

ROSA MARIA DI MAGGIO | PIER MATTEO BARONE | ELENA PETTINELLI  
ELISABETTA MATTEI | SEBASTIAN E. LAURO | ANDREA BANCHELLI

# GEOLOGIA FORENSE

Introduzione alle geoscienze applicate alle indagini giudiziarie

Scheda sul sito >



R.M. Di Maggio P.M. Barone E. Pettinelli  
E. Mattei S.E. Lauro A. Banchelli

# Geologia forense

GEOSCIENZE E INDAGINI GIUDIZIARIE



Dario Flaccovio Editore

R.M. Di Maggio, P.M. Barone, E. Pettinelli,  
E. Mattei, S.E. Lauro, A. Banchelli  
GEOLOGIA FORENSE

ISBN 9788857900233

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686  
[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: novembre 2013

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, novembre 2013

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

# INDICE

*Prefazione* di Massimo Picozzi

## PARTE I

### Introduzione alle geoscienze forensi

#### 1. Le geoscienze forensi: storia e ruolo nei procedimenti giudiziari

1.1. Le geoscienze forensi .....	pag. 17
1.2. Cenni storici sulle geoscienze forensi .....	» 18
1.2.1. L'omicidio dell'onorevole Aldo Moro: uno dei primi casi italiani di geoscienze applicate (Lombardi – 1978) .....	» 21
1.3. Le geoscienze forensi oggi .....	» 22
1.4. La scena del crimine .....	» 25
1.5. Il sopralluogo tecnico .....	» 26
1.6. L'approccio geo-scientifico alla scena del crimine .....	» 28
1.7. Bibliografia .....	» 30

#### 2. Le scienze criminalistiche e i procedimenti giudiziari

2.1. Le indagini scientifiche nei procedimenti penali .....	» 33
2.2. Gli accertamenti di polizia giudiziaria .....	» 38
2.3. Gli accertamenti tecnici per l'autorità inquirente .....	» 44
2.4. Gli accertamenti tecnici per il giudice .....	» 48
2.5. Le indagini scientifiche del difensore .....	» 53
2.6. Bibliografia .....	» 60

## PARTE II

### Le applicazioni delle geoscienze forensi

#### 3. I materiali geologici

3.1. Cenni introduttivi .....	» 67
3.2. I minerali .....	» 67
3.3. Le rocce .....	» 68
3.3.1. Il danneggiamento delle tombe ebraiche (Di Maggio, Nuccetelli – 2002) .....	» 70
3.4. Le sabbie .....	» 71
3.4.1. L'erosione e il trasporto .....	» 72

3.4.2.	La sedimentazione e la diagenesi.....	»	73
3.5.	I suoli.....	»	74
3.5.1.	La pedogenesi .....	»	74
3.5.2.	La classificazione dei suoli e le carte pedologiche .....	»	76
3.5.3.	Delitto nelle campagne senesi (Nuccetelli – 2008).....	»	77
3.6.	Le polveri .....	»	78
3.7.	Le gemme .....	»	79
3.7.1.	Le caratteristiche delle gemme .....	»	80
3.7.2.	La falsificazione delle gemme .....	»	81
3.7.2.1.	Il diamante .....	»	83
3.7.2.2.	Le pietre di colore .....	»	84
3.7.3.	Gli smeraldi colombiani (Molina Gallego – 1999).....	»	86
3.8.	I metalli preziosi.....	»	87
3.8.1.	I caratteri merceologici dei metalli e delle leghe preziose.....	»	87
3.8.2.	La falsificazione dei metalli preziosi .....	»	88
3.9.	I fossili .....	»	89
3.9.1.	La falsificazione dei fossili .....	»	90
3.9.2.	I microfossili .....	»	91
3.10.	Bibliografia .....	»	93
<b>4. La pedologia forense</b>			
4.1.	La pedologia forense: applicabilità e finalità delle indagini sui terreni ...	»	95
4.1.1.	Le attività investigative e di laboratorio del pedologo forense.....	»	97
4.1.2.	L'omicidio di Nike Adekunle (Di Maggio – 2012).....	»	98
4.2.	I terreni forensi .....	»	100
4.3.	Le componenti dei terreni forensi .....	»	102
4.3.1.	La componente inorganica .....	»	103
4.3.1.1.	I minerali .....	»	103
4.3.1.2.	Le rocce.....	»	105
4.3.2.	La componente organica .....	»	107
4.3.3.	La componente antropogenica .....	»	108
4.4.	L'interdisciplinarietà nello studio e l'analisi dei terreni in ambito forense	»	110
4.4.1.	Suoli e materiali antropogenici: prove investigative in un caso di omicidio (Schneck – 1999).....	»	110
4.4.2.	Organismi unicellulari nei terreni (Ruffell, Swindles – 2004).....	»	112
4.4.3.	Singolari particelle antropogeniche (Di Maggio, Nuccetelli – 2010)	»	113
4.5.	Il sopralluogo, il repertamento e la conservazione delle tracce e dei campioni di terreno .....	»	115
4.5.1.	Gli effetti di errate metodologie e interpretazioni in fase di sopralluogo e repertamento.....	»	118
4.6.	Le problematiche collegate alle tracce di terreno.....	»	119

