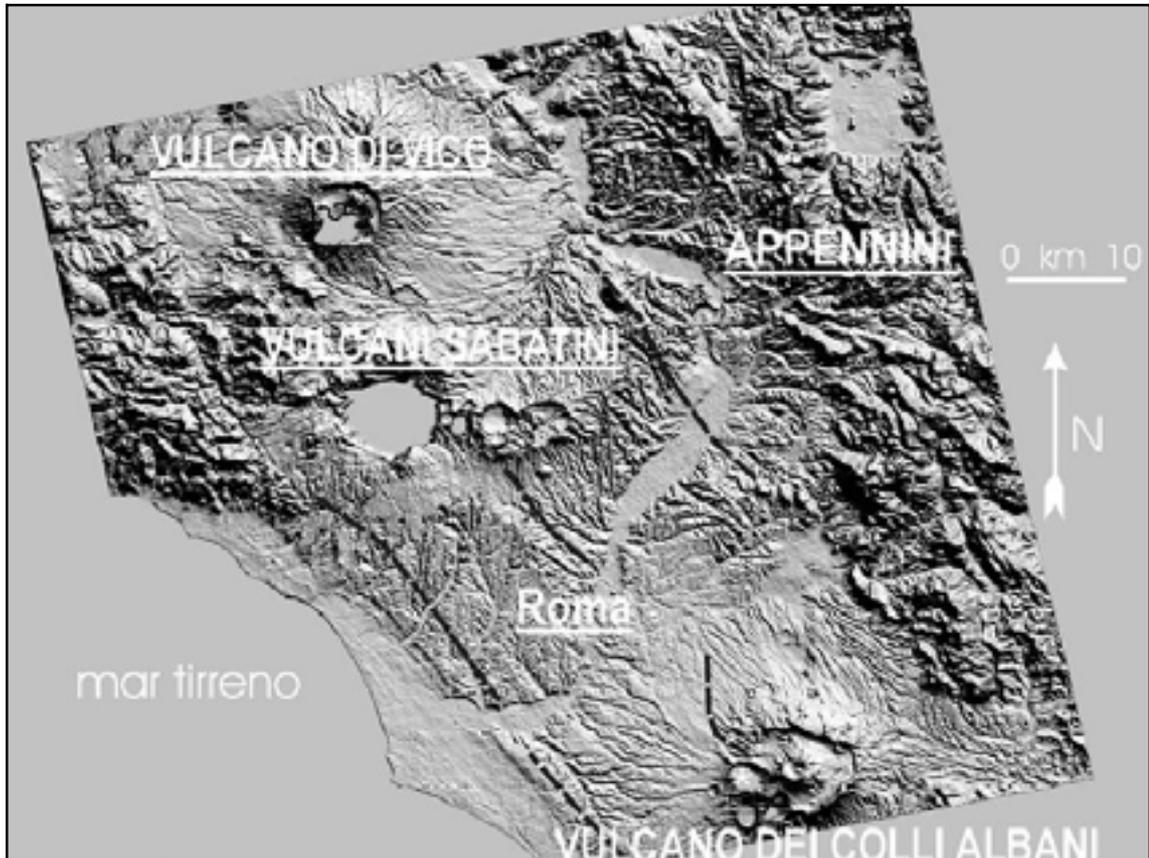


Figura 33: Modello Digitale del Terreno (DTM) dell'area laziale.

Estratto da: AA. VV., *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, Rend. Fis. Accademia dei Lincei, S. 9, V. 13, Roma, 2002, pp. 113-143, cfr. pag. 115, nota di Renato Funicello, Guido Giordano, Donatella De Rita, Maria Luisa Carapezza e Franco Barberi, presentata dal Socio F. Barberi.

Gran parte di questi complessi vulcanici (**Figura 33**) presentano nelle loro porzioni centrali conche calderiche lacustri più o meno ampie di natura *coalescente* per la presenza congiunta di più crateri (*maar*), come nel caso specifico delle morfologie dei laghi di *Vico*, di *Martignano*, di *Albano* e di *Nemi*, oppure di quelle di origine strettamente *vulcano-tettonica*, come nel caso della grande depressione di *Bracciano*.

Più a S, oltre il delta del *Fiume Tevere*, la fascia costiera è rappresentata dall'ampia *Pianura Pontina*, l'area più depressa dal punto di vista morfologico-strutturale dell'intero Lazio.

Essa è stata sommersa a più riprese dalle variazioni del livello marino avvenute durante il *Pliocene* ed il *Quaternario*, tanto che il rilievo isolato del promontorio del *Circeo*, che dalla piana si erge in direzione **W**, si è più volte espresso sia come morfologia insulare che peninsulare.

Ad oriente della Pianura Pontina, fra loro parallele e protese in direzione **NW-SE**, si individuano nettamente le *dorsali calcaree* dei *Monti Lepini*, dei *Monti Ausoni* e dei *Monti Aurunci* e quelle interne dei *Monti Simbruini*, dei *Monti Cantari* e dei *Monti Ernici*.

Esse sono separate tra loro dall'ampia *Valle Latina*.

Tutti questi rilievi carbonatici rappresentano le morfologie residuali odierne dell'antica *piattaforma carbonatica laziale-abruzzese*.

Tali catene montuose sono spesso limitate verso **W** da brusche *scarpate di faglia* e mostrano incisioni vallive sia longitudinali che trasversali rispetto alle strutture geologiche, morfologie impostate sulle linee tettoniche ad andamento appenninico e antiappenninico.

Ne sono esempio l'Alta la Valle del *Fiume Aniene*, nel tratto compreso tra il Comune di *Jenne* ed il Comune di *Subiaco*, la Valle del suo affluente *Fiume Simbrivio* e la Valle di *Carpineto Romano*.

Morfologicamente ben individuata ed individuabile appare anche la linea *Olevano-Antrodoco*, una delle dislocazioni tettoniche più vistose dell'Appennino centrale dove, per gran parte del suo andamento, essa svolge funzione separatoria tra la *facies laziale-abruzzese* e la *facies sabina*.

La regione vulcanica dei *Colli Albani* comprende un'area di circa 1500 km².

Il suo territorio è alquanto esteso ed è messo in evidenza dalle litologie presenti a **S** di Roma, a partire dalla riva sinistra del *Fiume Tevere* e del suo affluente *Fiume Aniene*, fino a raggiungere le propaggini settentrionali della *Pianura Pontina* e le pendici del massiccio calcareo dei *Monti Prenestini*.

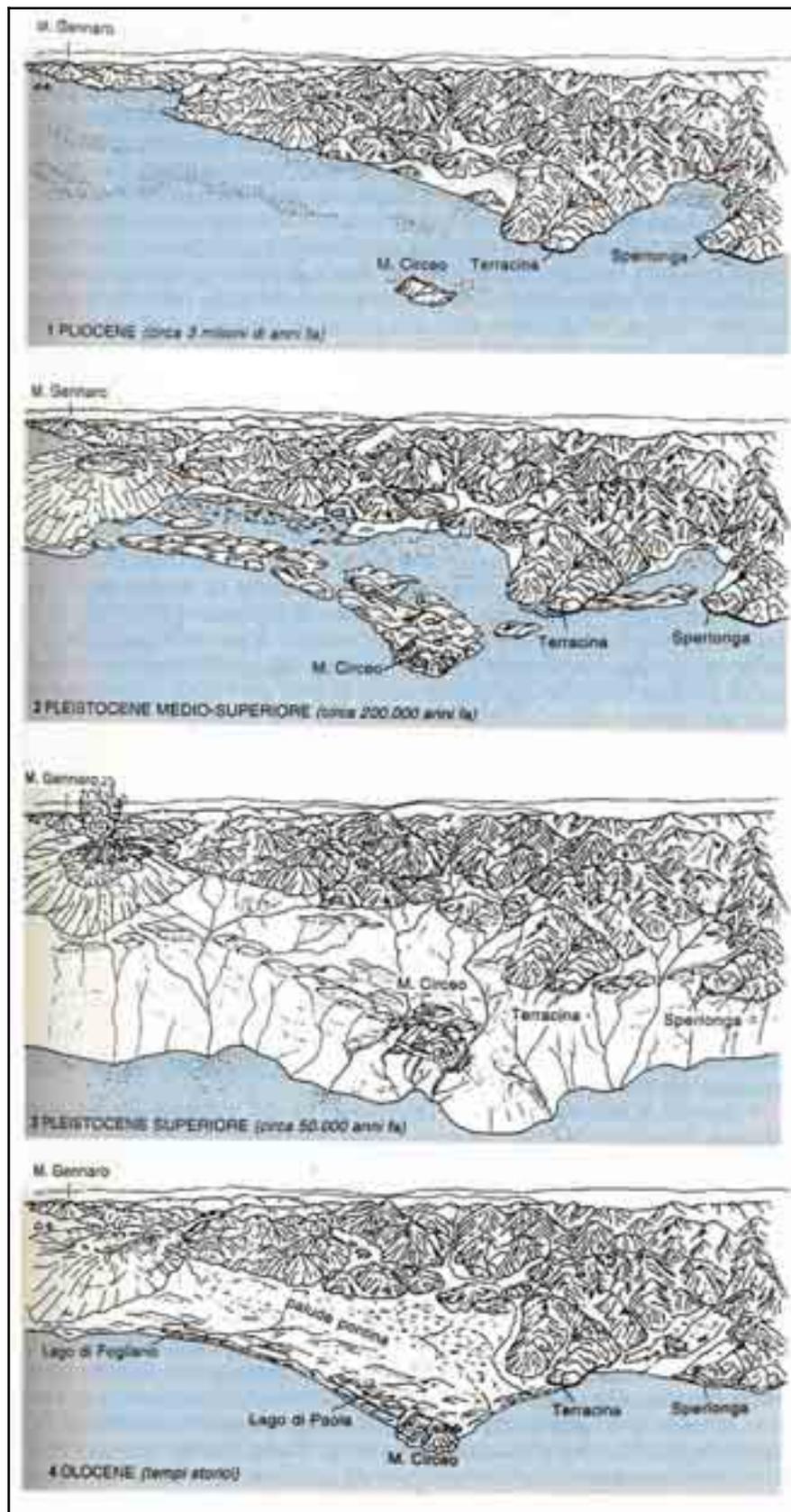


Figura 34: Schema dell'evoluzione geomorfologica dell'Area Pontina (ricostruzione di MARIOTTI G.). Estratto da: AA.VV., *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, a cura della Società Geologica Italiana, BE-MA, Roma, 1998, pp. 377, cfr. pag. 67.

In **Figura 34** è evidenziato uno schema semplificato di evoluzione geomorfologica dell'*Area Pontina* da cui è possibile estrarre alcune considerazioni:

1. al passaggio tra *Pliocene superiore* ed il *Pleistocene*, la linea di riva giungeva a lambire i rilievi carbonatici dei *Monti Lepini* ed *Ausoni* i quali erano ancora in fase di sollevamento;
2. il *Monte Circeo* costituiva un'isola separata dalla terraferma da un ampio tratto di mare;
3. durante la fase del *Pleistocene medio-superiore*, l'apporto di sedimenti ad opera dei corsi d'acqua che sfociavano in mare, e soprattutto l'apporto di materiali clastici legato all'entrata in attività dell'apparato vulcanico dei *Colli Albani*, determinarono un primo parziale colmamento del bacino marino e la formazione di una serie di cordoni litoranei (*duna rossa antica*) che dall'area vulcanica si estendevano a S fino al *Circeo*, originando bacini lagunari i quali andavano interrandosi;
4. durante il *Pleistocene superiore*, l'*abbassamento eustatico* del livello marino, conseguente all'instaurarsi di fasi climatiche fredde proprie di questo periodo, portò ad un avanzamento della linea di costa valutabile in diverse decine di Km, fino circa all'attuale profondità marina segnata dall'isobata 120 m; la *Pianura Pontina* si trasformò in una vera e propria *grande palude* con alcuni importanti corsi d'acqua i quali raggiungevano il mare formando per incisione ampie valli;
5. durante l'*Olocene*, con l'innalzamento del livello delle acque marine, avvenuto quindi circa 10.000 anni fa, alla fine della *fase glaciale würmiana*, la linea di riva regredi assumendo un andamento articolato simile all'attuale ed occupando le precedenti incise valli fluviali;
6. la deposizione di nuovi cordoni litoranei portò alla formazione di una nuova linea di riva di tipo più rettilineo, con la creazione per isolamento dei laghi costieri di *Fogliano*, di *Monaci*, di *Caprolace* e quello più grande di *Paola*.

Il vulcanismo del *Lazio*, nella interpretazione geomorfologica del *Comprensorio delle Acque Albule*, assume quindi un ruolo di notevole importanza.

Sviluppatesi a partire dalla fine del *Pliocene*, la *provincia vulcanica tosco-laziale*, impostatesi in una fascia strutturalmente depressa parallela alla costa tirrenica (il cosiddetto *graben principale*); risulta compresa tra il settore piú elevato della catena appenninica e le zone costiere, al margine dell'ampio bacino del *Mar Tirreno*, caratterizzato da una crosta di tipo oceanico di *età pliocenica*.

I confini areali dell'*apparato vulcanico dei Colli Albani* sono costituiti:

- a NW dall'*apparato Sabatino*;
- a E-SE dalle formazioni sedimentarie meso-cenozoiche dell'Appennino centrale (*Monti Lepini, Monti Prenestini e Monti Tiburtini*);
- a S dalla *Pianura Pontina*;
- a W dal *Mar Tirreno*.



Figura 35: Rappresentazione grafica dei *Distretti vulcanici laziali*.

Estratto da: http://www.musmin.geo.uniroma1.it/sito_ita/area-pink/lazio/, consultato in data 08 gennaio 2006.

Le rocce vulcaniche della *provincia tosco-laziale* possono essere raggruppate in diverse serie comprendenti rocce a *chimismo acido* e rocce a *chimismo potassico*.

Al primo gruppo appartengono rocce di natura ibrida con componenti di origine sia crostale che direttamente provenienti dal *mantello*.

Al secondo gruppo appartengono, invece, rocce ad alto contenuto in potassio (*K*), cioè a composizione intermedia tra quelle di tipo *lamproitico*²⁰ e quelle di tipo *potassico*.

La natura ibrida delle rocce a *chimismo acido* viene generalmente imputata a processi di fusione crostale dovuti alla risalita di fusi dal *mantello* i quali sono considerati responsabili dell'*anatessi*²¹ e che si sono mescolati con i fusi acidi derivanti dal processo di *anatessi* stessa. I *fluidi magmatici* della *serie potassica* e di quelli specifici ad alto contenuto in potassio sono considerati invece aventi origine direttamente dal *mantello* e possono aver subito evoluzioni connesse all'*assimilazione* e alla *differenziazione* durante il loro *processo di risalita*.

La natura dei processi *petrologici* che hanno determinato la formazione di questi fluidi, cioè le condizioni geodinamiche di sviluppo areale del vulcanismo, è ancora oggetto di ampio dibattito e di ricerche tra i geologi.

Il processo di *rifting*²², responsabile dello stesso vulcanismo, potrebbe essere dovuto o ad una cosiddetta *causa esterna* direttamente connessa ai movimenti di *convergenza* e/o *trascorrenza* della *Placca africana* su quella *europea* oppure ad una cosiddetta *causa interna* correlata alla formazione di *diapiri astenosferici*²³ la cui risalita provocherebbe fenomeni di sollevamento regionale e di distensione crostale (ELTER et AL., 1975; WEZEL, 1982; LOCARDI, 1985).

²⁰ AA.VV., *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, op. cit., cfr. pag.50.

Le *rocce lamproitiche* derivano da fusione precedentemente contaminata ed arricchita da sedimenti terrigeni i quali hanno subito un processo di subduzione.

²¹ L'*anatessi* è il processo di fusione che porta alla formazione di rocce a composizione granitica partendo da rocce di varia natura.

²² Le zone di *rifting* sono quelle aree dove la litosfera si separa in due placche che si allontanano l'una dall'altra. Lo stadio di *rifting continentale* è molto lento e può durare lunghi periodi (30÷50 *Ma* o più) con tassi di estensione orizzontale molto lenti, dell'ordine di 0,1÷0,3 *mm/a*.

Il processo estensionale, o *rifting*, prevede un'iniziale allungamento ed appiattimento della *litosfera continentale*. Questo processo può venire quantificato dividendo l'iniziale spessore della litosfera per lo spessore finale dell'assottigliamento, rapporto che viene chiamato *fattore b* (MC KENZIE, 1978).

²³ Il magma in risalita forma *diapiri* i quali, in prossimità della superficie, danno origine a camere magmatiche. L'assottigliamento della Crosta è dovuto alla deformazione ad opera del *mantello* (con *risalita diapirica* della *astenosfera*). Tale fenomeno sembra impostarsi a circa 15-20 *km* sotto la Toscana ed il Lazio nonché sotto il Mar Tirreno centro-meridionale con presenza di forti anomalie in flussi di calore.

Nel quadro di un *rifting* dovuto ad una *causa esterna*, quest'ultima potrebbe essere connessa alla rotazione antioraria della penisola italiana indotta dalla spinta verso NE della stessa *Placca africana*, energia trasmessa alla *Placca adriatica* attraverso lo *slab litosferico* subdotto sotto l'arco calabro (MANTOVANI, 1982; MANTOVANI et AL. 1985; LA VECCHIA, 1988).

Si ipotizza anche l'esistenza di un sistema di compressione instauratosi tra i Continenti *Africa* ed *Europa*, orientato grosso modo con direzione NS e limitato da un *sistema di trascorrenze* aventi direzione EW, sistema il quale indurrebbe conseguenti movimenti di *risalita astenosferica* (BOCCALETTI et AL., 1984, 1990).

A sostegno di queste innovative ipotesi, i citati *Autori*, i quali a supporto di questa linea di pensiero invocano evidenze di tipo geodinamico e magmatologico, da un lato affermano che lo stesso margine orientale del Mar Tirreno è interessato da un'intensa *tettonica distensiva* con meccanismi molto simili a quelli che interessano aree soggette a *rifting*, dall'altro sostengono che proprio la venuta a giorno dei nominati magmi *lamproitico* e *kamafugitici* o *carbonatitici* (STOPPA, LUPINI, 1991) esprimano una specifica tipicità di queste ambientazioni geodinamiche.

Un'altra linea di pensiero, invece, ritiene che le anomalie chimiche del *mantello subappenninico* registrate siano il prodotto del trasporto in profondità di materiale crostale superficiale, attraverso specifici meccanismi di *subduzione*²⁴.

La maggior parte degli *Autori* che fanno riferimento a questa linea di pensiero ritengono che la distensione stessa dell'area tirrenica sia da inserirsi in un quadro geodinamico del tipo *arco-fossa-bacino di retroarco*, legato quest'ultimo alla *subduzione litosferica* al di sotto dell'*arco calabro* (KASTENS et AL., 1986; 1988; MALINVERNO, RYAN, 1986; FINETTI e DEL BEN, 1986; PATACCA, SCANDONE, 1989; SERRI et AL., 1991).

²⁴ La *subduzione*, è un fenomeno geologico che ha un ruolo chiave nella teoria della tettonica delle placche. Per *subduzione* si intende lo scorrimento di una *placca litosferica* sotto un'altra ed il suo conseguente riassorbimento nell'*astenosfera*. In concomitanza alla produzione di nuova crosta oceanica nelle dorsali medio-oceaniche, la quale tenderebbe a far aumentare la superficie complessiva delle placche stesse. Sui *margini convergenti* la crosta oceanica viene distrutta proprio attraverso tale *meccanismo subduttivo*. Nelle aree soggette a tale particolare fenomeno, si trovano quasi sempre *fosse oceaniche* ed *archi vulcanici*. Questi ultimi sono prodotti dal surriscaldamento generato dalla *subduzione* la quale provoca la fusione parziale della litosfera e la formazione di camere magmatiche. Un esempio significativo di *zona di subduzione* è dato dalla costa occidentale del Sud America, al largo della quale si trova una profonda *fossa oceanica* mentre sulla terraferma si sviluppa una catena di poderosi edifici vulcanici.

I *Ricercatori* sostenitori di queste linea di pensiero fondano principalmente le loro ipotesi su argomentazioni di natura *geochimica*.

Nella *regione vulcanica laziale* la dinamica tettonica ha originato una serie di *distretti* a prevalente attività di tipo esplosivo subaereo i quali si alternano con strutture ora centrali, ora diffuse arealmente.

Infatti, è possibile ulteriormente individuare da N il *Distretto Vulcano*, quello *Cimino-Vicano*, quello *Sabatino* con associato il *Distretto Tolfa Ceriti-Manziana*, ed infine il *Distretto* vulcanico dei *Colli Albani* a S di Roma a cui si associa quello delle *Isole Pontine*.

Più a S è individuabile il distretto afferente alla *Valle Latina*.

I *Distretti* vulcanici di *Tolfa*, *Ceriti-Manziana*, dei *Cimini* e delle *Isole Pontine* sono caratterizzati dalla presenza di rocce di tipo intermedio ed acide di natura ibrida, di età sicuramente più antica rispetto agli altri distretti, età compresa tra i 2 ed 1 *Ma* circa.

Questi ultimi sono infatti caratterizzati dalla presenza di rocce appartenenti alla *serie potassica* e/o ad alto contenuto in potassio la cui messa in posto è compresa tra 0.8 *Ma* e l'ultima fase di attività.

I primi distretti hanno espresso la loro attività dando origine a lave essenzialmente riconoscibili e messe in posto sotto forma di *domi lavici* o di *ignimbriti*.

Nelle isole di *Ponza* e *Palmarola* il vulcanismo si è manifestato in ambiente sottomarino evolvendo a *Ponza* in forma subaerea, comprendendo anche fenomenologie esplosive di natura specificatamente *idromagmatica*.

I distretti più giovani, con rocce della *serie potassica* e/o ad alto contenuto in potassio, mostrano anch'essi un elevato grado di esplosività, con eruzioni di tipo prevalente a *colata piroclastica*, prodotti di ricaduta ed *idromagmatiti*, essendo la fuoriuscita di fusi lavici decisamente subordinata.

Appare chiaro che il manifestarsi dell'attività che ha caratterizzato temporalmente i fenomeni afferenti al ***Distretto del Vulcano Laziale*** (i *Colli Albani*) abbia, in modo diretto od indiretto, inevitabilmente influenzato la genesi del territorio ove attualmente ancora si manifesta l'importante fenomeno idrotermale delle *Acque Albule*, oggetto della presente indagine areale.

Il *Vulcano Laziale* è dunque il più meridionale dei distretti vulcanici a *struttura centrale* presenti nella regione Lazio.

Esso occupa una posizione particolarmente significativa nell'ambito dell'assetto strutturale della nostra catena appenninica: sorge, infatti, a S delle unità *mesocenozoiche* alloctone dei *Monti della Tolfa*, a settentrione della piattaforma carbonatica mesozoica dei *Monti Lepini* ed in prossimità delle successioni *meso-cenozoiche* dei *Monti Prenestini* e *Tiburtini*.

Il complesso vulcanico si è sviluppato al di sopra di un substrato sedimentario costituito da unità delle *successioni pelagiche mesozoiche* con testimonianze di una transizione esterna nelle parti più meridionali (FUNICELLO, PAROTTO, 1978).

I complessi *neogenici post-orogenici* (sequenze arenacee e pelitiche) sono presenti con gli spessori maggiori nelle parti più depresse del basamento mentre presentano uno spessore molto ridotto o addirittura assente nelle aree strutturalmente rialzatesi nel Miocene.

Il *Vulcano Laziale* sembrerebbe aver iniziato la propria attività, con molta probabilità, quasi contemporaneamente agli altri citati distretti alcalino-potassici.

Infatti, la prima data radiometrica disponibile indica un'età di circa 530.000 anni e si riferisce, in particolare, alla prima grande unità esplosiva in colata piroclastica fuoriuscita e messa in posto durante il primo ciclo di attività del primordiale apparato centrale *Tuscolano-Artemisio*.