4.6.1. La deposizione selettiva.....	» 121
4.6.2. La dispersione .....	» 121
4.6.3. La miscelazione .....	» 121
4.6.4. Tracce di terreno estranee alla dinamica criminale (Di Maggio – 2003) .....	» 123
4.7. La stima del grado di compatibilità tra i campioni di terreno e la valutazione della probabile zona di provenienza.....	» 124
4.8. Bibliografia.....	» 126
 <b>5. Le analisi sui terreni e su altri materiali geologici</b>	
5.1. Cenni introduttivi .....	» 129
5.2. La determinazione del colore .....	» 130
5.2.1. Il sistema Munsell .....	» 130
5.3. L'analisi granulometrica .....	» 132
5.3.1. La separazione granulometrica .....	» 133
5.4. Le determinazioni della densità .....	» 134
5.5. Le analisi al microscopio stereoscopico .....	» 135
5.5.1. La morfoscopia e la morfometria.....	» 137
5.6. Le analisi al microscopio polarizzatore .....	» 137
5.6.1. La preparazione dei campioni e le determinazioni a luce polarizzata ..	» 139
5.7. La diffrattometria a raggi X.....	» 141
5.7.1. Il duplice omicidio del mostro del Circeo (Di Maggio – 2005) ..	» 142
5.8. La spettroscopia SEM-EDX .....	» 143
5.9. La spettroscopia Raman .....	» 145
5.10. La spettroscopia FT-IR.....	» 146
5.10.1. Omicidio colposo o volontario? (Di Maggio, Nuccetelli – 2010)	» 147
5.11. Le analisi termiche .....	» 149
5.11.1. L'analisi termodifferenziale e l'analisi termogravimetrica .....	» 150
5.12. Le procedure analitiche sui terreni adottate nei laboratori forensi.....	» 151
5.13. Bibliografia.....	» 155
 <b>6. L'utilizzo della tecnica della fotointerpretazione in campo forense</b>	
6.1. Cenni introduttivi .....	» 157
6.2. Fotogrammetria e fotointerpretazione .....	» 157
6.3. Ripresa aerea ed elementi caratteristici di una fotoaerea .....	» 158
6.4. Dove reperire le foto aeree .....	» 161
6.5. La fotointerpretazione in campo forense.....	» 162
6.5.1. Abusivismo edilizio .....	» 162
6.5.2. Attività estrattiva.....	» 163
6.5.3. Discariche abusive .....	» 163
6.6. Bibliografia.....	» 164

**7. Le indagini ambientali e metodologie di bonifica di siti inquinati**

7.1. Le indagini ambientali.....	» 165
7.2. Le metodologie delle indagini ambientali.....	» 166
7.3. Terreno contaminato da cromo esavalente, intervento di bonifica mediante tecniche combinate a Brughero (Milano).....	» 166
7.3.1. Normativa EPA per le acque destinate al consumo umano.....	» 169
7.3.2. Progettazione e realizzazione dell'intervento di bonifica.....	» 170
7.3.3. Modelli di flusso e di trasporto nella progettazione dell'intervento di bonifica.....	» 172
7.3.4. Fissazione geochimica.....	» 173
7.3.5. Monitoraggio in corsa d'opera delle operazioni di bonifica.....	» 175
7.3.6. Risultati ottenuti.....	» 175
7.3.7. Conclusioni.....	» 178
7.4. Bibliografia.....	» 178

**8. La geofisica forense**

8.1. Introduzione alle tecniche geofisiche.....	» 179
8.2. Richiami sulle tecniche geofisiche.....	» 183
8.2.1. Metodo gravimetrico.....	» 184
8.2.2. Metodo magnetico.....	» 186
8.2.3. Metodo elettrico.....	» 189
8.2.4. Metodo elettromagnetico.....	» 193
8.2.5. Metodo georadar.....	» 196
8.3. Rilevazione del bersaglio. Falsi negativi e falsi positivi.....	» 199
8.4. Scelta della tecnica di misura.....	» 204
8.5. Il georadar per la ricerca di bersagli forensi.....	» 207
8.5.1. Muri, murature e pavimentazioni.....	» 207
8.5.2. Stanze e cavità.....	» 208
8.5.3. Sepolture e fosse comuni.....	» 209
8.5.4. Oggetti metallici.....	» 210
8.5.5. Misure in acqua.....	» 212
8.6. La geofisica nelle indagini forensi.....	» 212
8.7. Bibliografia.....	» 214

**9. Dall'archeologia alla geoarcheologia forense**

9.1. Un breve excursus.....	» 217
9.1.1. L'archeologia.....	» 217
9.1.1.1. In che modo l'archeologia ci aiuta a capire la storia e la cultura?.....	» 217
9.1.1.2. Tipi di archeologia.....	» 218
9.1.1.3. Definizione di sito archeologico.....	» 218