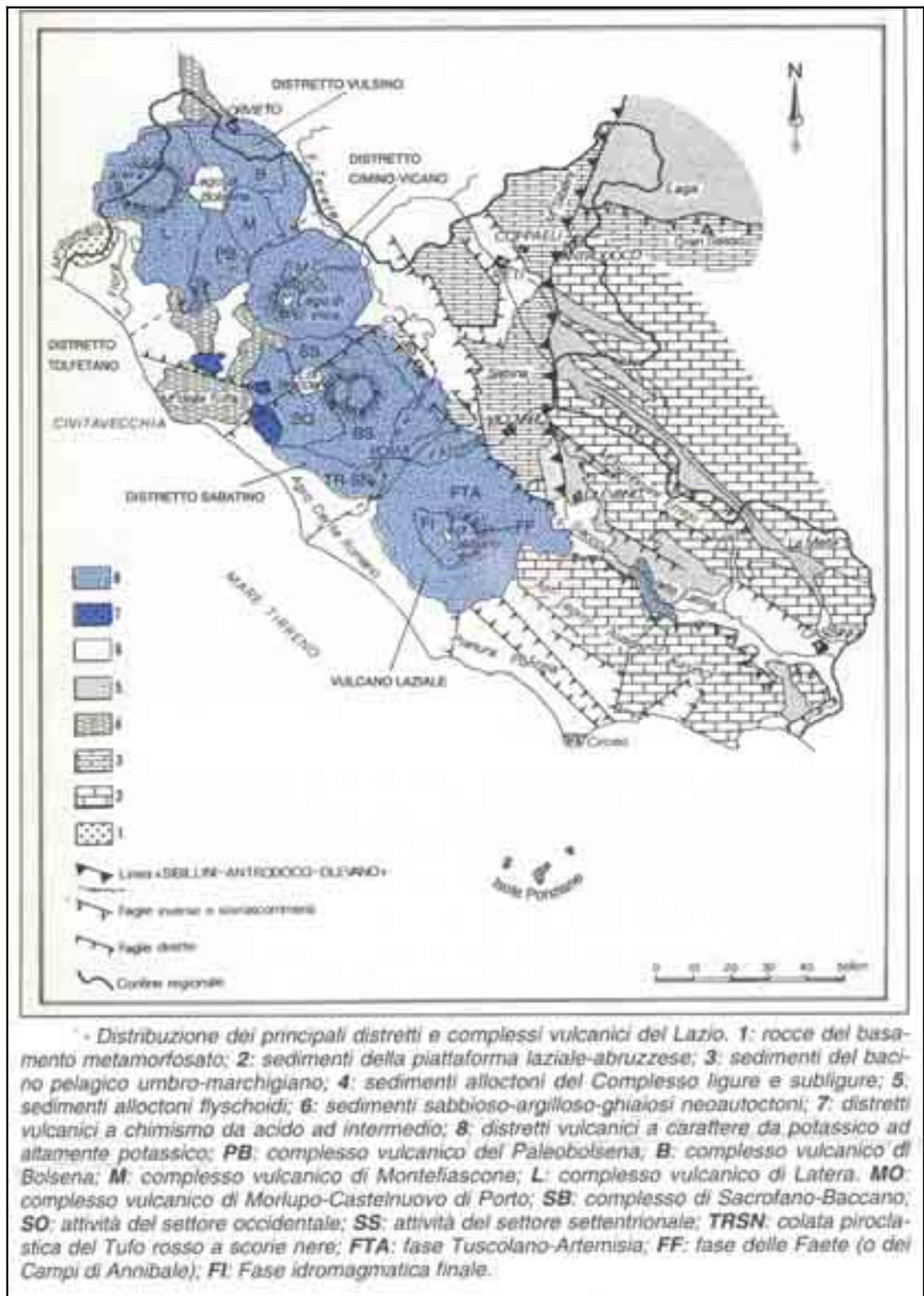


Figura 36: Estratto da: AA. VV., *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, BE-MA Editrice, Roma 1998, pp. 368, cfr. pag. 51.

Per semplicità l'attività del Vulcano Laziale viene suddivisa, come è noto, in *tre fasi principali*.

L'attività più antica è quella del *Tuscolano-Artemisio (prima fase)* ed è riferibile al periodo temporale compreso tra circa 600.000 e 360.000 anni fa.

Questa è la fase nella quale si esprime la quasi totalità dell'attività di messa in posto dei prodotti provenienti dall'area centrale dell'apparato, il cui edificio principale era rappresentato proprio dallo stesso *Tuscolano-Artemisio*.

Questa importante fase comprende almeno *4 cicli*. Ognuno di essi è caratterizzato dalla messa in posto di *colate piroclastiche*, di *piroclastiti* e di *lave* propriamente dette la cui fuoriuscita si manifesta a chiusura dell'attività eruttiva.

Durante il *primo ciclo* di questa prima fase vengono depositate arealmente almeno tre colate piroclastiche in rapida successione. Esse sono seguite da una imponente fase effusiva, concentrata nel settore sud-occidentale dell'apparato. Tale primo ciclo si è manifestato intorno ai 600.000-500.000 anni fa attestando, peraltro, una sorprendente correlazione con un corrispondente, importante fenomeno di abbassamento del livello marino (DE RITA et AL., 1991).

Il *secondo ciclo* è caratterizzato dalla eruzione più importante di tutto l'apparato.

La manifestazione vulcanica porta alla messa in posto di un'imponente colata piroclastica raggiungente circa i 90 m di spessore e distinguibile in paleomorfologie localizzate nel settore orientale del vulcano albano.

Durante questa particolare fase eruttiva si è stimato (DE RITA D. et AL., 1988) che il materiale depositato corrisponda addirittura ad un volume pari a circa 38 km³.

Si è inoltre osservato che l'unità piroclastica stessa si è arealmente depositata raggiungendo una distanza massima di circa 80 km dal centro di emissione stesso.

L'unità in parola ha raggiunto addirittura le pendici dei *Monti Tiburtini* fino alla loro quota pari a circa 400 m, superando un dislivello dal fondo valle pari ad oltre 200 m.

L'unità è conosciuta e nota come unità delle *pozzolane rosse*.

Anche il nostro *secondo ciclo* termina con un'attività effusiva e di notevole entità.

Parimenti questo periodo di attività, datato intorno ai 480.000 anni, è correlabile con una fase di abbassamento del livello del mare.

Il ciclo successivo, il *terzo ciclo*, comprende ancora un'altra eruzione che si manifesta con la messa in posto di una unità in colata piroclastica di tipo molto simile a quella precedente, ma di dimensioni notevolmente ridotte sia in estensione che in volume.

Questa unità non ha però in sovrapposizione prodotti di alcuna altra attività effusiva.

Il *quarto ciclo*, l'ultimo ciclo della prima fase, datato intorno ai 360.000 anni fa, è caratterizzato ancora da una unità in colata piroclastica comprendente la messa in posto di due unità di flusso molto note in letteratura per la loro utilizzazione come materiale da costruzione.

Le unità in parola sono rispettivamente denominate *tufo litoide* e *tufo di Villa Senni*.

Questa imponente attività eruttiva determina la fine delle manifestazioni del citato edificio *Tuscolano - Artemisio* la cui parte sommitale imploderà per gravità collassando su se stesso, secondo fratture controllate dalla descritta tettonica regionale.

L'imponente crollo sarà accompagnato da fenomeni che determineranno arealmente la formazione di centri eruttivi minori i quali daranno conseguentemente luogo ad una produzione di lapilli e scorie, all'emissione dalle fratture di collasso di scorie saldate (*spatter*²⁵ o sperone) ed alla subordinata messa in posto di effusioni laviche.

Dopo una breve stasi, l'attività dell'intera struttura vulcanica riprenderà all'interno dell'area circolare collassata (corrispondente con l'attuale grande *caldera*) nella quale e dalla quale si erigerà un nuovo apparato centrale di dimensioni ridotte.

Questa è la così detta fase dei *Campi di Annibale* o *delle Faete*.

Anche questo periodo di attività è suddivisibile in cicli.

Essi si presentano di importanza ridotta.

A tale proposito è utile sottolineare che le differenze in volume di materiale eruttato durante la fase dei *Campi di Annibale* è di soli 2 km^3 rispetto ai circa 200 km^3 eruttati, invece, durante la fase *Tuscolano- Artemisio*.

La fase dei Campi di Annibale è databile tra i 300.000 ed i 200.000 anni fa.

L'attività eruttiva del *Vulcano Laziale* si conclude, quindi, con un'ultima fase detta ***Fase idromagmatica finale***.

²⁵ Frammenti di lava fluida emessi da una bocca vulcanica e che assumono un caratteristico aspetto piatto sono detti comunemente *spatters*. L'attività di emissione prende il nome di *spattering*. Tipicamente la solidificazione dello *spatter* emesso costruisce attorno alla bocca una sorta di muro. Alle volte questi muri di *spatters* vengono invece costruiti sui due lati della frattura dove si manifesta una eruzione.

In questa distinta ultima fase si verificarono eruzioni dai numerosi crateri eccentrici formatisi nel settore nord-occidentale. Essi si presentano in sequenza da **S** verso **N**, a partire da Ariccia, Nemi ed Albano.

Gli ultimi prodotti eruttati dal cratere coalescente (*maar*) di Albano, attualmente contenente le acque dell'omonimo Lago, sembrerebbero possedere una età minore databile ad addirittura circa 20.000 anni ²⁶.

²⁶ Estratto da: AA. VV., *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, Rend. Fis. Accademia dei Lincei, S. 9, V. 13, Roma, 2002, pp. 113-143, nota di Renato Funicello, Guido Giordano, Donatella De Rita, Maria Luisa Carapezza e Franco Barberi, presentata dal Socio F. Barberi.

1.1.2 Il Bacino delle Acque Albule

Col nome **Bacino** ²⁷ *delle Acque Albule* si identifica quella porzione di territorio alla destra della bassa Valle del *Fiume Aniene*, ad **W** di *Tivoli* (RM), territorio nel quale defluiscono le acque bianche delle omonime sorgenti ipotermali.

L'area delle Acque Albule è localizzata nella porzione di territorio della provincia romana che si estende a Nord Est della capitale a pochi chilometri dal Grande Raccordo Anulare. L'area in esame, da un punto di vista amministrativo, ricade principalmente all'interno dei territori Comunali di Guidonia-Montecelio e di Tivoli.

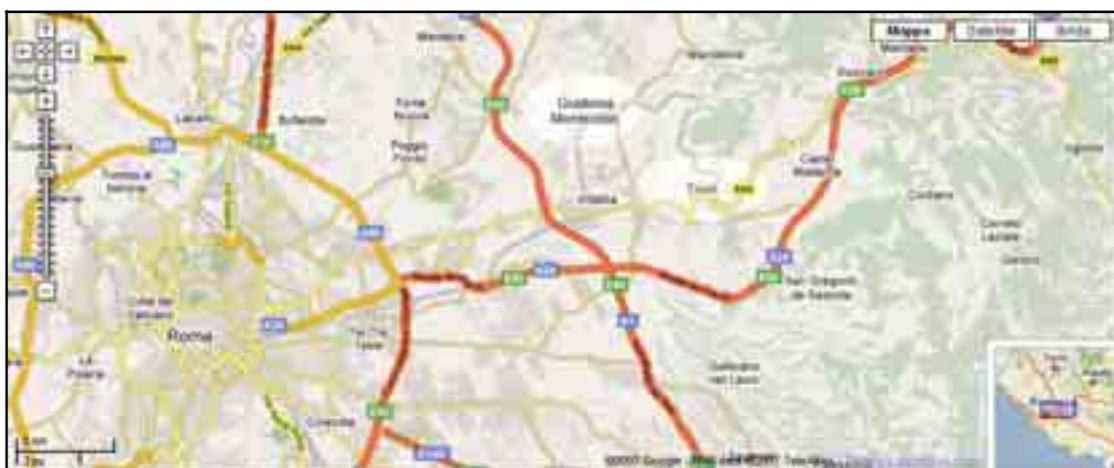


Figura 37: Ubicazione dei Comuni di Guidonia Montecelio e Tivoli (da <http://maps.google.it/> in data 4 giugno 2006, parzialmente modificata).

Tale bacino idrogeologico all'interno dell'area geografica dei depositi travertinosi quaternari tiburtini è limitata dai *Monti Lucretili e Tiburtini* ad **E**; dai *Cornicolani* a **N**; dall'arco collinare che da *Formello* (RM), passando per *Castel Arcione*, si prolunga fino ai dintorni di *Lunghezza* a **W**; dal corso dell'*Aniene* fra *Lunghezza* e *Villa Adriana* a **S**.

L'*idrostruttura* ²⁸ del bacino si presenta di forma ovale, con l'asse maggiore avente orientazione E-NE - O-SO e una lunghezza pari a circa 9 km; la sua estensione areale totale

²⁷ Area in cui si raccolgono e scorrono le acque che alimentano un corso d'acqua o un lago. Da: **CIABATTI M.**, *Elementi di idrologia superficiale*, CLUEB, Bologna, 1982, pp. 230, cfr. pag. 85.

²⁸ **Idrostruttura**: è un insieme di più unità o formazioni geologiche aventi una sostanziale unità spaziale e giaciturale, visti nel loro assetto geometrico attuale, ove si verificano le condizioni per il deflusso e l'accumulo di acque sotterranee sotto l'azione di gradienti di pressione. All'interno di una *idrostruttura* possono essere identificati uno o più sistemi acquiferi, indipendenti o interdipendenti. L'acquifero è un insieme a livello del quale i deflussi sotterranei si organizzano a costituire una unità di drenaggio che alimenta una o più sorgenti interconnesse.

è complessivamente di circa 45 km^2 e la pendenza generale va da N verso S (da 81 a 59 m s.l.m.) e da E verso W (da 73 a 30 m s.l.m.).

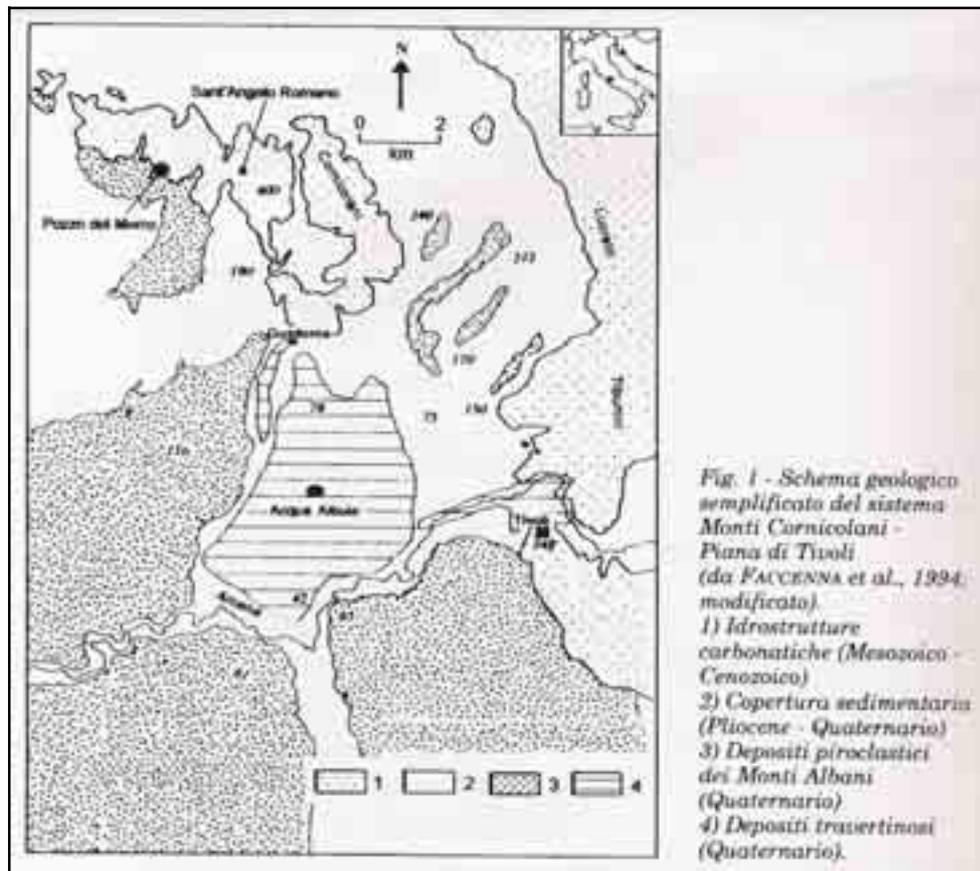


Figura 38: Estratto da: Atti del convegno sul tema, *Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, a cura di Marco Giardini, Guidonia (RM), 2000, pp. 147, cfr. pag. 34.

All'interno del bacino in oggetto (**Figura 38**) sono individuabili quattro unità morfologiche distinte:

- uno scudo travertinoso poco elevato (74 m s.l.m) compreso tra l'arco occidentale, l'Aniene e la piana di *Guidonia* (RM);
- un rilievo ghiaioso-travertinoso alquanto ripido il quale si eleva da *Ponte Lucano* verso *Tivoli*;
- il costone di tipo *travertinoso* detto delle *Caprine* allungato da N a S, limitato ad E e W da morfostrutture alluvionali e sopraelevato sui restanti travertini;
- un anello ampio da 1 a 3 km, depresso nei margini occidentale e meridionale, costituito da alluvioni recenti e separante le tre unità morfologiche sopraddette.

Nell'area delle *Acque Albule* si riscontra la presenza di morfotipi assimilabili alle cosiddette *doline* alcune delle quali si sono trasformate in piccoli bacini lacustri alcuni dei quali risultano attualmente prosciugati.

Tra i laghetti attivi più conosciuti si ricorda quello di *S. Giovanni*, i *Laghetti della Regina e delle Colonnelle*, sorgenti delle acque sulfuree dette *Albule* per il loro caratteristico colore biancastro lattiginoso.

A **N** e ad **E** la *cornice di bacino* risulta costituita da sedimenti dell'*Era mesozoica*, da calcari massicci del *Lias inferiore* (osservabili nei *Monti Lucretili* e nei *Monti Cornicolani*), da calcari marnosi del *Lias medio*, da calcari composti da piccoli strati di selce e di calcari a *maiolica* del *Giurassico* e del *Cretaceo* (osservabili nelle propaggini dei *Monti Cornicolani, Lucretili e Tiburtini*) e da calcari marnosi e marne del *Lias superiore* e del *Cretaceo medio-superiore* (osservabili nei *Monti Cornicolani* e *Monti Lucretili*).

In generale, i complessi calcarei mostrano nel versante occidentale del ben distinguibile terrazzo tettonico di *Tivoli* strati con orientazione **NW-SE** ed una immersione complessiva, con pendenze quasi verticali, con orientazione **S-W**.

Sopra questa superficie terrazzata si riscontra il limite dei calcari mesozoici e si imposta attualmente il salto delle acque dell'*Aniene*, fenomeno osservabile in corrispondenza della *Grande Cascata* (**Figura 39**).

Questi calcari mesozoici mostrano una fenomenologia carsica molto accentuata, soprattutto in presenza di litologie fratturate del *Lias inferiore*; le acque che si infiltrano e si convogliano concorrono ad alimentare il sottostante bacino delle *Acque Albule*.

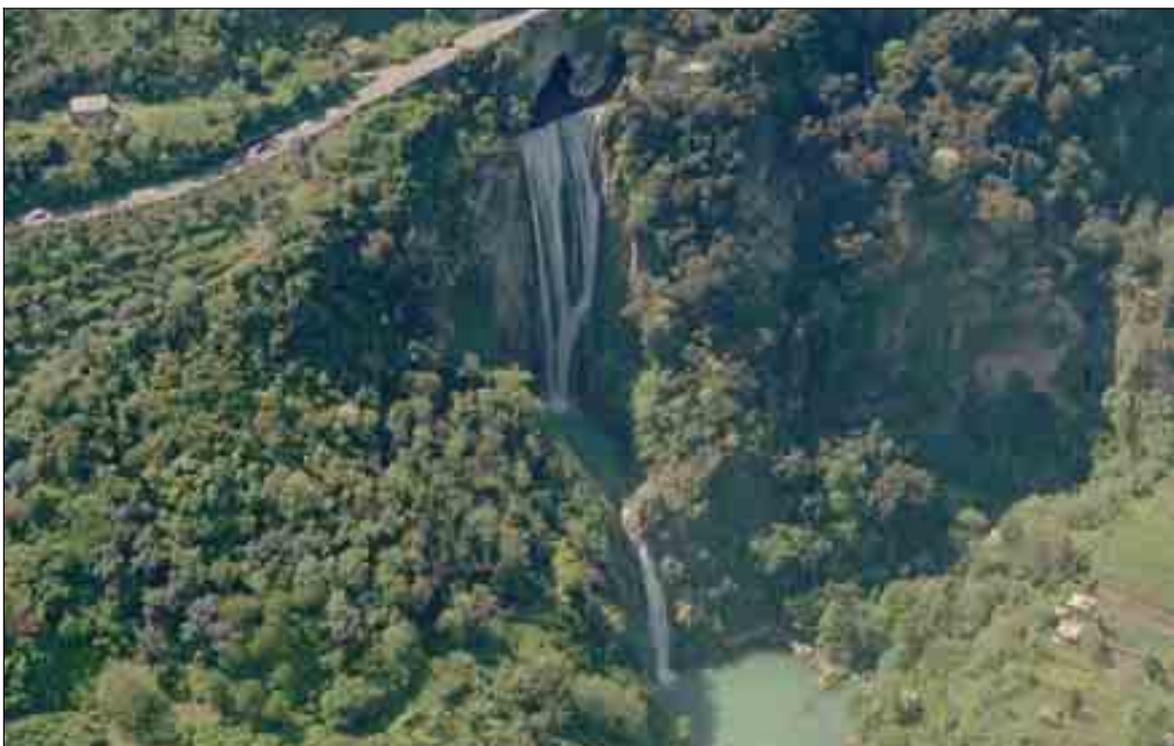


Figura 39: Tivoli (RM) – Fotografia della *Grande cascata*, (da <http://maps.live.com> in data 4 giugno 2006, parzialmente modificata).

Il settore N-E del bacino idrogeologico è prevalentemente formato da strati sabbioso-ghiaiosi o sabbioso-argillosi riferibili al *Pliocene* per il loro contenuto in fossili marini.

Il settore N-O della morfologia idrogeologica è costituito al contrario da rocce clastiche, fortemente erose i cui strati posseggono una leggera pendenza verso S e S-E presentando nel complesso un comportamento semipermeabile.

La maggior parte dei terreni affioranti nel *Bacino delle Acque Albule* è però di origine *Pleistocenica* essendo infatti rappresentati da sedimenti sia di origine alluvionale che vulcanica oltre che di *deposito chimico* come attesta la massiccia nota presenza di banchi di *travertino*.

Tra i sedimenti alluvionali sono notevoli le presenze di ghiaie calcaree e subordinatamente di ghiaie silicee, più o meno cementate.

Trattasi nella fattispecie di formazioni di origine mista:

- *detriti di falda* alla base dei rilievi calcarei;
- *conoidi di deiezione* in connessione con gli antecedenti sbocchi del *Fiume Aniene* e di altri corsi d'acqua.

La formazione di queste morfologie deriva sostanzialmente dal rimaneggiamento a breve distanza di ciottoli dei conglomerati *Pliocenici* spesso scarsamente ricementati.

Nel comprensorio in esame sono altresì abbondantemente riconoscibili prodotti piroclastici nonché tufacei appartenenti a diverse fasi di attività vulcanica laziale.

I tufi più *antichi*, rappresentati dalla varietà *granulare* (talora a struttura *vacuolare* per asportazione delle *leuciti* alterate e degli orizzonti a *pomice*), affiorano o scompaiono per brevi tratti.

Al complesso deposizionale tufaceo che attesta le distinte fasi esplosive del *Vulcano Laziale* sono prevalentemente ascrivibili i depositi di *pozzolana rossa* e di *tufo litoide*.

Procedendo verso **E**, il posizionamento delle pozzolane sui tufi più antichi non è facilmente visibile mentre è però sempre osservabile una copertura di *tufo litoide* con al suo interno un inserimento saltuario ed eterogeneo di prodotti di color giallo o specificatamente pozzolanici di color grigio e nero. Il *tufo litoide rosso* affiora spesso sotto il travertino e risulta ben riconoscibile in alcune cave di estrazione.

Riassumendo, si può affermare che tutti i rilievi che bordano l'arco esterno del bacino idrogeologico posseggono uno strato interno di *sabbie gialle plioceniche* o *cambriane*, litologia avvolta dalle segnalate *pozzolane rosse* con le quali generalmente si impostano in successione altri banchi di tufo, soprattutto quelli inconfondibili di *tufo litoide*.