9.1.1.4. Definizione di “contesto” .....	» 220
9.1.2. La geoarcheologia.....	» 220
9.1.3. La geoarcheologia forense .....	» 223
9.2. I concetti base per un’analisi di geoarcheologia forense.....	» 225
9.2.1. L’analisi del contesto .....	» 226
9.2.2. Lo scavo stratigrafico.....	» 228
9.2.3. Il recupero e la documentazione .....	» 237
9.3. Bibliografia.....	» 247
<b>10. La geoarcheologia forense e lo studio integrato</b>	
10.1. Il remote sensing .....	» 249
10.2. La geofisica .....	» 259
10.3. L’antropologia .....	» 266
10.4. I metodi di datazione diretta e indiretta.....	» 275
10.5. Bibliografia .....	» 287
<b>11. Le competenze del geologo applicato e del geotecnico nel contenzioso legale</b>	
11.1. Cenni introduttivi .....	» 289
11.2. Comportamenti inattesi delle strutture e progettazione geologica e geotecnica .....	» 291
11.3. Cause geologiche ed effetti di danno: uno schema logico-operativo .....	» 298
11.4. Bibliografia.....	» 302
<b>12. Qualità, competenza ed etica del geoscientziato forense</b>	
12.1. Deontologia del perito geoscientziato forense durante il processo .....	» 305
12.2. Bibliografia .....	» 315
RINGRAZIAMENTI .....	» 317

## Prefazione

di Massimo Picozzi

È una delle pagine più inquietanti della storia italiana, un delitto assurdo e nel contempo un caso ancora aperto, una vicenda che ben si presta a introdurre il prezioso lavoro di Rosa Maria di Maggio e dei suoi collaboratori.

Tutto comincia a Roma, verso le nove del mattino del 16 marzo 1978, quando l'onorevole Aldo Moro lascia la sua abitazione diretto verso gli Uffici del Ministero; ad accompagnarlo i cinque uomini della scorta, e nemmeno hanno percorso un chilometro quando scatta l'agguato: in pochi minuti un commando delle Brigate Rosse elimina le guardie del corpo e rapisce lo statista, nel giorno della presentazione di uno dei tanti "governi Andreotti".

In una drammatica altalena di speranze e timori, l'8 maggio una telefonata anonima indirizza verso un'auto parcheggiata in via Caetani, nel centro della capitale; nel bagagliaio viene rinvenuto il corpo senza vita di Aldo Moro, ucciso poche ore prima.

Al di là delle tante ombre che ancora avvolgono l'episodio, sono state le indagini sul sequestro e l'omicidio di Moro ad aver dato spazio, non certo per la prima volta in Italia, ma mai in un caso tanto delicato, a quella branca della criminalistica che è la geologia forense.

Durante l'autopsia, infatti, si trovarono tracce di sabbia nel risvolto dei pantaloni e sulle scarpe della vittima, e all'equipe medico-legale fu affiancato un geologo forense, con l'incarico di analizzare questi elementi, come pure quelli reperiti sull'auto in cui era stato ritrovato il cadavere.

Tutto ciò allo scopo di stabilire la provenienza delle tracce e il momento in cui erano state prelevate dal loro ambiente naturale.

Per anni il risultato della valutazione non è stato reso noto al pubblico, almeno fino al 1999, quando l'autore dell'indagine, il prof. Gianni Lombardi del laboratorio di Petrografia dell'Università di Roma, ha pubblicato il suo lavoro sul prestigioso *Journal of Forensic Science*.

Ed è attraverso le pagine della rivista che, criminologo con già una decina d'anni alle spalle, venivo a scoprire una nuova figura di specialista; un professionista dalle potenzialità incredibili, perché sempre più spesso, nel corso delle indagini,

è indispensabile sapere se un sospetto o un mezzo di trasporto possono essere materialmente collegati alla scena di un crimine.

Il geologo forense, esperto di rocce, minerali e microfossili, è in grado di riconoscere i tipi di terreno in base alla loro composizione, partendo dalle proprietà più semplici come il colore e le dimensioni dei grani; il colore può infatti variare dal grigio al giallino all'ocra rossastro, al marrone e al nero, e le dimensioni dalla finissima argilla, attraverso la sabbia via via più grossolana fino alla ghiaia.

Una volta in laboratorio, microscopi e diffrattometri permettono di caratterizzare in maniera completa il terreno e dimostrare eventuali analogie o diversità tra i vari campioni.

Inutile dire come la geologia forense appartenga di diritto al novero delle scienze delle tracce, per le quali il rigore metodologico e la prudenza rappresentano dogmi irrinunciabili: ecco quindi come un solo reperto difficilmente permetterà di risalire alla precisa provenienza geografica di un campione, e nella maggior parte dei casi le analisi utili sono quelle che si chiamano *comparative*, quelle cioè che portano a riconoscere analogie o differenze tra due o più campioni.

Torniamo però un momento al lavoro del professor Lombardi, e alle sue valutazioni:

*“Dall’analisi delle diverse tracce raccolte sia dal cadavere di Aldo Moro che dall’auto usata per trasportarlo, si sono raggiunte le seguenti conclusioni:*

- 1) le caratteristiche strutturali e di composizione dei campioni di sabbia trovati sui pantaloni e sotto le scarpe dell’onorevole Moro, dentro l’auto e tra i solchi dei pneumatici sono molto simili e tipiche della sabbia delle spiagge della costa tirrenica del Lazio;*
- 2) la prossimità del sito sabbioso alla riva è comprovata dalla presenza, sotto le soles, sui pneumatici e all’interno dell’auto, di nuclei e chiazze di bitume come derivati dalla evaporazione dell’olio sulla superficie del mare e diffusi sulle spiagge tirreniche. La freschezza delle chiazze testimonia che sono aderite recentemente ai supporti analizzati. La presenza di frammenti di poliestere termoindurente, come quello utilizzato nella costruzione degli scafi, incastrato nei solchi dei pneumatici e sotto i parafranghi, potrebbe indicare la vicinanza di un cantiere navale;*
- 3) grazie ai frammenti di vegetazione sul corpo e nell’auto, il momento in cui la sabbia è stata raccolta si è determinato essere assai prossimo al giorno in cui è stato ritrovato il cadavere. L’analisi del polline ha indicato che incrostazioni di terreno di origine vulcanica hanno aderito ai parafranghi prima della sabbia;*
- 4) un confronto tra la sabbia ritrovata sul cadavere e sull’auto con una serie di campioni raccolti sulle spiagge del Lazio restringe le investigazioni a un tratto di costa percorso dall’auto e calpestato dalle soles delle scarpe;*

- 5) *la presenza sotto le suole di terreno di origine vulcanica aderito prima della sabbia, suggerisce che le scarpe siano transitate su un terreno vulcanico prima che su una spiaggia.*”

La ricostruzione accurata della dinamica che portò alla morte Aldo Moro ancora attende conferme, e difficilmente, a mio avviso, ne avremo ogni dettaglio.

Ma dal lontano 1978 la geologia forense ha conquistato spazi sempre maggiori nel lavoro di analisi della scena del crimine.

Questo è il principale motivo per leggere con attenzione questo volume e appassionarsi alla disciplina: per la sua importanza, ancora sottostimata, e insieme per la fruibilità dei contenuti, espressi con linguaggio accessibile e insieme rigoroso, accompagnato da esempi illuminanti.

Un testo che si propone non solo ai laureati in discipline afferenti alle geoscienze, alla ricerca di un'applicazione pratica e affascinante delle loro materie, ma anche ai magistrati e agli avvocati chiamati ad accertare verità processuali forti di strumenti sempre più affidabili.

Impossibile poi non consigliare il volume a tutti quegli specialisti di altre discipline forensi, che sempre più spesso si trovano a collaborare sui medesimi casi, ciascuno consapevole delle potenzialità ma anche dei limiti del proprio sapere: medici legali e genetisti, esperti in balistica, in botanica e zoologia, antropologi e merceologi.

**PARTE I**  
**Introduzione alle geoscienze forensi**

# 1. Le geoscienze forensi: storia e ruolo nei procedimenti giudiziari

*di Rosa Maria Di Maggio, Pier Matteo Barone, Elena Pettinelli, Andrea Banchelli, Elisabetta Mattei, Sebastian E. Lauro*

*Non si conosce a fondo una scienza  
finché non se ne conosca la storia.*  
Isidore Auguste Comte

## 1.1. Le geoscienze forensi

Se le scienze forensi sono l'applicazione di tecniche e metodologie scientifiche applicate alle tradizionali investigazioni di carattere giudiziario, in relazione all'accertamento di un reato o ad un comportamento sociale, all'interno di esse un posto di rilievo è ricoperto dalle geoscienze forensi, ovvero l'applicazione di differenti discipline delle Scienze della Terra ai casi giudiziari.

Alle geoscienze forensi afferiscono alcune branche delle Scienze della Terra come la geologia, la mineralogia, la geochemica, la geofisica, la geologia applicata, la pedologia e la geoarcheologia, le cui applicazioni possono fornire un'utile chiave di lettura dell'ambiente che ci circonda, nel contesto di numerose tipologie di reato, sia in ambito penale che civile.