Le rocce effusive sono presenti e sono rappresentate dalla *leucitite*.

Il comprensorio geografico in analisi, come è noto, è conosciuto per la concentrata e consistente presenza di una particolare litologia famosa fin dall'antichità per il suo facile uso nella realizzazione di opere monumentali: il *travertino*.

Il ***complesso conglomeratico-travertinoso*** è definibile come quella unità stratigrafica che, pur potendo differire localmente per i suoi diversi elementi litologici intesi in senso stretto e per i particolari aspetti della loro genesi, costituisce tuttavia una formazione caratterizzata, prevalentemente, da depositi chimici di carbonato di calcio più o meno puro talora misto a materiale clastico più o meno grossolano.

La formazione è di origine mista:

- ***alluvionale***;
- ***chimico-lacustre*** da acque fredde;
- ***chimica da deposito*** da acque termo-minerali.

Il complesso conglomeratico-travertinoso poggia verso **E** sui calcari mesozoici e su conglomerati pliocenici.

Nell'area centrale esso poggia tufi litoidi da costruzione mentre ad **W** non sono del tutto chiari i rapporti di giacitura con le rocce più antiche a causa del contatto da parte del materiale alluvionale più recente, che segue il contorno della formazione travertinoso.

Il complesso è quindi discordante sui terreni più antichi e il suo deposito è perciò avvenuto dopo la citata terza fase eruttiva del Vulcano Laziale successiva al deposito del *tuffo litoide (terzo ciclo)*.

Tra il salto del visibile terrazzo di *Tivoli* e il *Ponte dell'Acquoria* il *Fiume Aniene* scorre in una morfologia valliva incisa in una formazione prevalentemente costituita da calcari da incrostazione.

Trattasi principalmente di strati orizzontali di un particolare *travertino* di tipo impuro, sabbioso-argilloso o gialliccio, formato da esili strati alternati, alcuni dei quali sono formati da cristalli di calcite disposti tra loro parallelamente e normalmente ai piani di stratificazione. Tale particolare litotipo è conosciuto localmente nella zona di Tivoli con il nome specifico di *tartaro*²⁹.

All'interno del litotipo in oggetto si trovano alternati sia strati a spalmatura che a struttura cellulare. Spesso il *tartaro* assume un aspetto a muschio con presenza di strati e lenti sabbiose o argillose, talora calcaree polverulente bianchicce o rossicce.

Il terrazzo già citato si presenta arealmente a pianta triangolare allungata: Esso è incluso tra il corso del *Fiume Aniene* e la *Via Tiburtina* e fra *Ponte Lucano* e la cittadina di *Tivoli* ed è costituito, in superficie, da una particolare e caratteristica formazione in cui sono molto sviluppati i calcari di incrostazione intorno a corpi cilindrici o ad accumuli di ghiaie. Andando verso **S**, la presenza di ghiaie (che si presentano talora fortemente cementate) diminuisce, passando a litologie di travertino sabbioso color marrone alle volte poco cementato.

²⁹ Il particolare *geotopo Tartaro* ha una origine degna di interesse storico - culturale. Infatti, nella tradizione letteraria greca e latina esso è il luogo sotterraneo dove *Zeus* relegò i *Titani* vinti e in cui anche *Urano* aveva relegato i *Ciclopi*. Il luogo è abitato non da morti umani ma da esseri mitici mostruosi poiché esso è distinto dagli *Inferi* (o *Ade*) che corrispondono al regno dei morti: il *Tartaro* è collocato al disotto di esso. L'area ove è localizzato il litotipo è ancora oggi spesso avvolta dal classico odore mefitico delle emanazioni gassose vulcaniche. Si consulti a tale proposito: **AA. VV.**, Vocabolario della Lingua Italiana, Volume IV, S-Z, Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani, Milano, 1994, pp. 1311, cfr. pp. 739, 740.

Sulla destra idrografica del *Fiume Aniene*, invece, si è sviluppato un travertino di forma granulare, quasi *arenaceo*, di tipo *oolitico*, alternato al cosiddetto *tartaro*.

Dagli affioramenti presenti nel bacino deriva che il *travertino stratificato* è certamente più antico di quello ad incrostazione di tipo ghiaioso.

Si possono osservare travertini che vanno da quelli più o meno porosi con presenza di grandi o piccole cavità, ad altri aventi invece stratificazioni abbastanza compatte più o meno evidenti. Generalmente i banchi sono posizionati in modo orizzontale ma possono anche presentarsi in modo leggermente inclinato verso S.

Si può dedurre che localmente l'area è stata oggetto di numerosi movimenti di assestamento sismico. Gli stessi strati sono spesso ricoperti dai più recenti *tartari*, di spessore variabile fra qualche decimetro ed alcuni metri.

È presumibile che i travertini propriamente detti siano poco sviluppati in profondità, nel settore compreso tra il *Fiume Aniene*, la *Via di Palombara* ed il versante N-E del *Bacino delle Acque Albule*.

Il travertino giallastro o grigiastro (talora friabile) e quello compatto (generalmente bianco), sono in affioramento al soprastante tufo litoide. Essi sono osservabili da *Ponte Lucano* a *Villa Adriana*. Ad W di queste località, il travertino è invece ricoperto da depositi alluvionali sabbiosi e da tufi rimaneggiati. Essi sono di nuovo affioranti nell'esteso settore delle *Acque Albule* e visibili a giorno presso le cave aperte del *Barco* e delle *Fosse*.

Alle *Caprine*, il travertino ha notevole spessore e prevale quello duro e grigiastro. Qui i banchi presentano frequenti *litoclasti verticali* e cavernosità più o meno accentuate, tappezzate di calcari concrezionati. Tali continuità determinano una condizione di accentuata porosità a motivo della quale la formazione è da considerarsi molto permeabile.

Nei travertini, fin dalla seconda metà dell'ottocento, sono stati rinvenuti fossili di vegetali, invertebrati e vertebrati.

Le maggiori evidenze spettano ai resti vegetali sia come impronte, specialmente di foglie, che in modelli esterni che si mostrano come cavità cilindriche incrostate di strati di carbonato di calcio, alternamente puro e bianchiccio, terroso o variamente colorato. Impronte foliarie si rintracciano parimenti nel travertino grigio delle cave delle *Fosse* e delle *Caprine* insieme a steli di graminacee coricati in direzioni corrispondenti alla direzione di scorrimento delle acque incrostanti.

Gli steli o i fusti di altre piante sono frequentemente incrostati di *tartaro* presentandosi in strati alternati che possono indicare periodi stagionali diversi in cui l'acqua stessa era più o meno torbida.

Tra i resti di invertebrati prevalgono i gusci bianchi e sottili dei molluschi di acqua dolce. Nei travertini delle *Acque Albule* non mancano peraltro resti fossili di mammiferi, rinvenuti questi sia nel travertino compatto che nel cosiddetto *travertino rosso* il quale costituisce materiale di incrostazione e di riempimento di fessure.

Dai fossili vegetali ed animali che sono stati rinvenuti nell'area, così simili alle specie tuttora viventi, si può dedurre che il clima nel quale si è formato il complesso travertinoso era leggermente più caldo di quello attuale.

1.1.3 Evoluzione storica ed assetto del territorio

1.1.3.1 Evoluzione storica

Per meglio comprendere gli effetti dell'evoluzione ambientale intervenuta nel bacino delle *Acque Albule* a partire dall'età antica è di indubbia utilità soffermarsi sull'assetto attuale della *grande cava romana del Barco*: un vero e proprio *monumento* che, purtroppo, è stato quasi completamente fagocitato dalle moderne cave di estrazione del *travertino* aperte fra *Bagni di Tivoli - Ponte Lucano*, la *Via Tiburtina* e l'*Aniene*.



Figura 40: Grande cava romana del Barco; Estratta da : www.usr-lazio.artov.rm.cnr.it, consultato in data 25/09/2006.

La cava del Barco

Il termine Travertino deriva dal latino *Tiburtinus (lapis)*, la *pietra di Tivoli*, così detta perché estratta lungo l'*Aniene*, ai piedi dei Monti di Tivoli (*Tibur*).

L'antica cava del Barco si estendeva lungo l'ultimo tratto pianeggiante dell'originario tracciato della *Via Tiburtina* (all'altezza dell'attuale *km 24*) subito prima di *Ponte Lucano* e dell'inizio della salita verso *Tivoli*, quindi nel cuore dell'*Ager Tiburtinus*.



Figura 41: L'*Ager Tiburtinus* ad W di Tivoli.. Numero 1 Cava, 2-3 Montarozzo del Barco e Piccolo, 4 Banchina, 5 rampa della via Tiburtina, 6 casale del Barco, 7 villa, 8 sepolcro con ara, 9 mausoleo di Claudio Liberatore, 10 acquedotto moderno, 11 terme c.d. di Agrippa, 12 Canale delle Acque Albule, 13 Via Tiburtina a Bagni di Tivoli, 14-15 sepolcri dell'Albuccione, 16 villa di valle Pilella, 17 sepolcro dei Plauzi, 18-20 ponti Lucano, dell'Acquoria e della Valeria, 21-22 sepolcri c.d. dei Sereni e di colle Nocello, 23 templi delle acropoli di Tivoli. Estratto da: Atti del convegno sul tema, *Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, a cura di Marco Giardini, Guidonia (RM), LEA – Tivoli, Grafica Ripoli s.n.c., Villa Adriana (RM), 2000, Guidonia (RM), pp. 147, cfr. pag. 90.

Abbandonata in epoca tardo-antica e trasformatasi in pantano durante il Medioevo, la cava (anticamente detta *lapidicina*) fu riaperta nel XVI secolo per la costruzione degli edifici in S. Pietro ed è stata sfruttata parzialmente anche nei secoli successivi.

Solo alla fine dell'ottocento si è avviata una moderna estrazione del pregiato materiale su scala industriale che ha investito però una zona ben più vasta. Oggi, infatti, numerose cave sono ancora in esercizio fra *Bagni di Tivoli*, *Villalba* e *Villanova*.

La pianura sottostante *Tivoli* compresa fra le località *Albuccione* e *Ponte Lucano* (tra il km 20 e il km 26 dell'attuale tracciato della via Tiburtina), nota nel Medioevo come *campus Maior o Tiburtinus*, è un'unica grande platea leggermente inclinata verso l'Aniene (con quota s.l.m. di 80 m a N e 30 m a S), formata da sedimenti calcarei pleistocenici, via via più compatti negli strati inferiori.

In epoca romana, per l'apertura della cava, fu attaccato il lembo meridionale di questo "scudo" areale, e questo poiché il travertino qui affiorava in superficie privo di strati alluvionali e tufacei di formazione più recente. L'attività estrattiva era inoltre facilitata dalla mancanza di zone acquitrinose e dalla presenza del corso dell'*Aniene* che venne sfruttato come via di trasporto.

Purtroppo, in merito, le fonti antiche sono piuttosto scarse e generiche.

Vitruvio (*De arch.* 2,7,1-2), trattando il tema delle pietre da costruzione, le classifica in *molles*, *temperatae* e *durae* (tenere, di media resistenza e dure). L'autore latino annovera nella seconda categoria le cave *Tiburtinae*, *Amiterninae* e *Soractinae*, qualificando il litotipo tiburtino (il travertino) come ben resistente ai carichi ed alle intemperie ma estremamente soggetto all'azione del fuoco la quale lo spacca e lo sgretola.

Anche le evidenze archeologiche consentono, da parte loro, solo una limitata conoscenza, poiché la continuità d'uso della cava ha comportato radicali modifiche e distruzioni.

Verso il 1885 l'area venne visitata dallo studioso LANCIANI, profondo conoscitore delle *antichità tiburtine* e di *Villa Adriana*, il quale stese una relazione di grande interesse rimasta inedita, che descrive lo stato dei luoghi prima della loro riutilizzazione moderna.

Secondo lo stesso autore la cava principale aveva la forma di un rettangolo lungo circa 1 km e largo 0,5 km con due fronti, uno a N, rasente l'antica *Via Tiburtina*, ed uno ortogonale ad E, fra la strada stessa e l'Aniene.

La superficie totale, considerando anche una piccola area ad W difficilmente riconoscibile a causa della vegetazione e dell'innalzamento di quota dovuto agli straripamenti del fiume, era di circa 120.000 m².

Secondo i calcoli del LANCIANI la superficie totale era di 500.000 m² dalla quale sarebbero stati estratti oltre 5 milioni e mezzo di m³ di materiale.

Il fronte E è stato quasi completamente distrutto dalle cave moderne, quello N, invece, si conserva ancora per alcuni tratti fra il cinquecentesco casale del *Barco* e la vicina foresteria che vi risultano addossati.



Figura 42: Il Bacino delle Acque Albule, elaborazione grafica realizzata con l'ausilio del Software Google Earth, (ANGELINI 2006), consultato in data 25 maggio 2006.



Figura 43: L'area della cava del *Barco* in una foto aerea del 1977. Estratto da: *Atti del convegno sul tema, Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, a cura di Marco Giardini, Guidonia (RM), LEA – Tivoli, Grafica Ripoli s.n.c., Villa Adriana (RM), 2000, Guidonia (RM), pp. 147, cfr. pag. 92.

La piana delle Acque Albule nell'antichità

Le sorgenti sulfuree delle Acque Albule costituiscono un particolare fenomeno di *vulcanismo secondario*. Esse derivano da un processo di mineralizzazione delle falde freatiche provocato dai fluidi ascendenti dei magmi profondi in raffreddamento attraverso fessurazioni stesse dei banchi di *travertino*.

Grazie alla particolarità di queste sorgenti, la piana delle Acque Albule era nota nell'antichità anche per la presenza di un importante stabilimento termale noto con il nome di *Terme di Agrippa*.

In origine la zona comprendeva molteplici laghetti, di cui ne sopravvivono due, vicinissimi tra loro, detti delle *Colonnelle* e della *Regina Zenobia* o delle *Isole Natanti*.



Figura 44: Veduta del *Lago della Regina* con sullo sfondo le cosiddette *Terme di Agrippa*. Estratto da: *Atti del Convegno sul tema, Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, a cura di Marco Giardini, Guidonia (RM), LEA – Tivoli, Grafica Ripoli s.n.c., Villa Adriana (RM), 2000, Guidonia (RM), pp. 147, cfr. pag. 109.

Altri, come quello dell'*Inferno* e quello dei *Tartari*, sono oggi prosciugati e il loro invaso è stato quasi completamente distrutto o ricoperto di scarichi. I loro toponimi originari alludono al loro caratteristico ribollimento delle acque provocato dalle bollicine di anidride solforosa nonché alle caratteristiche concrezioni calcaree, conosciute localmente come *tartari* ed utilizzate fin dall'antichità per rivestire ninfei e fontane.

L'antica situazione idrogeologica areale è ben descritta da STRABONE (5, 3, 11) il quale accenna alle molte sorgenti, direttamente potabili od utilizzate specificatamente per bagni ed abluzioni contro ogni malattia.

Queste ultime defluivano secondo *Vitruvio* (*De arch.* 8, 3, 2) verso l'Aniene, formando il corso del *Flumen Albula* che i Romani presto dovettero trasformare in emissario onde impedire l'impaludamento della pianura stessa.

Dopo l'età classica, tale fenomeno si è ripetutamente verificato creando non pochi problemi, fino alla costruzione del nuovo canale realizzato nel 1556 dal governatore di Tivoli, il Cardinal *Bartolomeo della Cueva*.

Conosciutissime erano le virtù *salutifero-medicamentose* delle acque sulfuree.

Sulla sponda **W** del *Lago della Regina* si innalzano imponenti resti di un complesso edificio termale designato come *Terme di Agrippa*³⁰ o anche come *Terme della Regina Zenobia*. È nota la frequentazione delle Terme ad opera dell'imperatore *Augusto*.

In realtà l'edificio, anche se preceduto da strutture più antiche, risale all'*Età adrianea*.

Al centro era presente una grande aula in laterizio (17 x 12m) avente le estremità curvilinee, coperta da volte e decorata con alte colonne (6,70 m) di color verde antico, trasferite successivamente in *Roma* dai Papi *Paolo III* e *Giulio III*.

In *Età imperiale* l'aggregato di ville ed edifici degli immediati dintorni assunse le caratteristiche di una *statio viaria*. Di qui la loro registrazione sulla *Tabula Peutingeriana* (IV secolo) con l'indicazione di *Aquas Albulas*, situate a quasi 26 Km da Roma.

Un settore dei bagni o costruzioni annesse possono aver costituito anche la residenza della ex regina di *Palmira Zenobia* (in zona è attestato il toponimo *Palatio* designante in genere ville imperiali). *Zenobia* sarebbe stata relegata dall'imperatore *Aureliano* in una *possessio* presso il luogo detto *Concae* (*Hist. Aug., Tyr. trig.* 30, 27), toponimo che sembra riferirsi ai laghetti.

La *possessio* di *Aureliano* dovrebbe essere la medesima che ritroviamo indicata come *Possessio Sufuratarum*. Essa fu donata nel IV secolo dall'imperatore *Costantino* alla basilica romana di *S. Lorenzo* fuori le Mura.

³⁰ M. Vespasiano Agrippa fu costruttore dei più antichi bagni pubblici a Roma nel 25 a.C. .

Le *Acque Albule*, in quanto sorgenti mineralizzate, hanno appariscenti caratteristiche (ribollimento, odore intenso, colore azzurrino) che di sicuro impressionarono fortemente l'immaginario degli antichi, pronti a tributare onori sacri ad aspetti insoliti della natura.

L'edificio termale era anche, secondo la tradizione ricorrente, sede di un particolare culto.

Già nella media *Età del Bronzo* (XV-XIV a. C.), esisteva sulle sponde dei laghi un villaggio di pastori il quale ha restituito numerosi frammenti di vasellame ceramico. Forse il sito veniva frequentato per sottoporre gli animali a lavacri terapeutici e disinfettanti.

Ma è in età romana che troviamo le fonti divinizzate nelle dediche votive come *Aquae Albulae / Aquae Albulae Sanctissimae* e di cui si esaltavano le capacità salutifere.

Le terme quindi erano frequentate dal pubblico soprattutto a scopo terapeutico.

Per la loro bellezza ed il carico di storia i laghetti hanno goduto di ininterrotta celebrità fino all'Ottocento quando, secondo la tradizione, su zolle galleggianti di materia vegetale che si staccavano dalle rive, era uso addirittura navigare.

Questa sembra essere l'origine della denominazione di *Lago delle 16 Barchette* o *delle Isole Natanti* data al più grande dei laghi.

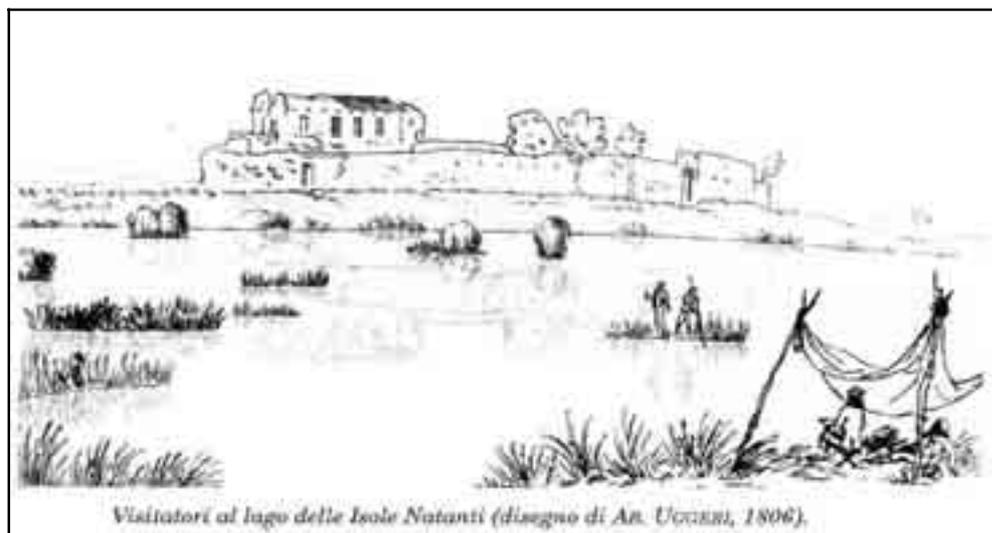


Figura 45: Estratto da: *Atti del Convegno sul tema, Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, a cura di Marco Giardini, Guidonia (RM), LEA – Tivoli, Grafica Ripoli s.n.c., Villa Adriana (RM), 2000 Guidonia (RM), pp. 147, cfr. pag. 122.

Esiste una carenza di dati attendibili sulla popolazione ivi residente in tempi antichi.

Questo fattore ha inevitabilmente ristretto il campo di indagine ai fini di una descrizione delle dinamiche evolutive della popolazione nelle aree di attuale competenza dei Comuni di *Guidonia - Montecelio* e di *Tivoli*.

Si ricorda che lo stabilimento termale moderno nasce alla fine del 1800.

Nell'interpretare i dati si è infatti tenuto conto che le trasformazioni verificatesi nell'area sono state in gran parte determinate ed influenzate dalla funzionale ubicazione di quest'ultima proprio a ridosso dei confini comunali della Capitale.

Essa è infatti posizionata proprio nella fascia di interscambio esistente tra Roma ed i Comuni confinanti.

A grandi linee si può affermare che si tratta di un'area in forte espansione poiché insiste in una zona strettamente correlata alla metropoli di Roma e che di fatto essa è interessata da insediamenti residenziali e localizzata in una porzione di territorio il cui sviluppo industriale è stato favorito anche dalla vicinanza della rete autostradale (Autostrada A24 - Roma - L'Aquila).

Oltre a questi motivi si può accennare anche al consistente movimento di persone indotto dallo stabilimento termale il quale ha visto progressivamente crescere il suo bacino di utenza.

Poiché il primo nucleo delle attuali *Terme Acque Albule* è stato realizzato nel 1879, vengono riportati qui di seguito i dati relativi alla *popolazione residente* del Comune di Tivoli in base ai censimenti effettuati tra il 1871 e il 1936.

Tabella 1: Evoluzione demografica di Tivoli dal 1871 al 1936, Tabella estratta da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia, Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 29.

COMUNE DI TIVOLI							
ANNI	1871	1881	1901	1911	1921	1931	1936
POPOLAZIONE	7.449	9.610	12.230	14.608	16.022	17.674	20.875

In questo lasso di tempo la popolazione è aumentata in modo considerevole e costante, peraltro registrando un incremento demografico, che, nei primi trenta anni (tra il 1871 e il 1901), risulta davvero notevole (+ 64,2%) e trattasi di un fenomeno demografico da attribuire principalmente all'attività estrattiva del *travertino*.

Anche nei trentacinque anni successivi la crescita rimane comunque elevata (+ 70,7%), determinando, come è naturale, la crescita a dismisura della densità per km^2 (pari a 85,4 nel 1871; 167,4 nel 1911; 239,3 nel 1936).

Da considerarsi è il fatto che fino al 1937 la superficie comunale di Tivoli era calcolata in $87,58 km^2$.

Successivamente, con la costituzione del *Comune di Guidonia - Montecelio*, la superficie di competenza amministrativa scese a $68,50 km^2$.

Da una analisi approfondita dei singoli Censimenti Generali della Popolazione elaborati dall'ISTAT, risulta che nel 1911 per la prima volta compare il toponimo della località *Bagni*, associato a quello di *Quintiliolo*.

Tabella 2: Popolazione presente, distinta in agglomerata e sparsa e popolazione residente, dati Istituto Centrale di Statistica del Regno d'Italia, 1911. Tabella estratta da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia, Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 30.

POPOLAZIONE - ANNO 1911				
	<i>Presente</i>	<i>Agglomerata</i>	<i>Sparsa</i>	<i>Residente</i>
Città di Tivoli	13.453	13.453	-----	13.265
Quintiliolo e Bagni	1.020	47	973	991
Carciano e Villa Adriana	398	-----	398	352
Totale TIVOLI	14.871	13.500	1.371	14.608

Come è comprensibile trattasi di valori ancora sommari e dobbiamo giungere fino al censimento del 1921 per trovare un dato relativo alla sola frazione di *Tivoli - Bagni*.

Tabella 3: Popolazione presente. Dati Istituto Centrale di Statistica del Regno d'Italia, 1921. Tabella estratta da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia , Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 31.