Il contesto ambientale può entrare a far parte della dinamica criminale in diverse situazioni: esso può essere il luogo ove nascondere un cadavere od oggetti preziosi, o può essere testimone di un delitto efferato. Data la natura di numerose dinamiche criminali svolte in aree all'aperto, l'ambiente, non essendo ovviamente un sistema chiuso, svolge un duplice ruolo, passivo e attivo. Passivo in quanto può essere il principale depositario di tracce ed elementi di prova della frequentazione dello stesso da parte sia della vittima che del carnefice. Attivo poiché può risultare protagonista della dinamica criminale, laddove, per esempio, se ne è abusato nelle fasi di progettazione e costruzione di infrastrutture, discariche o manufatti architettonici, ma anche laddove esso lasci tracce probanti su indumenti e oggetti (come per esempio la terra rinvenuta sulle calzature).

L'approccio rigoroso delle Scienze della Terra alle investigazioni giudiziarie e la crescente necessità di risolvere differenti tipologie di reato in diversi contesti e ambienti hanno permesso non solo di migliorare le tecniche sulla scena del crimine e in laboratorio, ma anche di beneficiare di nuovi approcci afferenti al campo

della fisica, della chimica, della biologia e della geoarcheologia. Tale sviluppo ha inoltre determinato l'applicazione di un approccio multidisciplinare alla scena del crimine, che prevede l'impiego di materie anche non prettamente geologiche, quali l'entomologia, la microbiologia, la palinologia, ecc. La poliedricità nell'applicazione delle Scienze della Terra alle indagini giudiziarie ha fatto sì che esse siano state a buon diritto ribattezzate geoscienze forensi.

## 1.2. Cenni storici sulle geoscienze forensi

Nell'immaginario collettivo il ricordo di Archimede è indissolubilmente legato ad un aneddoto leggendario. Vitruvio racconta che avrebbe iniziato ad occuparsi di idrostatica perché il sovrano Gerone II gli aveva chiesto di determinare se una corona fosse stata realizzata con oro puro oppure utilizzando all'interno altri metalli. Egli avrebbe scoperto come risolvere il problema mentre faceva un bagno, notando che immergendosi nell'acqua provocava un innalzamento del livello del liquido. Questa osservazione l'avrebbe reso così felice che sarebbe uscito nudo dall'acqua esclamando *εὕρηκα* (héureka!, ho trovato!).

Archimede aveva suggerito di pesare la corona e un quantitativo di oro uguale in peso, immersi entrambi in acqua. Se la corona fosse stata tutta d'oro la bilancia sarebbe stata in equilibrio. Poiché invece la bilancia si abbassò dalla parte dell'oro, se ne potette dedurre che, essendo pari i pesi, la corona doveva avere subito una maggiore spinta idrostatica verso l'alto e quindi doveva avere un maggiore volume, il che implicava che doveva essere stata fabbricata impiegando anche metalli con densità minore dell'oro (come l'argento).

Ma se le scienze forensi risultano ampiamente e storicamente note, le geoscienze hanno incominciato tardi a ritagliarsi un ambito importante nel vasto panorama delle investigazioni.

Nell'aprile del 1856, su un treno che viaggiava lungo la ferrovia dell'Impero prussiano, un barile contenente monete d'argento fu svuotato e riempito con sabbia. La scoperta fu fatta solo alla destinazione finale del convoglio. Uno studioso raccolse campioni di sabbia dalle stazioni lungo la linea ferroviaria dove il treno aveva effettuato le fermate e, con l'ausilio di un microscopio, riuscì a collegare la sabbia presente nel barile con quella proveniente da una delle stazioni. Il fatto fu riportato nella rivista *Science and Art*, documentando così il primo episodio in cui una disciplina delle geoscienze fornì utili indizi agli inquirenti per risolvere un caso giudiziario, confrontando materiali geologici acquisiti come fonti di prova. Tuttavia, negli anni a seguire non sono riportate ulteriori notizie dell'applicazione delle geoscienze in casi giudiziari.

Solo alla fine dell'Ottocento lo scrittore sir Arthur Conan Doyle, autore della famosa serie di romanzi *Le avventure di Sherlock Holmes*, descrisse nei suoi rac-

conti l'osservazione delle tracce di terreno per risolvere casi giudiziari. In particolare, nel suo romanzo *A Study in Scarlet*, del 1887, John Watson, parlando delle conoscenze di Sherlock Holmes, dice: "lui è in grado di discernere a prima vista i diversi terreni uno dall'altro; mi fa vedere, nelle nostre passeggiate, le macchie di fango sui suoi pantaloni e mi dimostra come la loro consistenza e il loro colore gli permettano di conoscere in quale parte di Londra siano state fatte". Nel romanzo *The Five Orange Pips*, del 1891, si trova un altro passaggio interessante nel quale Holmes osserva la presenza di tracce di terreno ricco in gesso su un paio di stivali. Questi brani indicano che Conan Doyle era già pienamente consapevole del valore delle proprietà morfologiche e mineralogiche dei terreni nelle applicazioni forensi. Nonostante molte delle metodologie descritte nei romanzi di Sherlock Holmes siano inapplicabili nella realtà, verosimilmente Doyle abbozzò un approccio da geoscientziato forense che ora costituisce, per esempio, le basi dello studio dei terreni in ambito processuale:

- il numero dei tipi di terreno è quasi illimitato;
- i terreni possono cambiare le loro caratteristiche anche a brevi distanze;
- tutte le persone possono avere tracce di terreno sui loro vestiti, calzature o veicoli semplicemente venendo in contatto con tali materiali;
- l'esame dei terreni può aiutare a collocare una persona nel luogo ove è venuta in contatto con essi.

Sempre negli ultimi anni dell'Ottocento, Hans Gross, un professore di criminologia austriaco, con sorprendente lungimiranza propose nel suo libro *Handbuch für Untersuchungsrichter*, pubblicato nel 1893 e tradotto in inglese con il titolo *Criminal Investigation*, l'applicazione di metodi scientifici per supportare le indagini in casi criminali, includendo le scienze della terra e la mineralogia per studiare, a suo dire, "la polvere e la sporcizia presente sulle scarpe e sui vestiti di un indagato".

Nei primi anni del Novecento Georg Popp, un chimico tedesco, risolse più di un caso di omicidio servendosi della mineralogia. In particolare nel caso dell'omicidio di Margarethe Filbert riuscì a stabilire che la sequenza temporale dei depositi di terreno sugli indumenti del sospettato era compatibile con la dinamica omicidiaria. Questa fu la prima volta che si riconobbe il valore delle indagini geologiche in una corte di giustizia.

Tra il 1910 e il 1912, Edmond Locard, medico e criminologo francese, finalizzò i suoi studi scientifici alla soluzione di casi criminali focalizzando l'interesse su come vari materiali, tra cui quelli geologici, potevano venire in contatto e trasferirsi su varie superfici sotto forma di tracce, postulando il famoso principio di scambio che oggi prende il suo nome: "ogni volta che due oggetti vengono in contatto l'uno con l'altro, c'è sempre un trasferimento di materiale; anche se i metodi di indagine possono non essere sufficientemente sensibili a dimostrare

tale scambio o certe condizioni possono eliminarlo, il trasferimento di materiale avviene”. Questo principio costituisce la base del repertamento e dell’esame di tutte le tracce considerate fonti di prova, dalle impronte digitali ai terreni.

Durante tutto il Novecento, furono allestiti laboratori di geologia forense in vari istituti di polizia scientifica del mondo a partire dal 1939 nel Federal Bureau of Investigation (FBI). Negli Stati Uniti, l’uso dell’analisi sui terreni nell’ambito delle investigazioni giudiziarie acquistò particolare popolarità tra gli anni Sessanta e Settanta ad opera di Walter McCrone e del suo McCrone Research Institute. McCrone aprì il campo all’utilizzo delle tecniche delle geoscienze, quali la microscopia ottica e di altro tipo, per la caratterizzazione dei terreni e di un’ampia varietà di particelle di diversa natura utili in ambito forense.

In Italia la geologia forense è una scienza relativamente giovane, infatti, sebbene la Polizia scientifica nasca nel 1903 per merito del medico legale Salvatore Ottolenghi, solo agli inizi degli anni Ottanta si iniziò ad utilizzare tracce di terreno come elementi di prova, per via dell’esigenza di risolvere importanti casi di sequestro di persona. Nello specifico, la presenza di terriccio su autoveicoli sospetti poteva fornire informazioni significative sui tragitti effettuati dai rapitori e sui covi e nascondigli da loro frequentati.

Sebbene l’interesse editoriale per la geologia forense iniziasse a svilupparsi negli anni Sessanta, il primo testo dedicato a questo argomento fu scritto e pubblicato da Murray e Tedrow solo nel 1975.

Nonostante l’inequivocabile importanza degli elementi di prova di natura geologica nell’ambito delle indagini giudiziarie, l’argomento è stato scarsamente trattato nel corso dell’ultimo ventennio del ventesimo secolo.

Nei primi anni del nuovo millennio, la geologia forense ha riconquistato l’interesse degli investigatori, degli istituti forensi e delle università e ha vissuto un grande sviluppo, soprattutto nel mondo anglosassone. La collaborazione tra inquirenti ed enti di ricerca ha permesso non solo di migliorare le procedure analitiche, ma anche di introdurre nuove metodiche e nuove applicazioni afferenti a differenti branche delle scienze della terra, che hanno dimostrato importanti potenzialità nel fornire utili indizi probanti.

Questi aspetti hanno permesso di coniare ufficialmente il termine *geoscienze forensi*, giocando un ruolo sempre più importante nell’ambito processuale al punto che l’elevata professionalità degli esperti è sempre più richiesta nelle aule di giustizia. Di pari passo si è arricchita la letteratura a riguardo e l’organizzazione di numerosi convegni internazionali ha permesso fruttuosi confronti tra gli esperti di tutto il mondo, concretizzando il rapido sviluppo delle geoscienze applicate a numerose tipologie di reati.