POPOLAZIONE - ANNO 1921				
	<i>Presente</i>	<i>Agglomerata</i>	<i>Sparsa</i>	<i>Residente</i>
Città di Tivoli	14.502	14.502	-----	14.324
Tivoli Bagni	1.261	217	1.044	1.195
Villa Adriana	542	-----	542	503
Ponte Lucano	82	82	-----	-----
Totale TIVOLI	16.387	14.801	1.586	16.022

I dati riportati evidenziano per la località *Tivoli Bagni* valori di popolazione modesti, poco più di un migliaio di abitanti, quasi tutti sparsi nella campagna.

Dieci anni dopo il censimento del 1931, gli abitanti presenti risultano più che raddoppiati e per la sola frazione di *Tivoli Bagni* viene indicato un totale di popolazione presente pari a 2.654 unità. L'ottavo Censimento Generale della Popolazione, condotto dall'allora Istituto Centrale di Statistica del Regno d'Italia nell'aprile del 1936, è l'ultimo che vede la stessa *Guidonia* compresa nel *Comune di Tivoli* mentre, nella parte settentrionale del comprensorio tiburtino, il *Comune di Montecelio* è invece presente fin dal 1871. L'analisi della distribuzione della popolazione residente nei Comuni e nelle sezioni di censimento risulta interessante perché evidenzia la sostanziale differenza di rapporto proporzionale tra abitanti del centro e delle case sparse di *Tivoli* e di *Bagni Albule* (*Bagni di Tivoli*, oggi *Tivoli Terme*).

Tabella 4: Popolazione residente in complesso, nei centri e nelle case sparse, dati Istituto Centrale di Statistica del Regno d'Italia, 1936. Tabella estratta da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia , Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 32.

POPOLAZIONE RESIDENTE - ANNO 1936			
	<i>in complesso</i>	<i>dei centri</i>	<i>delle case sparse</i>
Città di Tivoli	16.896	16.886	10
Bagni Albule	2.785	496	2.289
Totale TIVOLI	20.875	17.707	3.168

La frazione di *Bagni Albule*, infatti, presenta numero 2.785 residenti, di cui solo 496 nei centri e 2.289 nelle case sparse.

Ciò sta a significare che, nel 1936, gli abitanti di questa area si dedicavano ancora all'agricoltura. Tale deduzione è suffragata dalla lettura della *Carta Topografica d'Italia*, dove è possibile frequentemente incontrare il toponimo specifico di *casale* ed individuare appezzamenti di terreno delimitati da muri a secco i quali recintavano le proprietà di piccola e media ampiezza.

La situazione muta con la creazione del *Comune di Guidonia – Montecelio* (D. L. 21-X-1937 n° 1803) la quale ha interessato i territori situati a N della Via Tiburtina e compresi tra Villa Adriana e Bagni di Tivoli. Qui si sono sviluppati i centri abitati sia di *Villalba* che di *Villanova*. In particolare, c'è da sottolineare che la stessa *Villalba*, al censimento del 1961, contava già 6.266 abitanti.

L'analisi delle rilevazioni censuarie della popolazione residente nei Comuni di *Tivoli* e *Guidonia - Montecelio* ed il loro confronto con quelle della Provincia di Roma evidenziano che l'*hinterland romano* risulta costituito e caratterizzato non soltanto dai luoghi di partenza dei pendolari verso la Capitale ma anche dai luoghi di arrivo di una parte della popolazione immigrata verso Roma che si stanZIA in queste aree marginali della metropoli stessa. La popolazione immigrata, infatti, si stabilisce proprio in queste aree per le note difficoltà economiche, sociali e culturali riscontrate nell'insediarsi nell'area urbana o nella sua periferia.

Il fenomeno riguarda quella estesa fascia di Comuni confinanti con Roma i quali negli ultimi 40 anni hanno visto esponenzialmente crescere la popolazione residente con tassi superiori alla media provinciale, in alcuni casi superiori perfino all'andamento medio di crescita della Capitale stessa (ISTAT, 1951, 61, 71, 81, 91).

Per quanto riguarda i Comuni che interessano il bacino termale si può notare, sotto il profilo quantitativo, come proprio il *Comune di Guidonia - Montecelio* passi dalle circa 12.000 unità del 1951 ad addirittura alle circa 60.000 nel 1991, con una densità che va dai 158 *ab/km²* del 1951, agli oltre 700 *ab/km²* del 1991.

Interessanti e significativi risultano anche i dati del *Comune di Tivoli* il quale già nel 1951 contava un numero elevato di abitanti (24.932) e che ha sempre di più visto negli anni successivi crescere la popolazione.

All'interno di questa tendenza si è progressivamente evidenziata invece, in tempi recenti, una flessione del ritmo della crescita, con addirittura una inversione di tendenza registrata nell'ultimo Censimento, fenomeno forse dovuto ad una sorte di "saturazione" stessa del Comune.

Questo fatto viene interpretato come movimento di flusso in arrivo in questa fascia confinante metropolitana, flusso migratorio che però sembrerebbe essersi maggiormente rivolto verso quei Comuni con densità più basse, come è di fatto avvenuto con il Comune di *Guidonia-Montecelio* il quale, dal punto di vista amministrativo, come è noto, si è recentemente costituito.

Se si confrontano le densità di popolazione (pari a circa 700 ab/km^2) riscontrate proprio nei due citati Comuni con gli stessi dati di media provinciale (la quale non raggiunge neppure i 3 ab/km^2), ci si può render conto delle notevoli differenze esistenti nella crescita dei Comuni della Provincia, anche sotto il profilo dell'insediamento propriamente detto e quindi delle densità di popolazione areali esistenti.

Può essere interessante seguire l'evoluzione di questi nostri due Comuni, *Guidonia - Montecelio* e *Tivoli*, confrontandone l'*incremento demografico percentuale* con quello dell'intero territorio provinciale, escludendo naturalmente il Comune di Roma.

Tabella 5: Incremento percentuale della popolazione residente nei comuni di Guidonia Montecelio, Tivoli e provincia di Roma, 1951-1991. Tabella estratta da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia, Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 34.

ANDAMENTO DEMOGRAFICO PERCENTUALE				
	1951/61	1961/71	1971/81	1981/91
COMUNE di TIVOLI	+ 27,2 %	+ 28,0 %	+ 18,1 %	- 0,8 %
COMUNE di GUIDONIA - MONTECELIO	+ 42,3 %	+ 33,2 %	+ 34,6 %	+ 11,4 %
PROVINCIA DI ROMA	+ 15,0 %	+ 17,1 %	+ 17,2 %	+ 11,6 %

E' interessante notare come anche i valori di crescita della popolazione del Comune di *Guidonia-Montecelio* risultino, negli ultimi anni analizzati, di poco al di sotto della media percentuale di crescita dell'intera Provincia di Roma.

Trattasi senz'altro di un fenomeno positivo, che vede l'*hinterland* della Capitale avviarsi verso una più equa e razionale distribuzione areale della popolazione residente.

Di seguito si riportano esposti gli andamenti demografici registrati nei due Comuni e relativi ai dati disponibili che vanno dal 1951 al 2001.

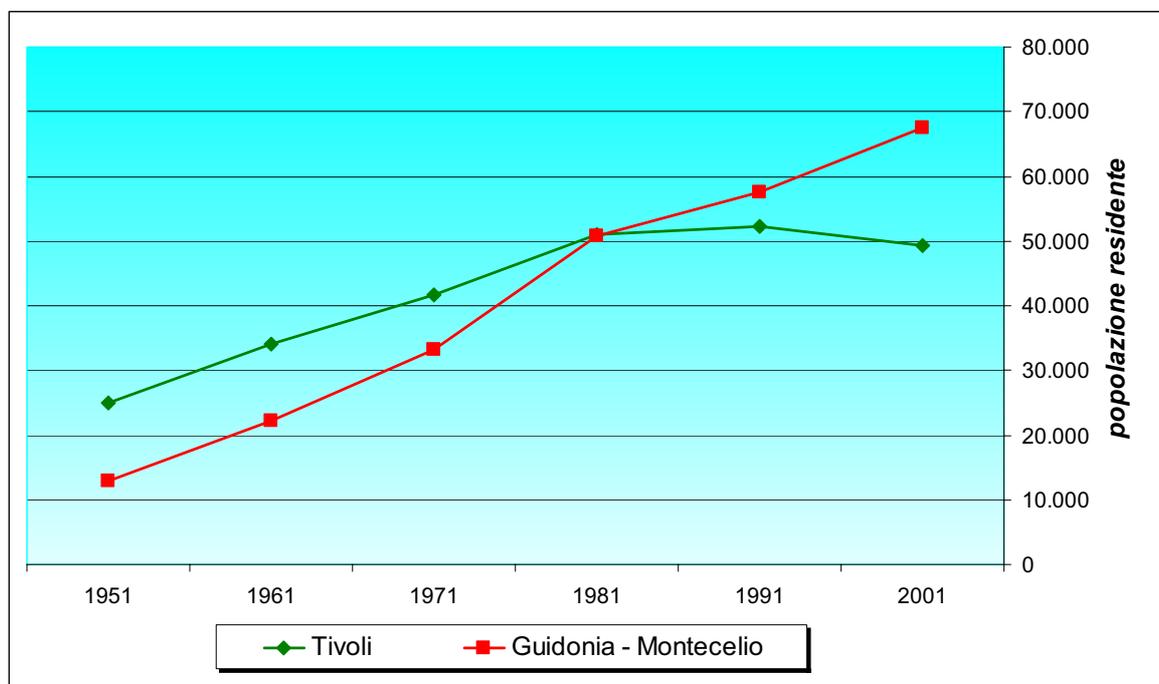


Figura 46: Andamento demografico nei Comuni di Guidonia – Montecelio e di Tivoli negli anni che vanno dal 1951 al 2001 (Fonte dei dati ISTAT, elaborazione grafica A. Angelini)

È possibile apprezzare come tutti e due i Comuni oggetto di studio abbiano mostrato, pur se con andamenti e valori leggermente differenti, un notevole, costante incremento demografico a partire dall'anno 1951. Si nota una tendenza alla stabilizzazione a partire dagli anni 80 per il solo Comune di Tivoli.

Per maggiore precisione e correttezza occorre ricordare che le stime presentate dall'ISTAT, basate sui dati forniti dai Comuni per la rilevazione della popolazione residente ed integrati da una verifica statistica, permettono di stabilire che la popolazione residente nei due Comuni al 1° gennaio 2007 risulti così distribuita:

- Comune di **Guidonia – Montecelio**: **76.770** abitanti;
- Comune di **Tivoli**: **51.847** abitanti.

Trattasi di valori in sintonia con quanto mostrato dall'andamento demografico generale già analizzato in precedenza.

Parallelamente all'incremento demografico, si sono venuti a modificare i vari settori di attività economica, in particolare sono andati crescendo il settore secondario e terziario, mentre si è registrata una contrazione del settore primario.

Ciò ha impresso una notevole accelerazione all'andamento demografico il quale, in queste aree a sviluppo anomalo, sembrerebbe essere di natura fisiologica in quanto dipendente dalla vicinanza dei centri abitati stessi alla Capitale.

Tabella 6: Popolazione attiva per settori di attività economica - *Guidonia Montecelio*, 1951-1981, dati ISTAT. Estratto da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia, Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 42.

GUIDONIA - MONTECELIO									
	1951		1961		1971		1981		
	attivi	%	attivi	%	attivi	%	attivi	%	
AGRICOLTURA	1.100	24,9	706	10,1	410	4,0	421	2,6	
INDUSTRIA	1.344	30,4	2.485	35,6	4.037	39,6	4.943	30,5	
COSTRUZIONI	382	8,6	1.284	18,4	1.502	14,7	1.487	9,2	
ENERGIA ELETTRICA, GAS E ACQUA	9	0,2	37	0,5	46	0,5	145	0,9	
TRASPORTI E COMUNICAZIONI	164	3,7	564	8,1	1.177	11,5	1.349	8,3	
COMMERCIO	350	7,9	395	5,7	574	5,6	2.746	16,9	
SERVIZI	---	---	463	6,6	743	7,3	2.670	16,4	
PUBBLICA AMMINISTRAZIONE	1.060	23,9	1.022	14,6	1.651	16,2	2.199	13,5	
CREDITO E ASSICURAZIONI.	16	0,4	26	0,4	56	0,6	269	1,7	
TOTALE	4.425	100	6.982	100	10.196	100	16.229	100	

Occorre però precisare che i dati riportati si riferiscono ad una zona più vasta di quella oggetto della presente indagine in quanto relativa all'intera superficie comunale sia di *Tivoli* che di *Guidonia - Montecelio*.

Nel 1951, a *Guidonia - Montecelio*, l'economia locale risulta essere essenzialmente imperniata sull'agricoltura la quale impiega il 24,9% della popolazione attiva mentre a *Tivoli*, essa impiega solo il 10,3% della stessa.

Tuttavia, pur muovendo da situazioni relativamente diverse, entrambi i Comuni registrano al 1981 un considerevole e netto crollo di questo storico settore produttivo, raggiungendo valori percentuali simili: *Guidonia - Montecelio* 2,6%, *Tivoli* 2,3%.

Contemporaneamente, si è venuto a registrare un aumento complessivo della popolazione attiva la quale a *Guidonia - Montecelio* passa dalle 4.425 unità del 1951 alle 16.229 del 1981.

Di minore entità ma pur considerevole, risulta l'incremento registrato a *Tivoli*: dalle 8.324 unità del 1951 si arriva alle 16.022 unità del 1981. L'incremento riscontrato è quasi tutto a vantaggio dei settori secondario e terziario i quali fanno registrare una crescita notevole rispetto a tutti gli altri settori di attività.

Tabella 7: Popolazione attiva per settori di attività economica a Tivoli dal 1951 al 1981, dati ISTAT. Estratto da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia, Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 43.

TIVOLI								
	1951		1961		1971		1981	
	attivi	%	attivi	%	attivi	%	attivi	%
AGRICOLTURA	861	10,3	552	5,0	320	2,5	373	2,3
INDUSTRIA	3.874	46,6	4.378	39,7	4.907	38,4	4.732	29,5
COSTRUZIONI	391	4,7	1.465	13,3	1.310	10,3	1.202	7,5
ENERGIA ELETTRICA, GAS E ACQUA	152	1,8	206	1,9	258	2,0	377	2,4
TRASPORTI E COMUNICAZIONI	495	6,0	752	6,8	778	6,1	1.197	7,5
COMMERCIO	1.143	13,7	1.367	12,4	1.890	14,8	2.935	18,3
SERVIZI	---	---	830	7,5	1.912	15,0	4.600	28,7
PUBBLICA AMMINISTRAZIONE	1.317	15,8	1.364	12,4	1.197	9,4	0	0
CREDITO E ASSICURAZIONI	91	1,1	117	1,0	192	1,5	606	3,8
TOTALE	8.324	100	11.031	100	12.764	100	16.022	100

Il settore secondario, infatti, passa a *Guidonia - Montecelio* dai 1.735 addetti nel 1951 ai 6.575 nel 1981 (si transita cioè dal 39,2% al 40,5%). A *Tivoli* gli addetti vanno dai 4.417 del 1951 ai 6.311 del 1981 (si passa cioè dal 53,3% al 39,4%).

Da sottolineare il fatto che, nonostante nel periodo 1951 - 1981 si sia registrata una crescita numerica degli addetti del settore secondario, la percentuale è invece rimasta pressoché invariata a *Guidonia - Montecelio*, mentre si è addirittura ridotta a *Tivoli*.

Diversamente, il settore terziario, nello stesso periodo di riferimento, si è notevolmente sviluppato in entrambi in Comuni:

- a **Guidonia - Montecelio** si è passati dai 1.590 addetti del 1951, pari al 35,9%, ai 9.233 addetti del 1981, pari al 56,9%;
- a **Tivoli**, si è passati dai 3.046 addetti del 1951, pari al 36,6%, ai 9.936 addetti del 1981, pari al 62,0%.

Tabella 8: Unità locali e addetti per settore di attività economica al 1981, dati ISTAT. Estratto da: MICOLI P., *Le Acque Albule*, Università degli Studi di Roma “La Sapienza” - Istituto di Geografia, Semestrali di studi e ricerche di Geografia , Roma, 1993 (1), pp. 197, cfr. pag. 44.

1981	GUIDONIA MONTECELIO		TIVOLI	
	unità locali	addetti	unità locali	addetti
AGRICOLTURA	3	4	1	1
INDUSTRIA	298	3.169	293	3.806
COSTRUZIONI	171	415	97	306
ENERGIA ELETTRICA, GAS E ACQUA	1	9	18	263
TRASPORTI E COMUNICAZIONI.	114	301	69	730
COMMERCIO	962	2.223	1.217	2.604
SERVIZI E PUBBLICA AMMINISTRAZIONE	258	2.526	318	3.443
CREDITO E ASSICURAZIONI	57	197	126	457
TOTALE	1.864	8.844	2.139	11.610

A *Tivoli*, nel 1981, risultano 1.202 occupati nell'industria delle costruzioni. Di essi solo 306, il 25,5%, trovano occupazione nel Comune, gli altri vanno a lavorare fuori, probabilmente nella Capitale.

A *Guidonia - Montecelio*, nello stesso ramo di attività, su 1.487 persone occupate, solo 415, il 27,9%, lavora nel Comune di residenza.

Gli attivi nelle industrie estrattive (e manifatturiere) risultano 4.943 a *Guidonia - Montecelio* e 4.732 a *Tivoli*, contrariamente agli addetti che sono rispettivamente 3.169 e 3.806. Questi valori stanno a significare che gli addetti occupati nei Comuni di residenza sono rispettivamente 64,1% e 80,4%.

Il settore dei Servizi e della Pubblica Amministrazione contano (sempre nel 1981) 4.600 attivi a *Tivoli* e 4.869 a *Guidonia - Montecelio*, rispettivamente con 3.443 e 2.526 addetti. Questo sta ad indicare che il 74,8% lavora a *Tivoli* ed invece solo il 51,9% a *Guidonia - Montecelio*.

Il settore secondario si sviluppa maggiormente nel Comune di *Guidonia - Montecelio*, soprattutto per ciò che concerne le industrie estrattive e manifatturiere che, al 1981, contano 4.943 addetti, pari al 30,5% della totalità degli attivi mentre a *Tivoli* si registra una contrazione nello sviluppo del settore.

Come è possibile apprezzare dall'analisi dei dati riportati il **settore terziario** ha mostrato negli anni un notevole sviluppo in entrambi i Comuni, come è naturale che avvenga in un'area che vive in stretto rapporto con la Capitale.

1.1.3.2 Assetto territoriale

Mediante l'indagine geografica sono emersi elementi che hanno evidenziato il ruolo svolto nella trasformazione del territorio da una recente e veloce antropizzazione la quale, in forma esponenziale, è andata sempre di più a spalmarsi sopra alcune morfostrutture arealmente esistenti ma di difficile riconoscimento.

Attraverso il reperimento e la utilizzazione di *cartografia storica* (si vedano le riproduzioni da **Figura 47** a **Figura 53**) è stato possibile evidenziare alcuni aspetti della evoluzione geoambientale del territorio in analisi.

Nella selezione delle carte si è infatti pensato di proporre quelle contenenti uno specifico toponimo di riferimento areale, quello delle *Acque Albule*, o almeno alcuni elementi che dessero la possibilità di identificare in modo inequivocabile l'area in parola.



Figura 47: Stralcio della Carta d'ispirazione Volpaiana, contraffazione della ristampa del 1559.

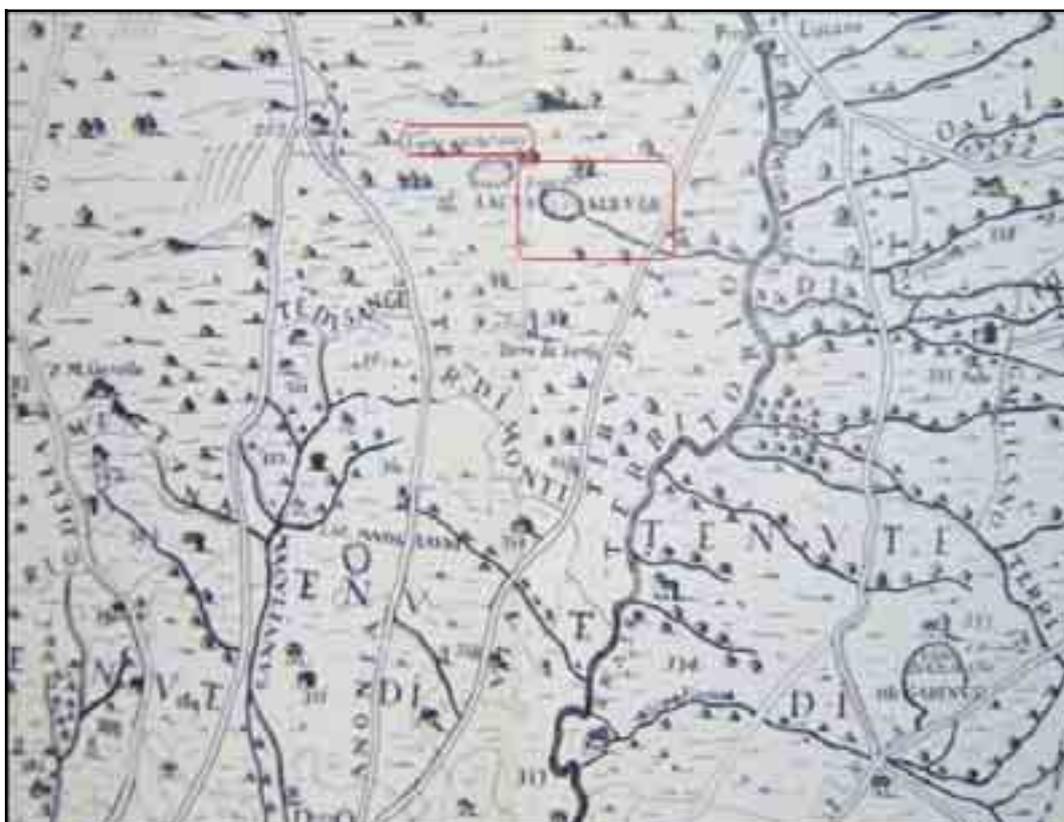


Figura 48: Stralcio della Carta, Giovanni Battista Cingolati, Foglio II (1692).



Figura 49: Stralcio della Carta, Diego de Revillas, (1739).

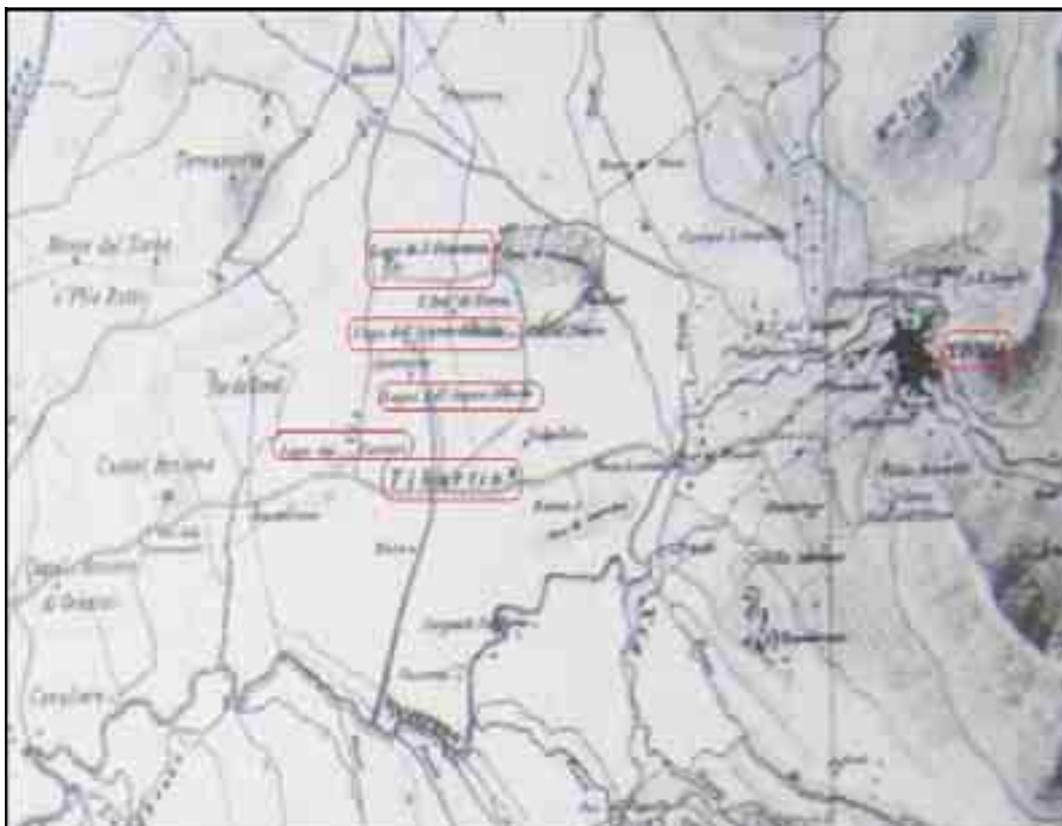


Figura 50: Stralcio della Carta, Sezione Topografica del Censo, parte destra del Foglio, Roma (1863).