Infine, diverse associazioni scientifiche e scientifico-forensi, sia nazionali che internazionali, hanno creato sezioni e gruppi di lavoro dedicati alle geoscienze forensi. Per esempio, nell’ambito della International Union of Geological Scien-

ce (IUGS), nel 2011 è stata creata la Initiative on Forensic Geology (IFG), un gruppo di lavoro che ha riunito numerosi esperti internazionali del mondo accademico, degli istituti di polizia scientifica e liberi professionisti, con lo scopo di divulgare dati e informazioni sulle geoscienze applicate alle indagini penali, civili ed ambientali, nonché di organizzare convegni e training sia per le forze dell'ordine che per la comunità scientifica<sup>1</sup>.

Con le medesime finalità e grazie a un'ampia collaborazione nazionale e internazionale di massimi esperti, anche l'istituzione del team di Geoscienze Forensi – Italia<sup>®</sup> risulta un unicum nel panorama forense italiano, offrendo una vasta gamma di servizi a supporto di indagini geoscientifiche in ambito investigativo e processuale<sup>2</sup>.

### *1.2.1. L'omicidio dell'onorevole Aldo Moro: uno dei primi casi italiani di geoscienze applicate (Lombardi – 1978)*

In Italia, il primo caso di alto profilo in cui furono effettuate indagini pertinenti uno degli ambiti applicativi delle geoscienze forensi fu il sequestro e l'assassinio dell'onorevole Aldo Moro nel 1978, in cui furono analizzate tracce di terreno in fase processuale. Le analisi furono eseguite dal professor Gianni Lombardi del Dipartimento di Scienze della Terra della “Sapienza” – Università di Roma.

Il corpo di Moro fu rinvenuto nel portabagagli di una Renault 4 al centro di Roma. Nel risvolto dei pantaloni, sulle scarpe di Moro, sulla coperta con la quale fu avvolto il suo corpo, nel bagagliaio e sui parafanghi della macchina furono trovate tracce di sabbia, frammenti di vegetali, vernice e fibre di poliestere. Fu chiesto al professor Lombardi di eseguire le analisi delle sabbie per determinarne la probabile provenienza, al fine di individuare il covo dei brigatisti.

I campioni di sabbia prelevati dai vestiti di Moro e dalla coperta nella quale era avvolto erano simili: mostravano grani arrotondati e ben classati, vale a dire con dimensioni estremamente omogenee, caratteristiche, queste, tipiche di ambienti costieri nei quali la sabbia si muove velocemente. Inoltre, tali campioni presentavano frammenti di conchiglie marine, pollini, frammenti di piante e nel campione prelevato dalle scarpe alcuni granelli di sabbia erano attaccati l'un l'altro da piccoli brandelli di petrolio greggio.

Fin qui, le analisi fornivano forti evidenze che i campioni di sabbia potevano provenire da spiagge di litorale marino, probabilmente in vicinanza di un impianto per lo scarico di olio minerale, ove si svolgono operazioni di manifattura di

<sup>1</sup> Per maggiori informazioni sulle attività della IUGS-IFG si può consultare il sito internet [www.forensicgeologyinternational.com](http://www.forensicgeologyinternational.com).

<sup>2</sup> Le attività del team Geoscienze Forensi – Italia<sup>®</sup> sono consultabili sul sito internet [www.geoscienzeforensiitalia.com](http://www.geoscienzeforensiitalia.com).

imbarcazioni in fibra di vetro. L'approfondito studio mineralogico e petrografico permise di identificare la presenza di numerose tipologie di minerali (quarzo, feldspati, anfiboli, muscovite, biotite, clorite, calcite, dolomite, apatite, magnetite, titanite e granato), frammenti di rocce metamorfiche del basamento cristallino, vulcaniti e calcarei con microfossili tipici dell'area costiera tirrenica, che si estende per circa 150 chilometri da Tarquinia a Terracina nei dintorni di Roma.

In mancanza di dati bibliografici relativi alla composizione delle sabbie in tali aree ed al fine di poter effettuare una comparazione con i campioni prelevati dagli indumenti di Moro, il professor Lombardi dovette raccogliere campioni di sabbia lungo i 150 chilometri di costa, in tutti quei luoghi che presentavano strade accessibili, ma che erano abbastanza isolati e remoti da potersene servire come nascondiglio di un ostaggio. Lombardi campionò circa 92 sabbie da altrettanti luoghi e li confrontò con le tracce di sabbia prelevate dagli indumenti di Aldo Moro. Tale confronto permise di evidenziare che le sabbie potevano provenire da un'area costiera lunga circa 11 chilometri, nell'area compresa tra Focene e Marina di Palidoro, nei pressi dall'aeroporto internazionale Leonardo da Vinci di Fiumicino. A sostegno di questi risultati, i frammenti vegetali trovati sul corpo di Moro risultarono molto simili alla vegetazione presente nell'area suddetta.