Figura 51: Stralcio della Carta, Istituto Topografico Militare, F, 150, Tavoleta, Tivoli (1877).

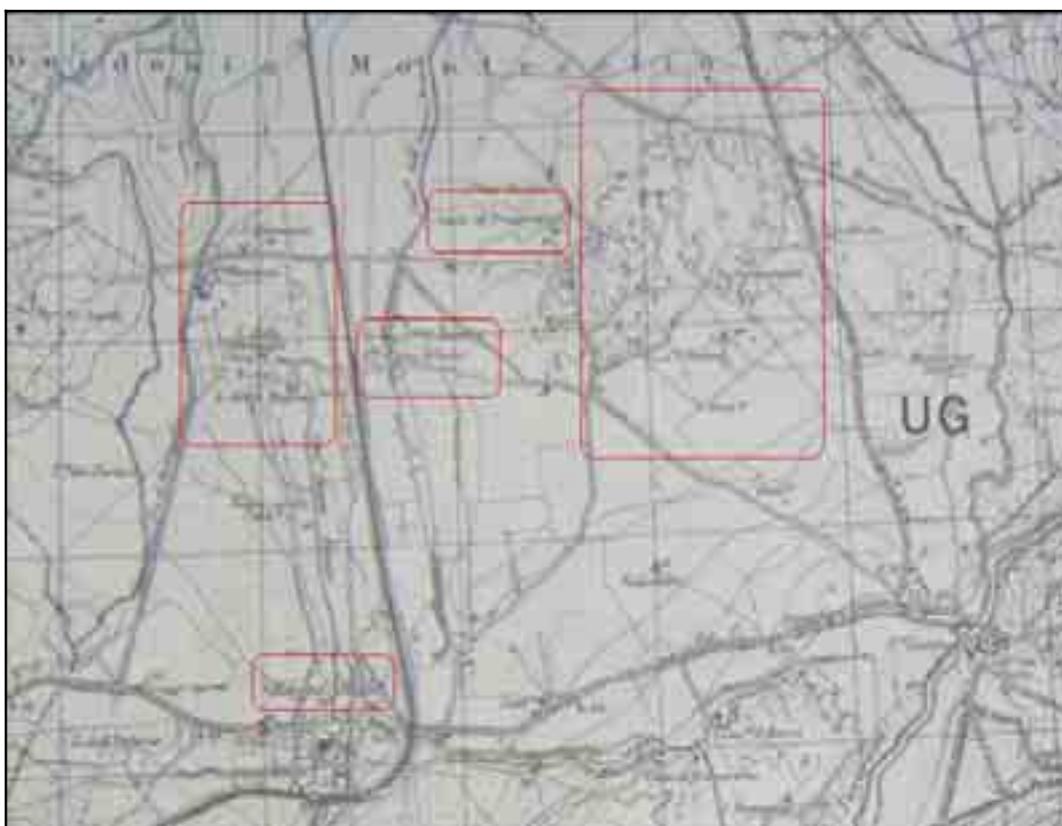


Figura 52: Stralcio della Carta, Istituto Geografico Militare, F. 150 della Carta d'Italia, scala 1:25.000, Tivoli (1936).

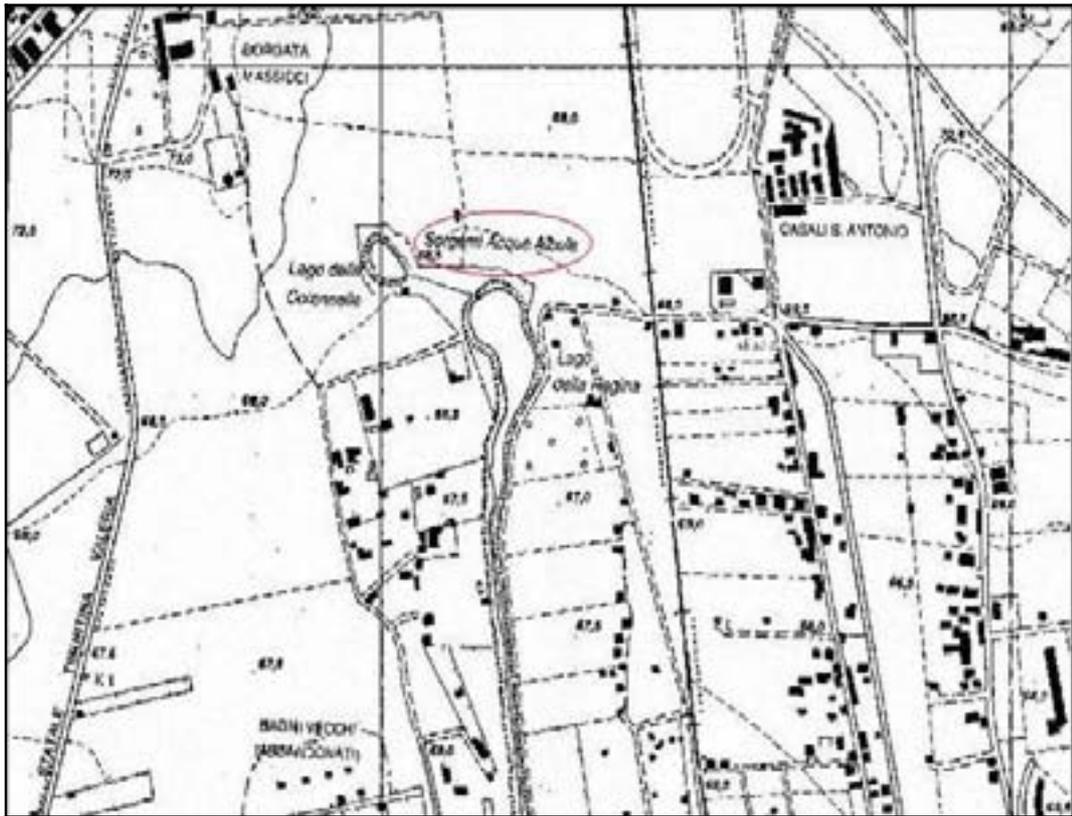


Figura 53: Stralcio della Carta Tecnica Regionale, scala 1:10.000, derivata da Ortofoto volo ITA - 2000

L'estesa area delle cosiddette *Acque Albule* ricade attualmente nella giurisdizione amministrativa dei Comuni di *Tivoli* e di *Guidonia - Montecelio*.

Come si è visto, essa corrisponde ad un territorio di alta concentrazione produttiva, con molte cave aperte ed altre in parte momentaneamente non attive. L'area ha una forte connotazione ambientale e paesaggistica grazie alla vicinanza del *Fiume Aniene* ed alla presenza di numerose risorse storiche, archeologiche e naturali. Questa territorialità si esprime anche con la presenza di particolari fenomeni fisici che ne caratterizzano un elevato grado di pericolosità quali: *subsidenza areale* e *sinkholes*, *considerevole sismicità* ed *emanazioni gassose* di natura vulcanica alquanto diffuse.

Si è potuto osservare che l'urbanizzazione, e di conseguenza il numero della popolazione residente, in questi ultimi cinquanta anni è cresciuta in modo esponenziale con una leggera flessione solo negli ultimi anni. Tutto ciò si sposa ben poco con i fenomeni fisici sopra citati come verrà successivamente descritto.

L'attività estrattiva, concentrata nelle zone del *Barco*, di *Vallepillella* e delle *Fosse*, produce all'anno circa 1.000.000 m^3 di materiale lapideo, il pregiato e famosissimo *travertino*.

Tutta l'area, come si è osservato, è al centro di un ampio sistema di relazioni di livello locale e metropolitano grazie anche alle molteplici attività produttive e di servizio che nel tempo sono state integrate con il settore estrattivo quali quelle dell'industria cartaria, della captazione delle acque, degli impianti termali, dell'industria edilizia.

Il settore estrattivo oggi ha dirette ricadute soprattutto di tipo economico ed occupazionale. La presenza di cave a cielo aperto e le stratificazioni a vista del banco di travertino contribuiscono fortemente alla caratterizzazione paesaggistica del territorio costituendo però anche un elemento di impatto negativo sulla qualità ambientale rispetto all'articolato del contesto territoriale.

È da rilevare anche un rapporto in antitesi tra i *cavatori* e la popolazione residente nelle aree limitrofe alle zone di escavazione. Questo fattore ha portato più volte, ma spesso senza le dovute verifiche tecniche, ad incriminare l'attività estrattiva come unica causa dei dissesti provocati sulle abitazioni circostanti.

Da alcuni anni infatti, nei Comuni di *Tivoli* e *Guidonia - Montecelio* si verifica un fenomeno di natura geologica che determina un abbassamento anomalo del terreno e che ha portato a gravi dissesti in centinaia di edifici compresi in un'area a forte intensità abitativa, sia di carattere residenziale che turistico-industriale.

Attraverso una serie di indagini geologico-tecniche, coordinate dall'*Area Difesa del Suolo* della competente *Direzione Ambiente e Protezione Civile* della **Regione Lazio**, si è giunti alla stesura di una relazione finale.

Tale elaborato tecnico ha confermato che una vasta porzione di territorio, fortemente urbanizzato ed a confine dei Comuni di *Guidonia - Montecelio* (Frazione di *Villalba*) e di *Tivoli* (Frazione di *Bagni di Tivoli*, ora *Tivoli Terme*), è interessata da una forte subsidenza che ha già causato gravi danni a centinaia di abitazioni civili ed innescato una situazione di rischio per i residenti coinvolti.

Gli elaborati sono stati ufficializzati alla Amministrazione Regionale in data 10/08/2005 da più *équipe* scientifiche facenti capo alle Università *La Sapienza* e *Roma Tre* le quali hanno effettuato indagini specifiche tra *Villalba* e *Tivoli Terme*, su una porzione di territorio di circa 20 *km*².

La sintesi degli studi è stata redatta il 20 agosto 2005 dal *Dr. Francesco Nolasco*, Dirigente della citata *Area Difesa del Suolo*.

La sintesi evidenzia, oltre alla descrizione dell'effettivo stato dei luoghi, l'estrema gravità della situazione sotto l'aspetto delle prospettive di chi vive, abita o lavora nei luoghi interessati dai fenomeni di collasso gravitativo.

Secondo queste risultanze ci si troverebbe di fronte a una *“crisi del sistema territoriale delle Acque Albule”* perché *“l'area è soggetta al fenomeno della subsidenza che, negli ultimi anni, ha subito una notevole accelerazione”*, fenomeno dovuto principalmente alle *“caratteristiche fisico-meccaniche e dalla situazione litostratigrafia dei terreni posti a copertura del substrato di travertino litoide, dotati di scadenti qualità geotecniche”*.

Fattore scatenante, però, sarebbero gli *“abbassamenti del livello di falda (...) che, negli ultimi 5/6 anni”*, sarebbe sceso di 5/6 metri, a causa del *“pompaggio delle cave (...) esaltato dal mese di maggio dal pompaggio del sistema sorgentizio Regina-Colonnelle per l'approvvigionamento delle piscine”* delle terme nella stagione estiva.

In conclusione, la venuta meno di presenza di acque nel sottosuolo *“potrebbe favorire la costipazione dei sedimenti non addensati con l'accelerazione o l'innescò del fenomeno di subsidenza”*.

La relazione esclude che *“il fenomeno si arresti in un prossimo futuro. Anzi, permanendo le attuali condizioni, esso è destinato a progredire ed anche con una certa velocità”*. *“L'area esaminata non era e non è idonea all'edificazione”*, ed i processi di subsidenza *“non sono controllabili né sanabili con interventi operativi. La zona, inclusa fra quelle note come ‘subsidenza catastrofica’, è già fortemente disastrosa e compromessa”* ed *“è geologicamente in evoluzione...”*. *“La situazione degli edifici è destinata a peggiorare (...); in presenza di sisma gli effetti sarebbero a dir poco catastrofici...”*. L'equipe di studiosi ritiene *“indispensabile programmare ed attivare, nell'immediato, interventi per la pubblica e privata incolumità”* (...). *“Dovrà essere valutata, tra l'altro, anche la possibilità del trasferimento dell'abitato, l'inibizione per le zone subsidenti a qualsiasi ipotesi urbanistica, il contenimento delle cause che accelerano i processi di subsidenza in un quadro di sviluppo sostenibile”*.

Questo stato di cose rendeva urgente e necessaria una **Dichiarazione di stato di calamità**. Infatti, la Giunta Regionale, con *Deliberazione n. 831 del 4 ottobre 2005*, ha provveduto formalmente a proclamare lo stato di calamità per il territorio delle frazioni interessate dal fenomeno ed ha stabilito che, per far fronte al grave rischio alle persone e ai beni, si rendevano indispensabili provvedimenti di carattere straordinario.

Tali provvedimenti sono tesi all'accertamento dettagliato dei danni, alla delimitazione dell'area di subsidenza e alla realizzazione di condizioni di sicurezza per le popolazioni residenti.

Negli ultimi anni si è registrato, inoltre, in particolare nelle aree dove sono ubicate le sorgenti di acqua termale e sulfurea denominate *Regina-Colonnelle* (ben note fin dall'antichità) una significativa riduzione della portata delle acque la quale è passata da 3.000 litri al secondo a circa 200 litri al secondo.

Tale portata non è dunque più idonea e sufficiente a garantire il funzionamento delle storiche *Terme di Tivoli*.

Come già accennato, contestualmente a questo preoccupantissimo depauperamento delle risorse termali, si sono registrate allarmanti lesioni in centinaia di fabbricati di *Villalba* e di *Tivoli Terme*, alcuni dei quali sono già stati dichiarati di fatto inagibili e sono stati quindi abbandonati dagli occupanti o dai proprietari.

Si intende ribadire che le indagini svolte dall'Università *La Sapienza* e dall'Università *Roma Tre* hanno inequivocabilmente concluso che la causa dell'abbassamento della *superficie piezometrica* è dovuta principalmente alle sollecitazioni dinamiche del pompaggio di acqua dalle cave di travertino in esercizio.

Gli strumenti estrattivi, che fino a qualche anno fa scavavano ed estraevano il travertino ad una profondità di circa 15-20 *m* dal piano campagna, grazie alle moderne tecnologie, ora riescono a scavare fino a 50-60 *m*. Quando, a 20 *m* di profondità, viene intercettata la falda acquifera termale, per poter estrarre il travertino e consentire di lavorare all'asciutto è necessario pompare l'acqua ed estrarla dal corpo di cava:

Le pompe utilizzate a tale scopo estraggono circa 2.800 litri di acqua al secondo.

Tali acque vengono estratte, captate e deviate dall'originario percorso sotterraneo naturale e fatte confluire, mediante opportune canalizzazioni, nel *Fiume Aniene*.

Questa attività antropica ha causato il depauperamento della risorsa termale ed ha anche provocato, ciò che preoccupa maggiormente tutti i residenti, lesioni gravissime ad edifici sia vecchi che nuovi di quelle aree.

Se ne deduce, inequivocabilmente, che l'attualità dei fenomeni è da attribuirsi esclusivamente a cause fisiche tra le quali vanno di certo annoverate quelle innescate dalla recente antropizzazione del territorio.

1.2 I fenomeni di subsidenza

Per *subsidenza* si intende un lento processo di abbassamento del suolo che arriva a interessare territori di estensione variabile. Questo fenomeno di sprofondamento, di solito della misura di qualche millimetro all'anno, è legato normalmente a cause naturali, quali i processi tettonici, il raffreddamento di magmi all'interno della crosta terrestre, il costipamento di sedimenti in superficie, le oscillazioni del livello di falda, ecc..

Tuttavia anche in questo fenomeno la mano dell'uomo può far sentire i suoi effetti, influenzando la velocità del movimento di abbassamento o addirittura innescando il fenomeno in alcune aree più vulnerabili e predisposte.

In tal caso la subsidenza indotta dall'uomo si esplica in tempi più brevi e con effetti che possono compromettere opere ed attività umane. Le cause più diffuse riguardano lo sfruttamento eccessivo delle falde acquifere, le bonifiche idrauliche e, nel passato, lo sfruttamento intensivo di giacimenti di idrocarburi. Il grado di urbanizzazione e industrializzazione di un'area "sensibile" alla *subsidenza* può quindi sia influenzare tale fenomeno, sia esserne condizionato.

Una problematica per alcuni versi affine a quella della *subsidenza*, ma che presenta maggiori implicazioni sul piano della protezione civile, è quella degli sprofondamenti rapidi (*sinkholes*). Tali fenomeni sono dovuti sia a cavità naturali già presenti nel sottosuolo, che a cavità realizzate dall'uomo a vari scopi (cave in sotterraneo, depositi, acquedotti, fognature, ecc.).

Quello degli sprofondamenti rapidi è un *rischio particolarmente diffuso nelle aree urbane* dove l'azione dell'uomo ha portato alla creazione di vuoti nel sottosuolo, per la maggior parte dei quali si è persa la consapevolezza della loro esistenza, a causa soprattutto della incontrollata crescita urbanistica degli ultimi decenni.

Il termine *sinkhole* (che tradotto letteralmente significa "buco sprofondato") è stato introdotto per la prima volta da FAIRBRIDGE (1968) per indicare una depressione di forma sub-circolare dovuta al crollo di piccole cavità carsiche sotterranee.

Successivamente il termine è stato ripreso da alcuni Autori (MONROE, 1970; JENNINGS, 1985; WHITE, 1988 ed altri autori) ed affiancato da un attributo che ne chiariva la genesi: sono stati distinti così tra i fenomeni carsici fenomeni di *solution sinkhole*, *collapse sinkhole* e *subsidence sinkhole*.

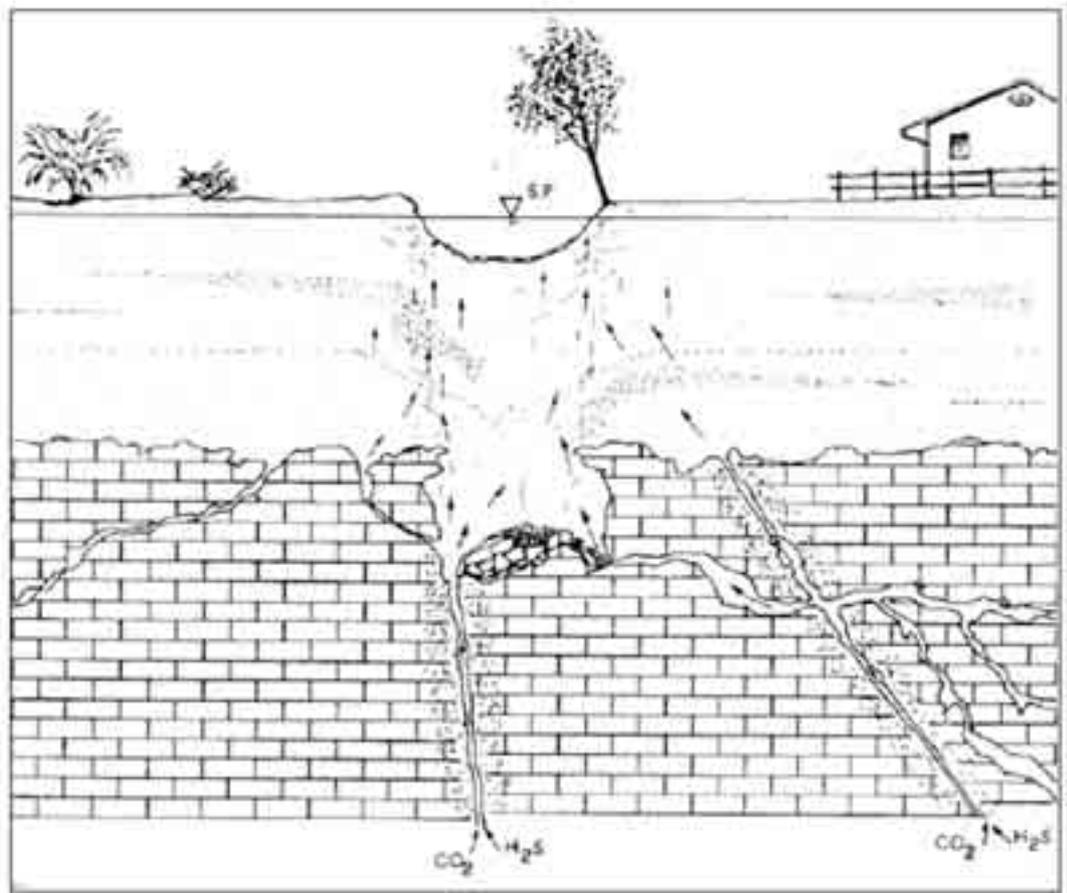


Figura 54: Modello schematico dello sviluppo di un *sinkhole*. Viene messo in evidenza che la circolazione di fluidi nel substrato carbonatico ha generato dei processi di dissoluzione carsica, con la formazione di una cavità carsica. Il crollo della volta della cavità si trasmette verso l'alto, attraverso l'intero spessore dei depositi di copertura, fino alla superficie, dove si forma una depressione che può essere riempita dall'acqua di falda. (Schema estratto da FACCENNA et AL., 1993).

Il termine *sinkhole* nella letteratura italiana indicava, in principio, ampie e profonde depressioni di forma sub-circolare con diametro e profondità variabili da pochi metri a centinaia di metri, a pareti sub-verticali che si aprono rapidamente in terreni a granulometria variabile.

Questi tipi di sprofondamento sono quasi sempre colmati da acque, spesso mineralizzate, che formano laghetti e specchi d'acqua; essi sono caratterizzati da una subsidenza che può localmente essere dovuta a presenza di sorgenti non affioranti.

Tali fenomeni sono localizzati in genere su allineamenti tettonici lungo i quali spesso si evidenziano anomalie di fluidi in risalita; la continua erosione delle pareti del camino provoca il progressivo colmamento della voragine, un aumento del diametro e nello stesso tempo una diminuzione della profondità dello specchio d'acqua, se presente.

La formazione di questi fenomeni è improvvisa, può essere realizzata in un evento unico o in più eventi con progressivo cedimento delle pareti.

I meccanismi di erosione dal basso potrebbero essere assimilati a processi di *suffosione profonda (deep piping)*, definiti da CASTIGLIONI (1986) come effetti meccanici dello scorrimento sub-superficiale dell'acqua nel terreno (in questo caso però il movimento sarebbe profondo) con dimensioni granulometriche variabili dalle argille alle ghiaie.

Il fenomeno si realizza quando il terreno è crepacciato o poroso e quando l'acqua abbondante e con pressione elevata riesce a trovare vie di scorrimento in cui passare con velocità abbastanza sostenuta. Il passaggio delle acque provoca l'erosione di materiale e la formazione di canalicoli e di condotti tubolari lungo le linee idrauliche di flusso.

Quest'ultimo fenomeno viene indicato nella letteratura anglosassone con il termine *piping*.

Sprofondamenti in cui è stata accertata la presenza di meccanismi di questo tipo possono venire definiti aggiungendo un attributo al termine per specificarne la genesi: ***piping sinkhole***.

I *sinkholes* si originano su pianure alluvionali, pianure costiere, conche intermontane, su strette valli fluviali generalmente di origine tettonica, in corrispondenza di successioni carbonatiche massicce carsificate, sedi di falde acquifere di grande potenza a cui si sovrappongono depositi fluvio-lacustri, lagunari, vulcanici o marini di potenza variabile.

Le aree caratterizzate da questi fenomeni, fortemente a rischio, vengono definite ***sinkhole prone areas***.

Esempi di aree di questo tipo si riscontrano principalmente nelle conche intramontane e nelle pianure costiere dell'Appennino Centrale e Settentrionale. Lazio e Toscana sono le Regioni a più alto rischio, in quanto sono ricorrenti tutte le condizioni al contorno citate ma fenomeni di questo tipo sono stati riscontrati anche in altre Regioni.

I *piping sinkhole* si formano per cause predisponenti ed innescanti. Essi si originano in contesti di complesse situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche del territorio che ne costituiscono le condizioni essenziali. Vengono peraltro innescati per motivi di diversa natura quali un sisma, un periodo di siccità, o una alluvione la quale può provocare una variazione rapida del livello piezometrico o anche per l'emungimento di grandi quantitativi di acqua dal sottosuolo.

Definire quale sia la causa principale è difficile poiché esse sono molteplici e generalmente concomitanti. Queste ultime possono essere distinte in *predisponenti* ed *innescanti* il processo e così riassunte:

Cause predisponenti

- Substrato carbonatico o costituito da roccia solubile (calcari, dolomie, evaporiti o rocce solfatiche) sottoposto a fenomeni carsici; la presenza di una morfologia del *bedrock* accidentata, sia a piccola che a grande scala, con macroforme carsiche (*doline*, *uvala*, *crepacci* e *grotte*) e con cavità carsiche presenti al tetto del substrato (interfaccia suolo/roccia) risultato di processi corrosivi e pedogenetici;
- Presenza di un pacco di sedimenti impermeabili o semi-permeabili al tetto del substrato costituito da limi, argille, sabbie a differente granulometria omogenee o eterogenee;
- Scadenti caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali costituenti il manto superiore (consolidazione, addensamento, resistenza);
- Presenza di un reticolo di fratture o faglie che permettano una maggiore circolazione idrica e una notevole erosione meccanica;
- Presenza di abbondanti acque di circolazione sotterranea;
- Presenza di gas nel sottosuolo, generalmente CO₂ e H₂S, che consentano la dissoluzione dei materiali di copertura e la risalita delle acque;
- Scarsa presenza di un manto vegetale che possa esercitare un effetto limitante nei confronti della mobilizzazione dei terreni.

Cause innescanti

- Intensità elevata delle precipitazioni piovose ed alternanza di periodi secchi e piovosi, risultano particolarmente favorevoli alla formazione delle oscillazioni del livello delle acque;
- Scosse sismiche;
- Attività antropiche (estrattive, emungimenti di acqua, ecc.). Il forte emungimento per uso irriguo ed idropotabile fa sì che si sviluppino, in prossimità dei pozzi, coni di depressione tali da far aumentare notevolmente la velocità dei flussi idrici e quindi l'asportazione delle particelle dei sedimenti e la subsidenza delle coperture alluvionali.

Il modello geologico concettuale, affinché si verifichi un *sinkhole* di questo tipo, prevede la presenza al di sopra del *bedrock* carbonatico carsificato di un potente pacco di depositi di copertura. Come accennato, le dimensioni granulometriche degli elementi della copertura possono essere variabili ma generalmente si tratta di argille-sabbiose, limi, sabbie con intercalazioni di ghiaie. Associazioni sedimentarie di questo tipo determinano nell'intero pacco un certo grado di coesione e una portanza naturale.

Appare molto improbabile un risentimento in superficie, per il consistente spessore dei materiali di copertura in molti dei casi verificatisi in Italia (fino a 200 *m* di profondità), di un fenomeno di crollo a partire da una cavità profonda, mediante processi di *raveling* (scorrimento di materiale verso il basso), soprattutto per la presenza di orizzonti argillosi impermeabili. Inoltre, nei casi di *sinkholes* di questo tipo studiati sul territorio nazionale, si osserva l'assenza di movimenti di infiltrazione verso il basso delle acque di circolazione idrica sotterranea in grado di drenare il materiale di copertura.

Il fenomeno è poi facilitato se all'interno del pacco di sedimenti sono presenti lenti di terreni carsificabili (quali travertini, o ghiaie di natura prevalentemente carbonatica) mentre non risultano registrati tuttora casi di *piping sinkhole* formati su argille dotate di elevata coesione (ad esempio argille azzurre, marine particolarmente coesive, di età pliocenica).

Per effetto del *piping* si ha la propagazione di una cavità all'interno del materiale di copertura, a partire dal tetto del *bedrock* verso l'alto. Il fenomeno procede verso l'alto fino a quando il terreno di copertura, non sopportando più gli sforzi di taglio, collassa dando luogo ad una voragine che si forma velocemente nell'arco di 6-24 ore.

La profondità a cui solitamente può avvenire il collasso finale è pari a una trentina di metri. La cavità risale perciò verso l'alto fino a circa 30 *m* dal piano campagna, dopo di che si registra il crollo.

Il meccanismo di formazione sarebbe dunque legato anche all'azione erosiva delle acque, ricche di gas, in pressione e in risalita. La risalita di fluidi profondi tramite processi di *upwelling* risulta poi essere controllata da discontinuità presenti nel *bedrock* che vanno a rappresentare delle vere e proprie vie di fuga, oltre che per i gas anche per le acque in pressione dell'acquifero profondo.

Un possibile innesco dei fenomeni di *piping* è rappresentato da eventi sismici che determinano la rottura di un equilibrio metastabile.

Infatti, il passaggio di onde sismiche provoca, unitamente al cambiamento dell'assetto dei granuli, un incremento della pressione di poro che, se raggiunge i valori della pressione litostatica determinata dal carico dei materiali soprastanti, porta al manifestarsi del fenomeno conosciuto come *liquefazione dei terreni*. La caratteristica morfologica che contraddistingue i *piping sinkhole* è data, peraltro, dalle pareti delle cavità che risultano perfettamente verticali, il diametro e le profondità raggiungono anche alcune decine di metri. Uno degli effetti più evidenti è “l’annegamento” dei *sinkholes* (*drowning*), determinato dall’acqua presente nei terreni di copertura. Non è infrequente infatti che, al verificarsi di uno sprofondamento catastrofico, in un’area dove il tetto della falda dell’acquifero più superficiale è prossima alla superficie topografica, l’acqua di falda si riversi all’interno della depressione dando a questa la caratteristica fisionomia di un piccolo lago. Quando la profondità della voragine è pari o superiore alla quota piezometrica della falda, il lago viene alimentato da quest’ultima. In tale situazione il livello dell’acqua all’interno del piccolo invaso subisce delle fluttuazioni stagionali, poiché strettamente collegato agli eventi pluviometrici, con minimi nella stagione estiva. In alcuni casi, durante i periodi di siccità estiva, si assiste al prosciugamento del lago stesso.

In altri casi si osserva, invece, che il laghetto ormai formato non subisce nessuna variazione stagionale di livello. Inoltre è possibile osservare sulla superficie del corpo liquido la fuoriuscita di bolle dovute a risalite di gas. In questi casi particolari si può registrare anche la presenza di piccole emergenze sul fondo del lago. Quando la portata delle sorgenti è notevole è possibile che si formi anche un piccolo emissario. In questo secondo caso si può supporre che il fenomeno di annegamento sia influenzato dalla presenza di acquiferi in pressione all’interno del *bedrock* carbonatico e che i fenomeni di risalita di fluidi profondi (acqua e gas) nei sedimenti di copertura operino in maniera diretta sull’evoluzione di sprofondamenti catastrofici in superficie. È possibile classificare il fenomeno all’interno della tipologia *piping sinkhole*. La risalita delle acque profonde tramite processi di *upwelling* risulta essere controllata da discontinuità (faglie o fratture) presenti nel *bedrock* e nella copertura sedimentaria stessa. Quest’ultima può raggiungere spessori anche notevoli (100-200 m). Il *sinkhole* risulta essere così in collegamento con l’acquifero basale attraverso un condotto che ha le stesse caratteristiche di un pozzo artesiano che capti acqua in profondità.

Tale processo è stato più volte suffragato da analisi geochimiche delle acque e dei gas disciolti che hanno confermato l’origine profonda (CIOTOLI et altri, 1998, 2000).

1.3 Analisi del rischio

1.3.1 Il Rischio

Per quanto riguarda i concetti generali di Rischio, Pericolosità, Vulnerabilità, Elementi a rischio, ecc., vengono riportate di seguito le relative definizioni, prendendo a riferimento in particolare quelle dell'UNESCO (WP/WLI, 1993 a; WP/WLI 1093 b).

Pericolosità (P)

Probabilità che un potenziale evento dannoso investa una data area, con una determinata intensità, in un periodo di tempo definito (in termini di probabilità annuale).

La definizione della pericolosità di un'area è in funzione di tre componenti:

- valutazione dell'area interessata (susceptività);
- valutazione dell'intensità del fenomeno atteso;
- valutazione della frequenza dell'evento, cioè del tempo di ritorno.

Elementi a rischio (E)

Elemento o insieme di elementi (vite umane, attività economiche, edifici, infrastrutture, reti di servizio, ecc.) esposti alla probabilità che in un dato periodo di tempo essi possano essere investiti da un evento estremo di una determinata intensità.

Il D.P.C.M. del 29 settembre 1998, “*Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art.1 commi 1 e 2, del decreto legge 11 giugno 1998 n.180*” individua per una data area i seguenti **Elementi a rischio**:

- l'incolumità delle persone;
- gli agglomerati urbani, comprese le zone di espansione urbanistica;
- le aree su cui insistono insediamenti produttivi, impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi della Legge;
- le infrastrutture e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- il patrimonio ambientale ed i beni culturali di interesse rilevante;
- le aree sede di servizi pubblici e privati, impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive e infrastrutture primarie.

Vulnerabilità (V)

Grado di perdita prodotto su un elemento o su una serie di Elementi esposti a rischio (E) risultante dal verificarsi di un evento dannoso di una intensità data. Il suo valore viene espresso in una scala da 0 (nessuna perdita) ad 1 (perdita totale). Le aree caratterizzate da un determinato livello di pericolosità, che potrebbe arrecare danno alle persone e alle cose, costituiscono le aree vulnerabili. In altre parole, la vulnerabilità esprime la correlazione esistente tra l'intensità di un evento ed il danno atteso.

Rischio

Il *Rischio* è funzione della Pericolosità e della Vulnerabilità. Esso può essere sinteticamente definito come probabile perdita di valore di un elemento esposto al pericolo o, in altri termini, come la quantificazione del valore atteso delle perdite (umane e materiali) dovute ad un particolare evento dannoso. La determinazione del *Rischio specifico* consente di valutare gli effetti di un fenomeno, indipendentemente dalla valutazione degli elementi esposti a rischio e del loro valore, operazione non sempre agevole, in considerazione delle difficoltà insite nei processi di stima economica dei beni.

Rischio specifico (R_s)

Grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare evento di data intensità, espresso in termini di probabilità annuale o tempo di ritorno. Il *Rischio specifico* è funzione della *Pericolosità* e della *Vulnerabilità*:

$$R_s = P \times V$$

Rischio totale (R_{tot})

Valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un evento dannoso:

$$R_{tot} = P \times V \times E = R_s \times E$$

Analisi del Rischio

Insieme delle valutazioni sulla *Pericolosità*, sulla *Vulnerabilità* e sugli *Elementi a rischio* fino alla determinazione della loro interazione, cioè del *Rischio totale*.

1.3.2 Le emissioni gassose in area vulcanica

Alcuni studi specifici (FUNICIELLO e PAROTTO, 1978) evidenziano che nell'area dei *Colli Albani* (Figura 55) sono presenti due acquiferi principali, uno contenuto nella stessa coltre vulcanica superficiale e il secondo nei sottostanti terreni carbonatici.

La falda più importante (quella di base) ha per letto i depositi terrigeni impermeabili plio-quadernari, prevalentemente argillosi con intercalazioni di sabbia e conglomerati.

La coltre vulcanica contiene anche falde sospese minori, separate da livelli a bassa permeabilità e comunicanti tra loro (CAPELLI *et Al.*, 2000).



Figura 55: Modello Digitale del Terreno (DTM) dell'area del Vulcano dei Colli Albani. Da: FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M. L., BARBERI F., *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, in *Rend. Fis. Accademia dei Lincei*, S. 9, V. 13, 2002, pp. 113-143, cfr. pag. 125. IMMAGINE MODIFICATA.

L'acquifero profondo è separato da quelli più superficiali e non vi sono evidenze che i due acquiferi principali siano in comunicazione tra loro ma certamente, in corrispondenza degli alti strutturali del basamento carbonatico e in zone di alta permeabilità verticale (faglie o fratture), i gas profondi risalgono alla superficie e vi producono alcune importanti manifestazioni (GIGGENBACH *et Al.*, 1988; GIORDANO *et Al.*, 2000; CHIODINI e FRONDINI, 2001; CARAPEZZA *et Al.*, 2002a).

Le manifestazioni principali si trovano in due settori dell'area (**Figura 55**) rispettivamente a nord ovest (*Acque Albule* nella zona dei famosi depositi di travertino di Tivoli e Cava dei Selci) e a SW del Lago Albano (Trigoria, Zolforata, Acqua Solfa, Lavinio–Tor Caldara) e sono condizionate dall'assetto geologico-strutturale (FACCENNA *et Al.*, 1994).

La composizione chimica ed isotopica di questi gas è riportata nella **Tabella 9**.

Tabella 9: Composizione chimica e isotopica dei gas. Da: FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M. L., BARBERI F., *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, in Rend. Fis. Accademia dei Lincei, S. 9, V. 13, 2002, pp. 113-143, cfr. pag. 136, MODIFICATA.

	Lago Regina (Acque Albule)	Lago Albano (bordo nord)	Cava dei Selci	Zolforata
He (ppm)	19,0	n.d.	n.d.	5,3
H ₂ (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
O ₂ (ppm)	0,0	9,9	0,4	0,0
N ₂ (%vol)	8,8	37,9	1,6	0,8
CO (ppm)	0,6	1,4	n.d.	n.d.
CH ₄ (ppm)	631,0	n.d.	417,5	108,7
CO ₂ (%vol)	92,5	54,8	98,1	99,2
H ₂ S (%vol)	n.a.	n.a.	0,8	n.a.
$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰PDB)	-2,99	-0,40	1,39	1,23
³ He/ ⁴ He (R/R ₀)	0,68	1,21	1,46	0,95

L'anidride carbonica è sempre la componente principale, seguita da contenuti variabili di H₂S, N₂, CH₄. Di notevole interesse sono i valori relativamente alti del rapporto isotopico ³He/⁴He (da 0.68 a 1.46 volte più alto che nell'aria) i quali stanno ad indicare un contributo di un componente profondo, probabilmente magmatico. La composizione isotopica della CO₂ è compatibile sia con un'elevata temperatura d'origine (magmatica) sia con una provenienza dal basamento carbonatico marino (GIGGENBACH *et Al.*, 1988).

L'importanza dell'emissione di anidride carbonica in alcune di queste zone è indicata dagli alti valori di CO₂ nelle acque (PIZZINO *et Al.*, 2002) e dai valori elevati del flusso di CO₂ dal suolo nei dintorni delle manifestazioni stesse.

L'insieme dei dati indica quindi la presenza di serbatoi di gas pressurizzati ricchi di CO₂, probabilmente contenuti nella parte alta dell'acquifero della serie carbonatica.

Il gas, risalendo in superficie lungo le fratture, interagisce con le acque più superficiali, arricchendole in CO₂ e generando così le manifestazioni superficiali di emissione di gas.

La presenza di questi sistemi pressurizzati è dimostrata, oltre che dai dati geochimici, dall'esplosione accidentale avvenuta nel gennaio 1986 in un pozzetto di esplorazione geotermica ubicato sul versante dei *Colli Albani*, circa 6 km a SW di Ariccia.

In questo caso l'acquifero pressurizzato era contenuto in un livello di sabbie pre-vulcaniche a 230 m di profondità.

Aumenti di temperatura, in relazione a terremoti anche lontani, sono segnalati per le *Acque Albule* (Tivoli), in un pozzo presso la *Zolforata* nel 1980 e nel *Pozzo Barozze* a *Rocca di Papa* nel 1988 (da 10 a oltre 50 °C).

In ogni caso, i dati suggeriscono che è probabile che, in occasione di eventi sismici che aumentino la permeabilità verticale, risalgano verso la superficie importanti masse di CO₂ e acque calde (e forse vapore) con temperature da 50 ad oltre 100°C. (MARTINI *et Al.*, 1994; CIONI *et Al.*, 2002; CARAPEZZA *et Al.*, 2002b).

I dati presentati indicano che vi sono una serie impressionante di evidenze di natura geologica, geocronologica, archeologica, storica e paleobiologica, tutte convergenti nell'indicare che dal cratere del *Lago Albano* si sono verificati eventi eruttivi e vari eventi catastrofici di fuoriuscita violenta delle acque con formazione di colate di fango (*lahar*) che hanno devastato la zona della *Piana di Ciampino*, in epoca successiva alla messa in posto del *Peperino Albano*, finora considerato l'ultimo episodio eruttivo dei *Colli Albani*.

Tabella 10: Fenomeni anomali nell'area dei Colli Albani in relazione ad eventi sismici (dati inediti e da MERCALLI, 1883; DE ROSSI, 1874; INGV, 2002). Estratto da: FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M. L., BARBERI F., *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, in Rend. Fis. Accademia dei Lincei, S. 9, V. 13, 2002, pp. 113-143, cfr. pag. 139, MODIFICATA.

Tipo di manifestazione	Data e luogo della manifestazione	Possibile evento sismico correlato
Emissione di gas, vapori e fumi	361 B.C., Roma	361 A.C. Roma?
Emissione di H ₂ S	1734, Ariccia	7-8 Giugno, Colli Albani
Rismani e nuoni	1762, Colli Albani	Gennaio-Febbraio, Colli Albani, sciami sismici
Emissione di H ₂ S	1773-1774, Ariccia	18 Genn.-15 Ott. 1773, Colli Albani
Aumento di concentrazione di H ₂ S nelle sorgenti	26-30 Agosto 1806, M. Faola	26-30 Agosto, Colli Albani
Emissioni di vapori	1809 Montecompatri	Montecompatri
Impoverimento e abbassamento del livello del lago (5 m)	Maggio 1829, laghi di Albano e Nemi	Maggio-Luglio, Colli Albani, sciami sismici
Tremori ed emissioni di gas	1848, 1849, 1850 lago Albano, valle Cima?	Molti eventi nell'area romana
Emissioni di gas	Settembre 1862, Roma	?
Aumento di temperatura e emissioni di gas	24 Aprile 1872, edificio delle Fosse	25-26 Aprile, Rocca di Papa
Emissioni di gas e aumento della temperatura delle acque	Fine Aprile 1872, Bagni di Tivoli	idem
Emissioni di gas, vapori e aumento della temperatura delle acque, «sabbie»	1873, Frattocchie, Cava dei Selci, lago Albano	19 Gennaio, Colli Albani
Emissioni di gas e vapori	1877, Acqua Albula, Zolforata	Dal 16 Agosto in poi, dai Colli Albani alla Valle Latina, sciami sismici
Aumento della temperatura delle acque (da 10 °C a 50 °C) e variazione della composizione chimica, emissione di CO ₂	24 Novembre 1980, Acqua Albula, Zolforata	23 Novembre, Appennino meridionale, Ipinia
Fine della variazione di temperatura delle acque iniziata dopo Tremas 1980 Ipinia	Maggio 1981, Zolforata	Maggio, Colli Albani
Aumento della temperatura delle acque	1982, lago di Nemi, M. Gentile	Colli Albani
Aumento della temperatura delle acque (>51 °C)	7 Dicembre 1988, Rocca di Papa (pozzo Batuzzi)	?
Aumento della temperatura delle acque (>40° C)	1989, Ciampino	1989-90, Colli Albani
Emissioni generalizzate di CO ₂ , diminuzione pH acque	2 Novembre 1995, Ciampino, Marino	2 Novembre 1995, Terracina 1 Novembre 1995, Tivoli
Emissione di CO ₂	2000, Bagni di Tivoli	Appennino centrale, Monti Ruffi

La presenza, intorno al *Lago Albano*, di zone a forte emissione di CO₂ e la connessione ripetutamente osservata anche in anni recenti tra terremoti ed aumento dell'emanazione gassosa e della temperatura di alcuni pozzi e sorgenti (**Tabella 10**), indicano che ancor oggi esistono nell'area acquiferi geotermici pressurizzati, ricchi di anidride carbonica e con una temperatura che arriva fino a circa 100°C.

Alla luce di queste considerazioni, assumono grande rilevanza i fenomeni sismici e di sollevamento areale del vulcano che potrebbero indicare una dinamica in atto del sistema vulcanico-geotermico dei *Colli Albani*.

L'abbassamento della falda acquifera riscontrato negli ultimi 40 anni ed imputato al suo eccessivo sfruttamento (CAPELLI *et Al.*, 2000), aggrava la situazione per la maggiore quantità di CO₂ che dovrebbe esservi accumulata.

Un risentimento sismico potrebbe causare un'eruzione freatica sublacustre, o comunque produrre una forte iniezione di fluidi caldi ricchi di CO₂ sul fondo del lago che a loro volta potrebbero innescare un processo di rovesciamento dell'acqua. Il basso livello attuale del Lago non dovrebbe consentire il superamento della soglia del bordo craterico e quindi la formazione di *lahar* mentre, la liberazione di pericolose nubi di CO₂ rimane purtroppo un evento possibile dal *Lago Albano*, anche se la concentrazione di CO₂ risulta attualmente lontana dal livello di saturazione (CARAPEZZA *et Al.*, 2002a, b).

Alla prospettiva di riattivazione eruttiva in un futuro più o meno lontano, si aggiunge quindi la pericolosità connessa a fenomeni di esondazione o alla formazione di nubi di gas tossici, che sono ripetutamente avvenuti in un passato geologicamente molto recente.

1.3.3 Le informazioni telerilevate

Si è già parlato in maniera approfondita delle *tecniche di telerilevamento* nella PARTE PRIMA della presente indagine. Appare tuttavia opportuno ricordare che sono molteplici le applicazioni in cui i dati telerilevati riescono a fornire un utile, se non addirittura indispensabile, contributo.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati e realizzati sensori per il telerilevamento che permettono di ricavare informazioni anche molto differenti tra loro come ad esempio la temperatura della superficie terrestre, lo stato di salute delle coltivazioni, gli andamenti topografici del terreno, la distribuzione dei gas presenti in atmosfera, ecc. .

Di seguito si riportano alcuni esempi di applicazioni fatte a partire da dati telerilevati che hanno permesso di acquisire informazioni specifiche e di monitorare i movimenti del terreno nel cosiddetto ***Bacino delle Acque Albule***.

1.3.3.1 Analisi delle deformazioni con la tecnica dei Diffusori Permanenti

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha intrapreso (in collaborazione con la società TeleRilevamento Europa - TRE) un'indagine finalizzata allo studio dei fenomeni di sprofondamento improvviso della superficie topografica (*sinkholes*).

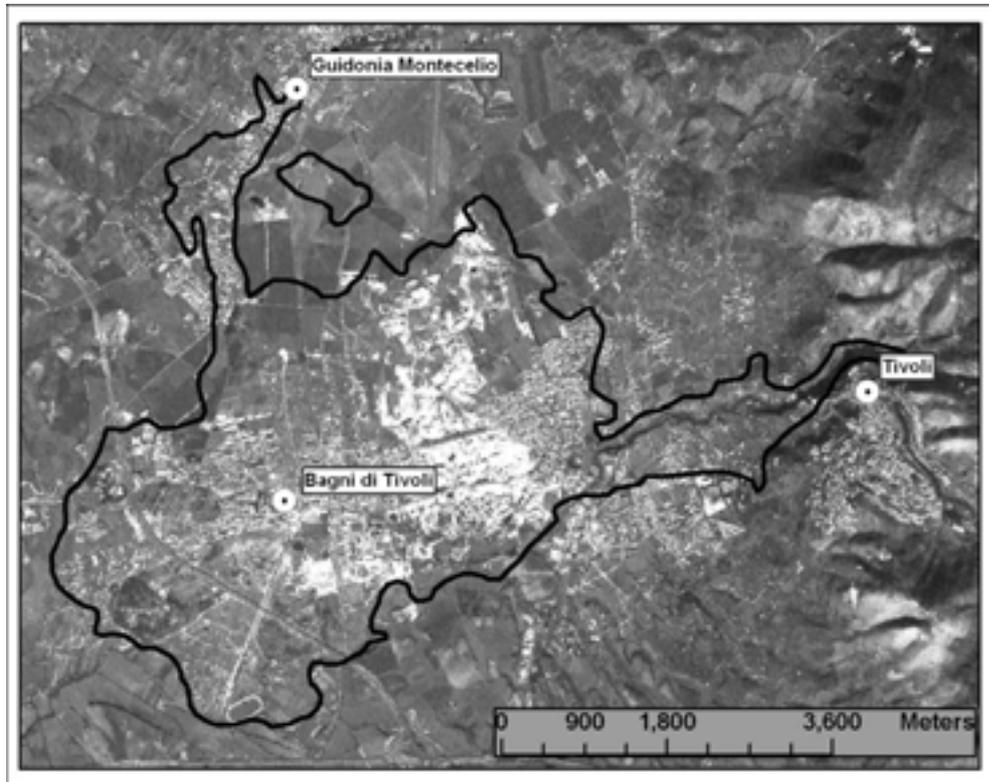


Figura 56: L'area del bacino delle Acque Albule vista dal satellite SPOT. Il poligono indica l'estensione degli affioramenti di travertini; le aree ad alta riflettanza (bianche) corrispondono generalmente alle zone di cava. Estratto da: SALVI S., PIRRO M., GASPARINI C., STRAMONDO S., PAGLIUCA M. N., ATTORI S., COLINI L., TOLOMEI C., DOUMAZ F., FERRETTI A., ALLIEVI J., *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del bacino delle acque albule (Lazio)* in AA.VV., *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, Atti del 1° Seminario a cura del Dipartimento Difesa del Suolo - APAT, I.G.E.R., Roma, 2004, pp. 709, cfr. pp. 623 - 632.

A tale scopo sono state utilizzate circa 100 immagini SAR acquisite dai satelliti ERS1 e ERS2, successivamente analizzate tramite la tecnica detta degli "Scatteratori Permanenti".

Quest'ultima consiste in una metodologia di analisi di serie temporali di immagini SAR che consente di raggiungere elevate accuratezze di misura delle velocità di spostamento del suolo (fino a 1 *mm/anno*) in corrispondenza di punti stabili dal punto di vista della risposta radar.

La tecnica degli *Scatteratori Permanenti* (*Permanent Scatterers – PS*), ideata dal Politecnico di Milano (FERRETTI *et Al.*, 2001) e successivamente sviluppata dalla Società TeleRilevamento Europa (TRE) consiste nell'identificazione e nell'analisi della risposta di fase di alcuni riflettori naturali stabili (costruzioni, rocce, ecc.) detti comunemente *Scatteratori Permanenti* (o *Diffusori Permanenti*).

Usando lunghe serie temporali di immagini SAR (almeno in numero di 20) è possibile stimare con estrema precisione i vari contributi alla *fase interferometrica* ed isolare la velocità di spostamento del singolo *PS*.

L'esame di dati ERS relativi al periodo 1992-2000 ha consentito di individuare, nell'ambito del *Bacino delle Acque Albule*, numerosi punti in forte subsidenza (con velocità di alcuni *mm/anno*) che ben si correlano alla presenza di *sinkholes*.

Per l'area del *Bacino delle Acque Albule* sono state elaborate dalla Società TRE numero 66 immagini ERS da orbita discendente e 33 da orbita ascendente, riuscendo ad individuare rispettivamente 6200 e 5100 *PS* di buona qualità (**Figura 57**). La maggior parte dei *PS* nell'area considerata è costituita da edifici o comunque da manufatti, con una densità che è quindi dipendente dal livello di urbanizzazione.

Il punto di riferimento per le velocità dei *PS* corrisponde alla stazione *GPS* permanente posta presso la sede INGV di Roma, la cui velocità è stata calcolata per il periodo 2001-2004.

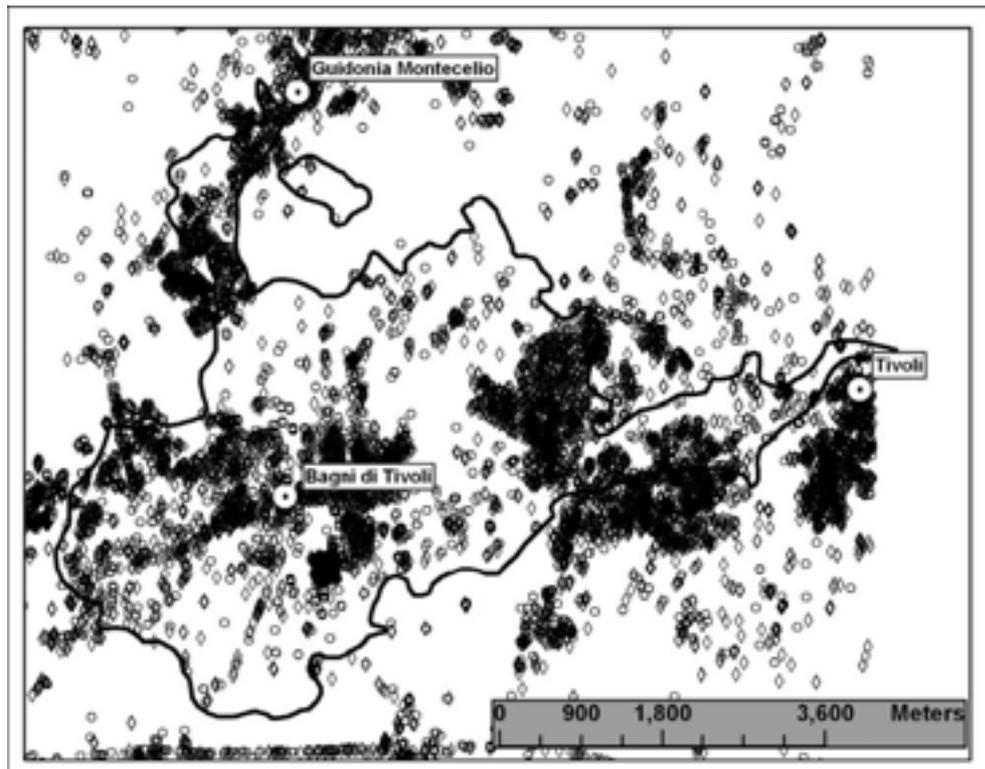


Figura 57: Gli *Scatteratori Permanenti* individuati nell'area (rombi: *PS* da orbita discendente, cerchi: *PS* da orbita ascendente). Su ogni punto è disponibile la velocità media nel periodo 1993-2000. Estratto da: SALVI S., PIRRO M., GASPARINI C., STRAMONDO S., PAGLIUCA M. N., ATTORI S., COLINI L., TOLOMEI C., DOUMAZ F., FERRETTI A., ALLIEVI J., *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del Bacino delle Acque Albule (Lazio)* in AA.VV., *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, Atti del 1° Seminario a cura del Dipartimento Difesa del Suolo - APAT, I.G.E.R., Roma, 2004, pp. 709, cfr. pp. 623 - 632.

L'analisi dei *PS* mostra la presenza nell'area di due diversi tipi di deformazioni del suolo caratterizzati da scale diverse. Il primo tipo è rappresentato dalla presenza di singoli *PS* che mostrano tassi di subsidenza molto più forti (fino a 10 *mm/anno* ed oltre) di quelli delle aree immediatamente adiacenti. Tali punti sono stati individuati tramite un'analisi degli *outliers* sulle distribuzioni di velocità dei *PS* ricadenti in sottoaree di 500 x 500 *m*.

Il livello di soglia per gli *outliers* è stato definito come la *media della velocità* più tre volte la *deviazione standard*. Con questo criterio sono stati così individuati 51 *PS* discendenti e 40 *PS* ascendenti, caratterizzati da velocità di subsidenza “*anomale*” come mostrato in **Figura 58**. Questi punti sono distribuiti abbastanza uniformemente all'interno dell'area del Bacino.

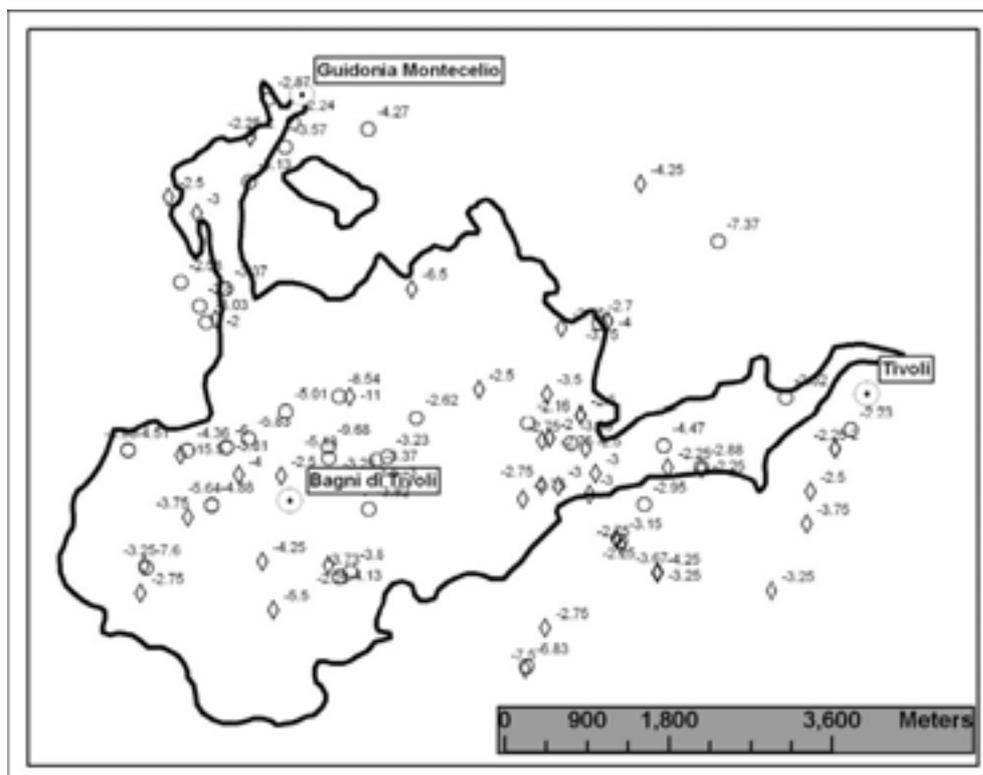


Figura 58: *PS con velocità di subsidenza anomale individuati tramite l'analisi degli outliers (rombi: PS da orbita discendente, cerchi: PS da orbita ascendente). Sono indicate le velocità in mm/anno. Estratto da: SALVI S., PIRRO M., GASPARINI C., STRAMONDO S., PAGLIUCA M. N., ATTORI S., COLINI L., TOLOMEI C., DOUMAZ F., FERRETTI A., ALLIEVI J., *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del bacino delle acque albule (Lazio)* in AA.VV., *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, Atti del 1° Seminario a cura del Dipartimento Difesa del Suolo - APAT, I.G.E.R., Roma, 2004, pp. 709, cfr. pp. 623 - 632.*

Il secondo tipo di deformazione osservato nell'area è rappresentato da una subsidenza generalizzata del settore centrale del bacino. L'area in subsidenza si estende per circa 6 chilometri in direzione NS, con una larghezza di circa 1.5 chilometri. I tassi di deformazione sono pari a circa -10 *mm/anno* nella parte settentrionale e diminuiscono rapidamente verso S.

In linea generale è possibile individuare due categorie di cause: cedimenti del terreno o cedimenti strutturali del manufatto. Mentre la presenza della prima è quasi sempre accompagnata anche dalla seconda, i cedimenti strutturali del manufatto possono verificarsi anche indipendentemente dai cedimenti del terreno.

Fermo restando che le cause devono essere determinate con uno studio mirato caso per caso, sono stati eseguiti dei sopralluoghi speditivi per vedere se esistessero degli elementi comuni agli *outliers* individuati.

L'errore di localizzazione dei *PS* sul terreno è stimato in circa 15 m ed è quindi stato possibile individuare quasi tutti i manufatti che li originano. Il risultato è che molti di essi sono edifici caratterizzati da danni più o meno gravi alle strutture, per lo più evidenziati da fratture nelle murature portanti o nelle tamponature, dislocazioni di solette, flessioni di muretti anche in cemento armato, ecc. .

Una buona percentuale degli *outliers* è costituita da edifici ad uno o due piani, di circa 30-40 anni di età, per i quali è difficile ipotizzare solo cedimenti di tipo strutturale, come anche cedimenti differenziali dovuti a normale consolidamento del terreno.

Come detto in precedenza, gran parte del *Bacino delle Acque Albule* presenta una stratigrafia del sottosuolo caratterizzata da banconi di travertino compatto di spessori metrici e decametrici, intervallati da livelli solitamente poco spessi di depositi piroclastici rimaneggiati.

Non esistono quindi le premesse sedimentologiche (presenza di argille poco consistenti o sabbie sature) per poter imputare le deformazioni a processi di consolidamento, se non in situazioni particolari. D'altra parte, come già ricordato, sono riconosciuti nell'area alcuni *sinkholes*, sia allagati come il *Lago delle Colonnelle*, il *Lago della Regina*, il *Lago di S. Giovanni*, sia asciutti come nel caso del *Lago dei Tartari* e del *Lago dell'Inferno*, drenati con gli interventi di bonifica della fine dell'800.

Nelle aree di questi ultimi due bacini sono presenti degli *outliers* che indicano una forte velocità di subsidenza. In particolare nel *Lago dei Tartari* si registra per *PS* una velocità di abbassamento pari a -15.5 mm/anno e un'altro, 40 m all'esterno del bordo dell'invaso lacustre originario, con velocità di -4.4 mm/anno (**Figura 59**).

Sul lato N del *Lago dei Tartari* i punti a forte velocità corrispondono ad alcuni edifici e manufatti del complesso scolastico *ITC Pisanò*, che risulta gravemente lesionato in più parti ed attualmente dichiarato parzialmente inagibile.

Nel bacino del *Lago dell'Inferno* sono stati peraltro individuati due punti isolati con velocità di -4.9 e -5.5 mm/anno, ma la bassa densità di *PS* in quest'area non consente di definire l'estensione della subsidenza (**Figura 59**).

La presenza di cavità carsiche impostate su fratture di probabile origine tettonica è osservabile nelle numerose cave di travertino presenti nella parte orientale del lago, ed è pertanto molto probabile che una buona percentuale degli *outliers* individuati sia indicativa della presenza di *sinkholes* in formazione.

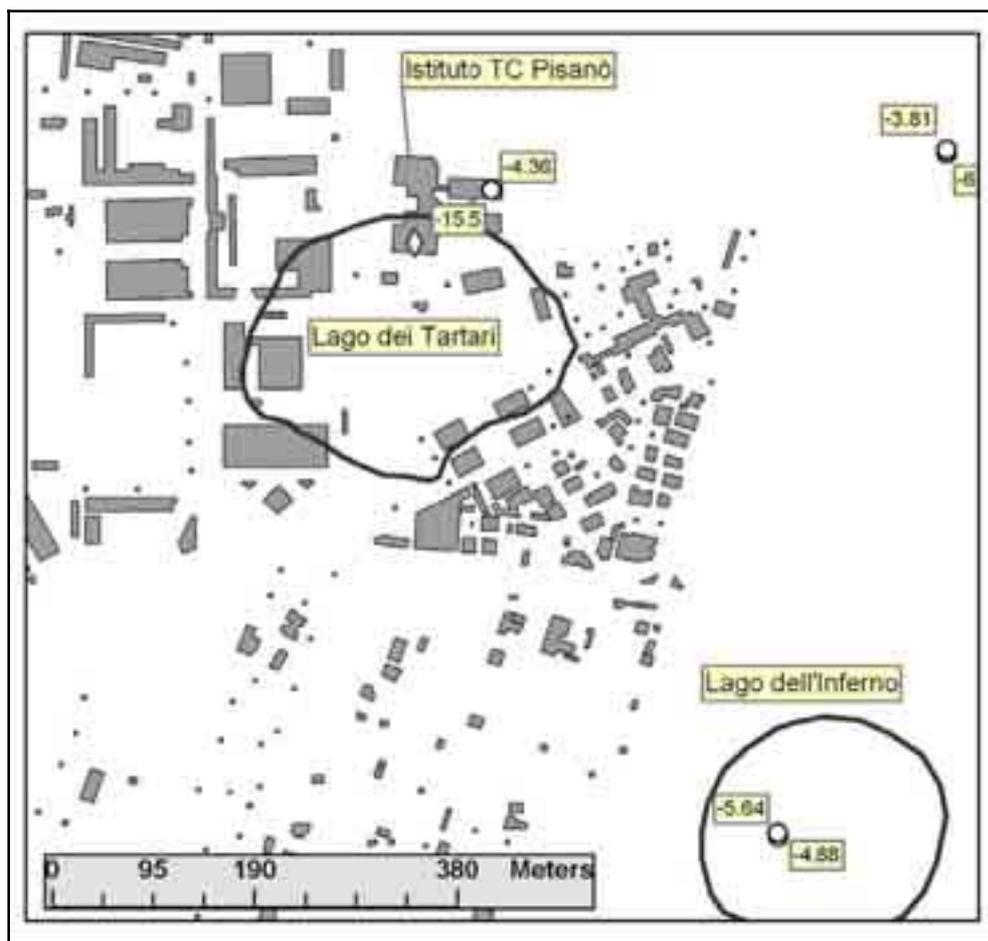


Figura 59: Localizzazione degli outliers di subsidenza rispetto alle aree edificate (sono indicate le velocità dei punti in mm/anno), nelle aree del Lago dei Tartari e del Lago dell'Inferno. Estratto da: SALVI S., PIRRO M., GASPARINI C., STRAMONDO S., PAGLIUCA M. N., ATTORI S., COLINI L., TOLOMEI C., DOUMAZ F., FERRETTI A., ALLIEVI J., *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del bacino delle acque albule (Lazio)* in AA.VV., *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, Atti del 1° Seminario a cura del Dipartimento Difesa del Suolo - APAT, I.G.E.R., Roma, 2004, pp. 709, cfr. pp. 623 - 632.

Per quanto riguarda invece la *subsidenza di tipo areale* individuata al centro del *Bacino delle Acque Albule*, si ritiene che la sua estensione (6 x 1.5 km) e la sua geometria non siano in accordo con una origine carsica.

L'applicazione di questa tecnica all'intera area del *Bacino delle Acque Albule* ha permesso di individuare per la prima volta un gran numero (circa 100) di fenomeni di cedimenti localizzati, associati a danni del patrimonio edilizio.

Un'analisi accurata delle condizioni strutturali e geologiche locali dei singoli *outliers* dovrà essere eseguita per accertare l'esatta causa delle anomalie di subsidenza, tuttavia è molto probabile che per molti punti le cause siano riconducibili a *sinkholes*.

Un recente studio, condotto sempre dalla TRE mediante l'applicazione della tecnica dei *Diffusori Permanenti*, ha inoltre permesso di effettuare due distinte analisi:

1. Analisi territoriale dell'area di *Tivoli*: ~ 400 km² (**Figura 60**);
2. Analisi di dettaglio dell'area di *Tivoli Terme*: ~ 36 km² (**Figura 61**).

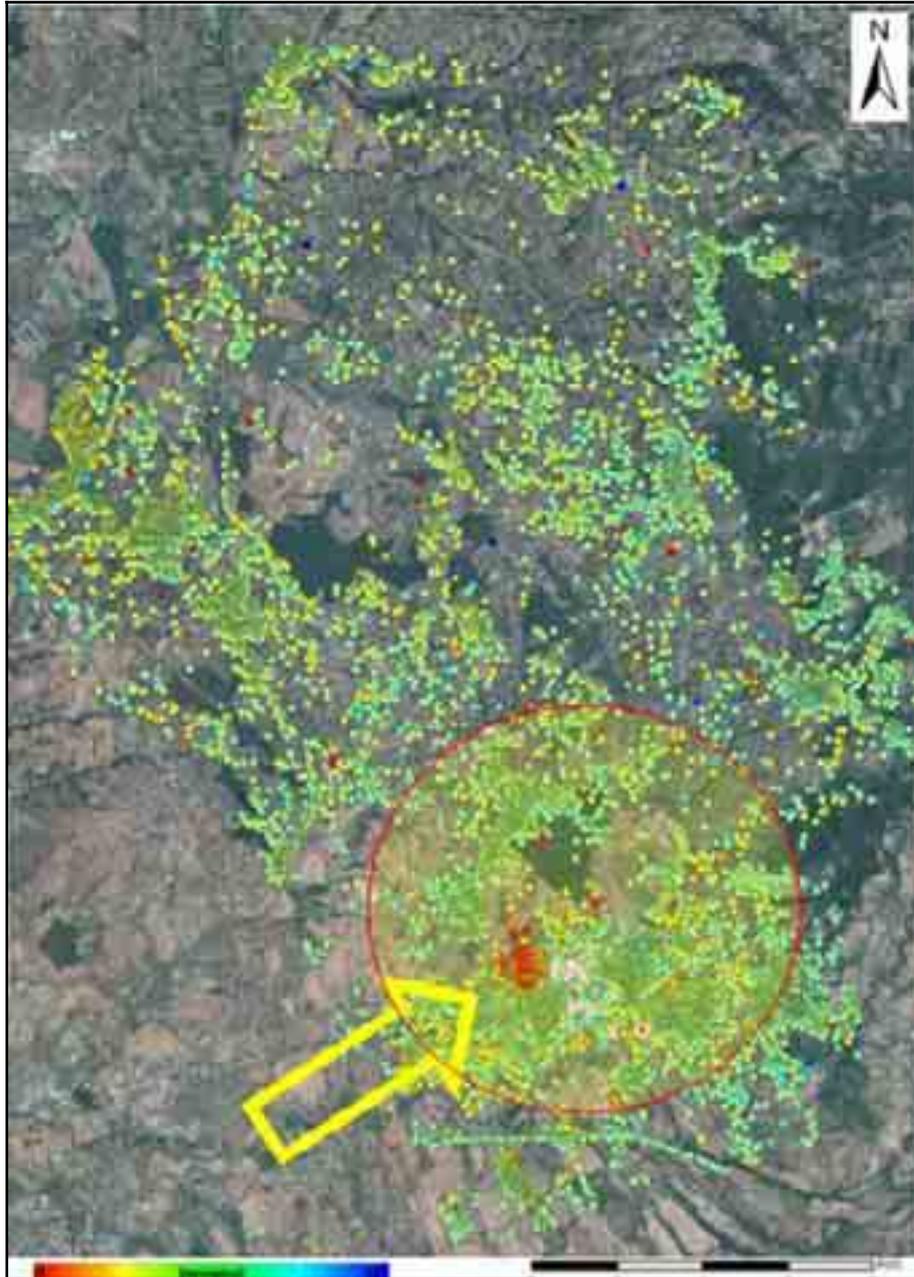


Figura 60: Individuazione dei *PS* nell'area di Tivoli. Immagine estratta dal sito: <http://www.treuropa.com>, consultato in data 28/08/06. Per gentile concessione, **MODIFICATA**.

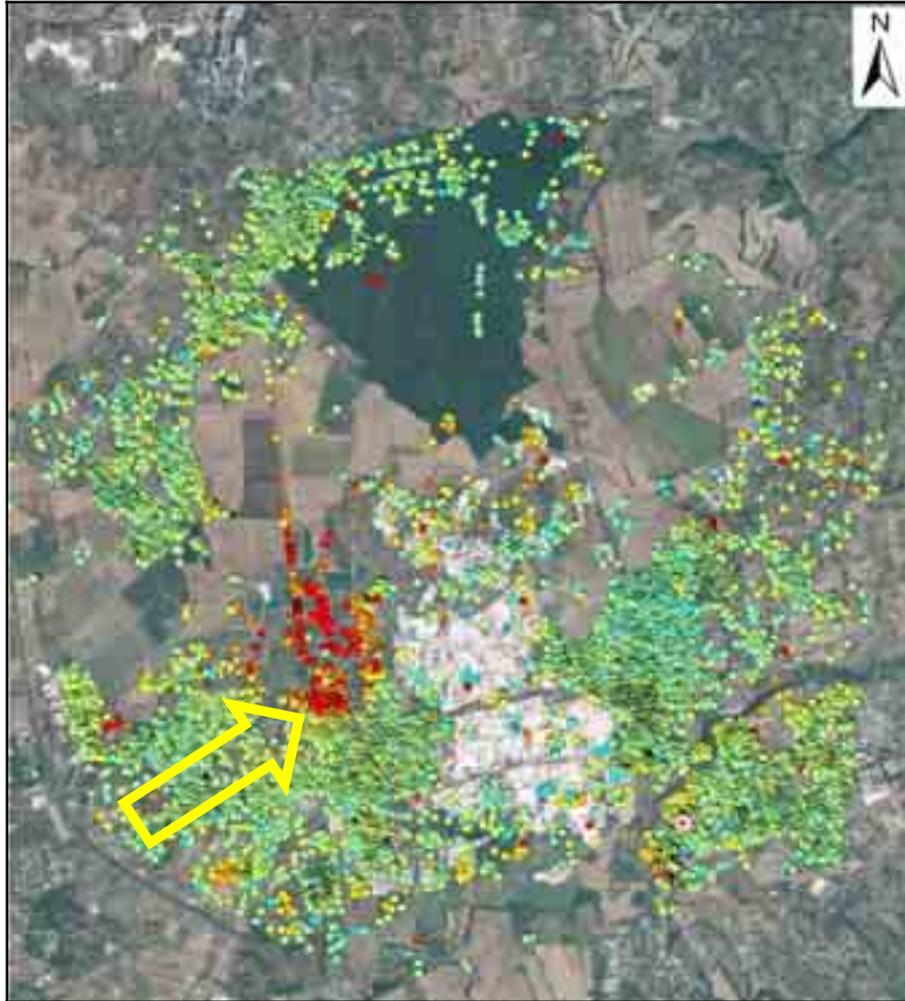


Figura 61: Tecnica dei *Diffusori Permanenti*, analisi di dettaglio nell'area di Tivoli Terme. Immagine estratta dal sito: <http://www.treuropa.com>, consultato in data 28/08/06. Per gentile concessione, MODIFICATA.

Sia nell'immagine di **Figura 60** sia in quella di **Figura 61** (in cui è mostrata in dettaglio l'analisi effettuata) è possibile osservare la zona dell'area in esame che presenta i punti caratterizzati dalle *velocità di abbassamento* più elevate, indicati dai punti in colore rosso. In particolare, la freccia indica il complesso di edifici che più hanno risentito dei fenomeni di subsidenza manifestatisi.

In **Figura 62** viene inoltre riportato, a titolo esemplificativo, l'andamento delle *velocità di spostamento verticale* che sono state misurate per uno degli edifici precedentemente individuato. L'esempio riportato mostra tutte le misure effettuate a partire dal 1992 fino al 2001 ed anche il *trend medio* dell'abbassamento verticale registrato che è espresso in millimetri all'anno.

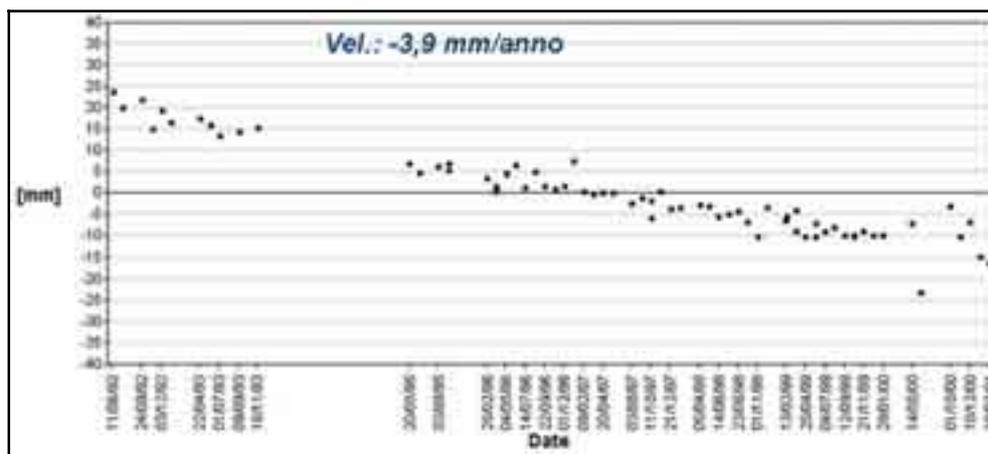


Figura 62: Andamento delle velocità di spostamento verticale per uno degli edifici precedentemente individuato. Immagine estratta dal sito: <http://www.treuropa.com>, consultato in data 28/08/06. Per gentile concessione, MODIFICATA.

1.3.3.2 Le fotografie aeree

Un altro contributo rilevante alla valutazione del *Rischio* nell'area in esame proviene dalla analisi delle “vecchie” fotografie aeree della zona.

In **Figura 63** e in **Figura 64** sono riportate due riprese aeree effettuate dall'Aeronautica Militare rispettivamente nel 1953 e nel 1977. Le fotografie riportate sono riferite all'area attualmente occupata dall'abitato di *Villanova di Guidonia*. Si può quindi osservare come, nell'arco di poco più di un ventennio questa porzione di territorio sia passata da una quasi totale assenza di edifici, legata ad una vocazione quasi esclusivamente agricola dell'area, ad una intensa urbanizzazione, legata soprattutto all'enorme sviluppo del settore estrattivo delle cave di travertino. È stato proprio l'incremento delle attività estrattive e il conseguente aumento dei lavoratori impegnati nelle attività ad esso collegate a dare un enorme impulso alla urbanizzazione dell'area immediatamente prossima alle cave di estrazione oltre che all'incremento della popolazione residente nell'area.

Di queste considerazioni si deve tener conto nella valutazione del **Rischio Totale** perché, come è confermato anche dalla immagine satellitare riportata in **Figura 65**, il fenomeno di urbanizzazione dell'area ha portato all'espansione dei centri abitati fino alle immediate vicinanze delle aree di cava.

Questo fenomeno, ricordando la definizione di *Rischio Totale* introdotta nei paragrafi precedenti ($R = P \times V \times E$), porta con sé un enorme aumento degli elementi esposti (E) tra i quali occorre ricordare gli agglomerati urbani, le aree su cui insistono insediamenti produttivi, le infrastrutture e le vie di comunicazione, il patrimonio ambientale ed i beni

culturali di interesse rilevante, ma anche e soprattutto *l'incolumità delle persone* che risiedono o lavorano nel territorio delle *Acque Albule*.

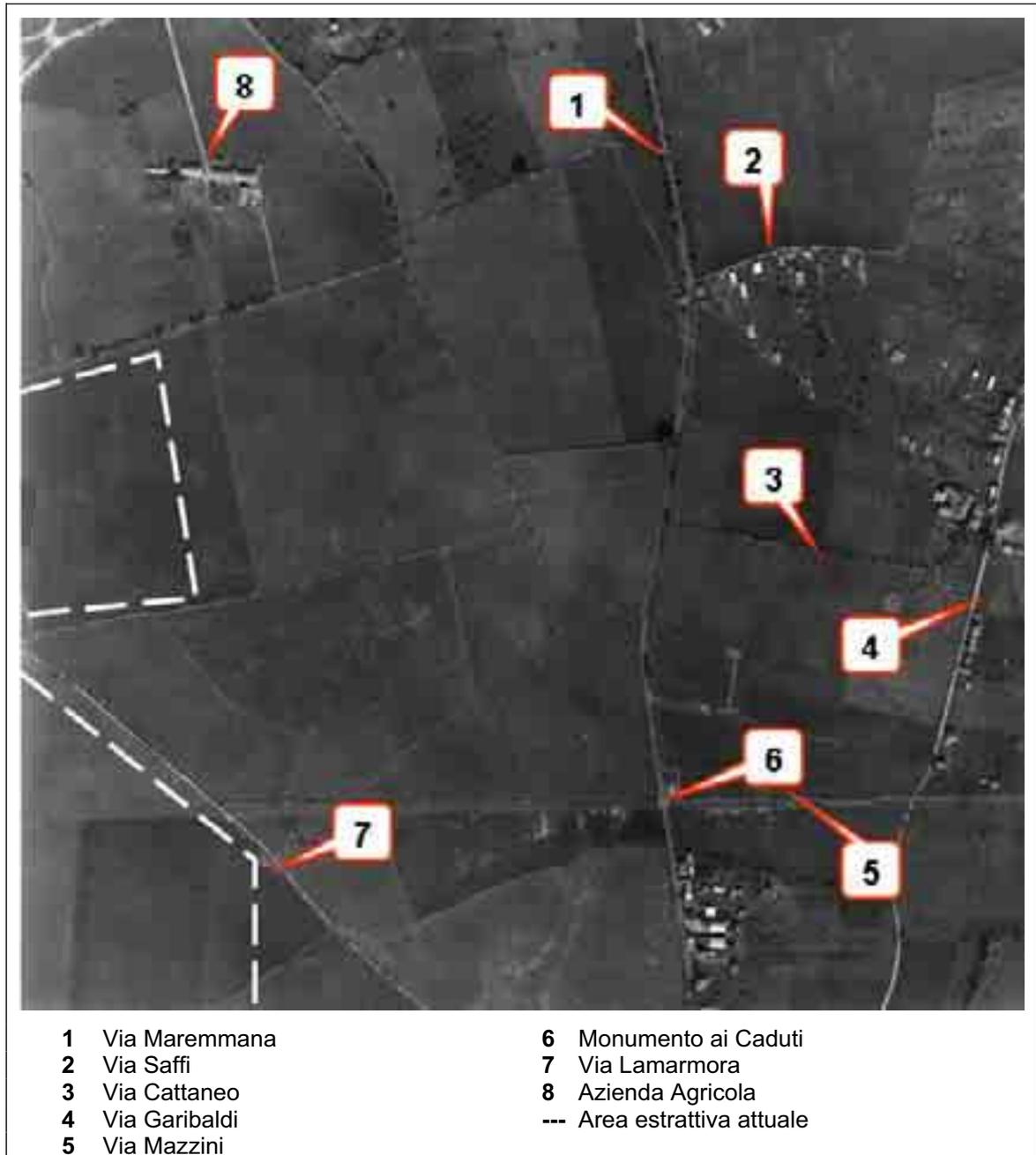


Figura 63: Foto aerea, Villanova di Guidonia 1953. Aeronautica Militare Italiana. Per gentile concessione, MODIFICATA.

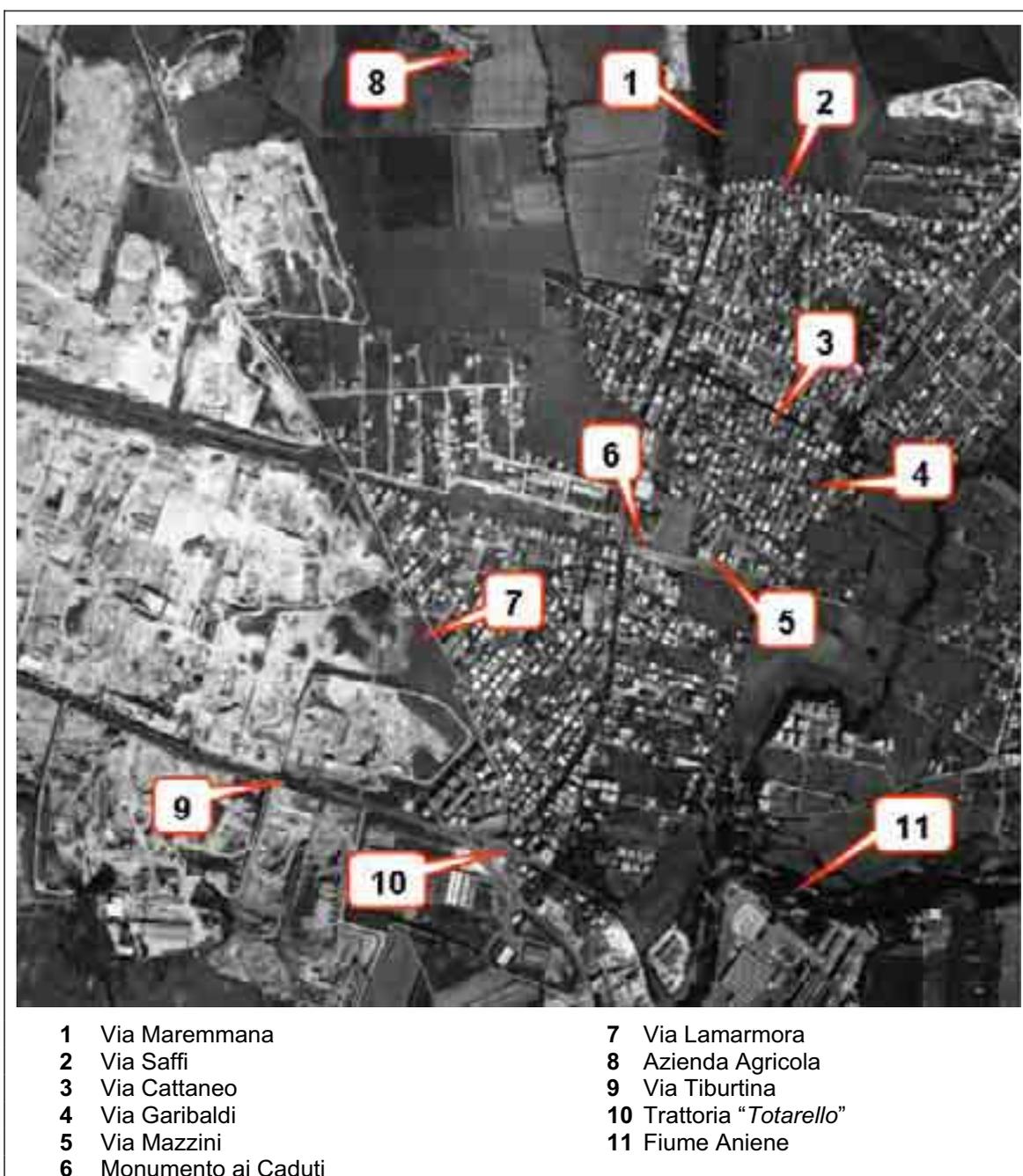


Figura 64: Foto aerea, Villanova di Guidonia 1977. Aeronautica Militare Italiana. Per gentile concessione, MODIFICATA.



Figura 65: Immagine satellitare dell'area in esame. Elaborazione grafica realizzata con l'ausilio del Software *Google Earth*, 10 maggio 2006, MODIFICATA.



Figura 66: Immagine dell'area in esame in cui è possibile evidenziare il fronte di cava in prossimità dell'abitato di Villalba di Guidonia (da <http://maps.live.com> in data 4 giugno 2006, MODIFICATA).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il *Comprensorio del Bacino delle Acque Albule*, per gli intensi fenomeni di recente urbanizzazione dei suoi versanti e per la relativa vicinanza alla Capitale, risulta essere, come anche per il passato, un'area a rischio potenziale molto elevato.

Occorre ricordare che l'area in esame ha subito, nell'arco di qualche decennio, ulteriori radicali modificazioni del territorio, fatto che ha elevato il valori di *Vulnerabilità*, essendo questo il fattore di quantificazione del rischio tra quelli più delicati.

Inoltre, il forte sviluppo nel Comprensorio dell'attività industriale legata alla estrazione del *travertino* ha contribuito a far aumentare notevolmente il valore del Rischio totale (R_{tot}) a causa del conseguente notevole incremento della *popolazione* arealmente residente.

Occorre considerare che è proprio questo aspetto il principale parametro indicante gli *Elementi Esposti* nella formula che determina il **Rischio Totale** $R_{tot} = P \times V \times E$.

In conclusione, è possibile affermare che:

il grado di antropizzazione di un'area geologicamente predisposta a pericolosi fenomeni di subsidenza può sia innescare direttamente i fenomeni stessi che condizionare fortemente la sostenibilità territoriale o ogni forma di ulteriore sviluppo.

La tecnica dei *Diffusori Permanenti* (*PS - Permanent Scatterers Technique*) si è dimostrata tra gli strumenti più idonei a studiare e monitorare tali fenomeni con continuità ed omogeneità, variando la scala territoriale da poche singole strutture fino a diverse decine di km^2 , a partire da lunghe serie di dati radar satellitari.

Particolari sensori, montati a bordo dei più recenti satelliti o altri aviotrasportabili, come, ad esempio, il sensore iperspettrale *MIVIS* che è in grado di acquisire informazioni in 102 bande dello spettro elettromagnetico (dal visibile fino all'infrarosso termico), potrebbero fornire ulteriori elementi utili per studi accurati sui fenomeni registrati nell'area in oggetto.

Tali strumentazioni, tra le altre cose, potrebbero permettere anche di effettuare misure accurate delle emissioni gassose nocive o di eventuali anomalie termiche al suolo collegabili ad attività di origine vulcanica di tipo secondario.

Ulteriori contributi alla caratterizzazione del *Rischio* nell'area possono pervenire, come già mostrato nei paragrafi precedenti, dall'analisi delle più tradizionali fotografie aeree (anche storiche), le quali possono consentire lo studio e l'individuazione di tutte quelle morfologie del territorio attualmente non più individuabili e che risultano ormai inevitabilmente nascoste o completamente celate a causa della urbanizzazione incontrollata verificatasi soprattutto nel corso degli ultimi decenni.

Parimenti, la raccolta delle informazioni storiche sulla evoluzione e trasformazione del territorio e di eventuali eventi naturali verificatisi nel passato, lo studio accurato delle fonti è elemento da non sottovalutarsi.

BIBLIOGRAFIA

- **AA.VV.**, *Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, a cura della Società Geologica Italiana, BE – MA Editrice, Roma, 1998, pp. 377.
- **AA. VV.**, *Le voragini catastrofiche – un nuovo problema per la Toscana*, Edizioni Regione Toscana, Firenze, 2002, pp. 256.
- **AA. VV.**, *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di Sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, APAT, I.G.E.R., Roma, 20-21 maggio 2004, pp. 709.
- **AA. VV.**, *Il Travertino, Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio*, Atti del Convegno a cura di GIARDINI M., Guidonia (RM), 2000, pp. 147.
- **BOCCALETTI M., CIARANFI N., COSENTINO D.**, *Palinspatic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Thyrrhenian area during the Neogene*, in *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, N. 77, 1990, pp. 41-50.
- **CAPELLI G., MAZZA R., GIORDANO G., CECILI A., DE RITA D., SALVATI R.**, *The Colli Albani volcano (Rome, Italy): equilibrium breakdown of a hydrogeological unit as a result of unplanned and uncontrolled over exploitation*, in *Hydrogeologie*, N. 4, 2000, pp. 63-70.
- **CARAPEZZA M. L., BADALAMENTI B., CAVARRA L., SCALZO A.**, *Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano - Cava dei Selci, Roma*, in *J. Volcanolol Geotherm. Res.*, 2002.
- **CARAPEZZA M. L., CIONI R., GUIDI M., PESCIA A.**, *Historic Nyos-type catastrophic events at Albano lake crater (Roma) and present hazard assessment* in *Colloque Internazionale, M.ge Pelee*, N. 68, 2002b.
- **CHIARABBA C., AMATO A., DELANEY P.T.**, *Crustal structure, evolution, and volcanic unrest of the Alban Hills, Central Italy* in *Bull. Volcanol*, N. 59, 1997, pp. 161-170.
- **CHIODINI G., FRONDINI F.**, *Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy*, in *Chem. Geol.*, N. 177, 2001, pp. 67-83.

- **CIABATTI M.**, *Elementi di idrologia superficiale*, CLUEB, Bologna, 1982, pp. 230.
- **CIONI R., GUIDI M., RACO B., MARINI L., GAMBARDELLA B., CHIODINI G.**, *Water chemistry of Lake Albano (Italy)*, in J. Volcanol. Geotherm. Res, 2002.
- **DE ROSSI M. S.**, *Attività straordinaria delle mofete nella solfatara delle Acque Albule verificata il 26 aprile 1872*, in Atti Acc. Pont. N. Lincei, N. 1, 1874, pp. 84-85.
- **DERMANIS A., BIAGI L.**, *Telerilevamento, informazione territoriale mediante immagini da satellite*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2002, pp. 279.
- **ELTER P., GIGLIA G., TONGIORGI M., TREVISAN L.**, *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to present) evolution of the Northern Apennines*, in Boll. Geofisica, Vol. XVII, 1975, pp. 3-18.
- **FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F.**, *Measuring subsidence with SAR interferometry applications of the permanent scatterers technique*, in Natural Hazards Workshop, Igls, AUSTRIA, June 2000, pp. 81-90.
- **FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F.** *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.39, N.1, 2001, pp.8-20
- **FREDI P.**, *Edifici vulcanici estinti del Lazio*, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Dipartimento delle Scienze della Terra, in *Morfologia Vulcanica*, pag. 341.
- **FUNICIELLO R., PAROTTO M.**, *Il substrato sedimentario nell’area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell’Appennino centrale*, in Geol. Rom, N. 17, 1978, pp. 233-287.
- **FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M. L., BARBERI F.**, *Vulcanologia. - L’attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, in Rend. Fis. Accademia dei Lincei, S. 9 , V. 13, Roma, 2002, pp. 113-143.
- **GALATI G. E GILARDINI A**, *Tecniche e strumenti per il telerilevamento ambientale*, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Monografie Scientifiche, 2001, pp 300.
- **GIGGENBACH W. F., MINISSALE A.A., SCANDIFFIO G.**,. Isotopic and chemical assessment of geothermal potential of the Colli Albani area, Latium region, Italy. 1988, Appl. Geochem., 3, pp. 475-486.

- **GHINI G.**, *Interventi di scavo e restauro della Soprintendenza archeologica per il Lazio nell'area sismica dei Colli Albani*, in 1st Conference on Archeology, Volcanism and Remote Sensing, Roma, 1999, pp. 49-63.
- **GOMARASCA M. A.**, *Elementi di Geomatica*, AIT – Associazione Italiana di Telerilevamento, pp.660.
- **LA PIETRA F.**, *Il Comprensorio delle Acque Albule: tra Pericolosità ed Emergenza*, Tesi di Laurea in Gestione e Valorizzazione del Territorio, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma, pp. 162.
- **LOCARDI E.**, *Eogene and Quaternary Mediterranean Volcanism: the Tyrrhenian example*. Stanley D.J. & Wezel F.C. (eds), Geological Evolution of the Mediterranean Basin. 1985, Springer, Berlin, 273-292.
- **MARTINI M., GIANNINI L., PRATI F., TASSI F., CAPACCIONI B., IOZZELLI P.**, *Chemical characters of crater lakes in the Azores and Italy: the anomaly of Lake Albano*. 1994, *Geochem. J.*, 28: 173-184.
- **PIZZINO L., GALLI G., MANCINI C., QUATTROCCHI F., SGARLATO P.**, *Natural Gas Hazard within a quiescent volcanic region and its relations with tectonics: The case of the Ciampino-Marino area, Alban Hills Volcano, Italy*. 2002, *Natural Hazards*, in corso di stampa.
- **PRATI C.**, *Fondamenti di Telerilevamento*, Politecnico di Milano, pp 69.
- **PRATURLON A.**, *Breve storia delle ricerche geologiche in Guide Geologiche Regionali - LAZIO*, a cura della Società Geologica Italiana, BE-MA Editrice, Roma, 1998, pp. 377, pp. 12 –14.
- **ROCCA F., COLESANTI C., FERRETTI A., RATTI R.**, *T.R.E.: una spin- off Universitaria per l'elaborazione di dati radar satellitari*, MONDODIGITALE n°4 - dicembre 2002
- **SCHIAVON G.**, *Dispense del Corso di Telerilevamento e Diagnostica Elettromagnetica I*, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, 2003.
- **STOPPA F., LUPINI L.**, *Caratteristiche identificative di una roccia carbonatica del Pleistocene superiore affiorante presso Polino (TR, Umbria)*”.

- **WEZEL F.C.**, *The Tyrrhenian Sea: a rifted krikogenic-swell basin*. 1982, Mem. Soc. Geol. It., 24, 531-568.
- **SALVI S., PIRRO M., GASPARINI C., STRAMONDO S., PAGLIUCA M. N., ATTORI S., COLINI L., TOLOMEI C., DOUMAZ F., FERRETTI A., ALLIEVI J.**, *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del bacino delle acque albule (Lazio)* in AA.VV., *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, Atti del 1° Seminario a cura del Dipartimento Difesa del Suolo - APAT, I.G.E.R., Roma, 2004, pp. 709, pp. 623 - 632.