Gli inquirenti, invano, cercarono a lungo in questa zona possibili covi dei brigatisti. Anni più tardi gli investigatori scoprirono un covo a sud-est di Roma, in cui, come poi confermato dai brigatisti stessi arrestati, fu imprigionato ed ucciso l'allora presidente della Democrazia Cristiana. Inoltre, vi fu la confessione di aver depositato della sabbia di litorale sui vestiti di Moro per depistare le indagini.

A tutt'oggi ancora ci sono forti dubbi sulla plausibilità di queste confessioni, tuttavia il caso rimane uno dei più famosi in tutto il mondo per il lavoro di dettaglio svolto da Lombardi sui campioni di sabbia.

### 1.3. Le geoscienze forensi oggi

Pedologia, geochimica, geofisica, geoarcheologia, geologia applicata, geotecnica sono tra le discipline delle geoscienze che, a livello mondiale, hanno dimostrato essere utili e fattivi strumenti di indagine in ambito forense.

La pedologia forense ricerca, studia e analizza le tracce di terreno collegate a un crimine. Il terreno può fornire importanti informazioni nell'ambito di un'indagine giudiziaria, perché può essere trasferito da una superficie all'altra per contatto e deposizione. I numerosi e differenti elementi presenti nei terreni e l'estrema variabilità delle loro proporzioni fanno sì che la tipologia dei terreni esistenti sia infinita, con la ovvia impossibilità di trovare campioni identici.

Le analisi pedologiche, quindi, sono finalizzate alla determinazione del grado di compatibilità tra i campioni di terreno o della loro comune provenienza dal

## 2. Le scienze criminalistiche e i procedimenti giudiziari

di Roberto V.O. Valli

*Molto ragionamento e poca osservazione conducono all'errore.  
Molta osservazione e poco ragionamento conducono alla verità.*

Alexis Carrel

### 2.1. Le indagini scientifiche nei procedimenti penali

Fino a trent'anni fa non era necessario, per essere un buon avvocato, interessarsi di DNA, di dattiloscopia, di indagini foniche, di chimica merceologica... o di geologia forense. Ora invece nel patrimonio di conoscenze del giurista entrano a far parte saperi del tutto estranei a quelli della sua formazione di base: egli deve essere in grado di controllare anche materie che esulano dalle proprie competenze specifiche. Dal canto suo, anche lo scienziato ha bisogno del giurista per assicurare l'utilizzabilità nel processo delle applicazioni della sua scienza. Un geologo, per quanto autorevole, difficilmente potrà impiegare validamente in un procedimento penale le tecniche nelle quali è esperto, senza conoscere le regole che presiedono alla formazione, acquisizione e valutazione della prova nel processo.

Del resto proprio grazie all'incontro tra scienza e diritto si è registrato, sempre di più nel corso degli anni, l'accrescimento del peso probatorio delle indagini scientifiche nel processo consentendo in tal modo, attraverso il ricorso a tecniche sempre più raffinate, di ridurre l'area del ragionevole dubbio e di raggiungere più facilmente quel grado di certezza necessario ai fini dell'esistenza della prova. Non è però sempre facile comprendere dove la scienza può arrivare, e soprattutto se è utile e possibile farvi ricorso<sup>1</sup>. Non sempre poi l'evoluzione della scienza

<sup>1</sup> In proposito si richiama quanto osservato in premessa alle *Linee guida per l'acquisizione della prova scientifica nel processo penale*, documento elaborato da un gruppo di autorevoli esperti (a livello interdisciplinare) nel corso del Seminario sul tema "La prova scientifica nel processo penale" tenutosi a Siracusa e promosso dall'ISIS (Istituto Superiore Internazionale di Scienze Criminali), pubblicato in *Scienza e processo penale: linee guida per l'acquisizione della prova scientifica*, a cura di De Cataldo Neuburger L., Cedam, 2010, p. 3: "Vi è oggi piena consapevolezza che il metodo cosiddetto scientifico – inteso come quel 'Metodo' che garantirebbe risultati di assoluta certezza – non esiste. Ciò, tuttavia, non deve indurre allo scetticismo né tanto meno a ritenere che un metodo equivalga all'altro; ma semplicemente a ridimensionare le aspettative e le pretese di 'Verità' inerenti alla scienza. In quest'ottica, si può considerare scientifico quel metodo che si svolga attraverso il dialogo tra esperti e fornisca criteri di controllabilità degli enunciati che ne scaturiscono."

rafforza le certezze, anzi talvolta apre la strada a nuove problematiche tali da mettere in dubbio criteri valutativi ritenuti un tempo consolidati. Come osservato da Popper, “il metodo della scienza è razionale: è il migliore che abbiamo. Perciò è razionale accettare i suoi risultati; ma non nel senso di confidare ciecamente in essi: non sappiamo mai in anticipo dove potremmo essere piantati in asso”<sup>2</sup>.

Il problema è allora quello di comprendere quali siano i presupposti per la validità e affidabilità degli strumenti di indagine tecnica e scientifica che vengono utilizzati nel corso del procedimento; si tratta cioè di comprendere come e in che modo la prova scientifica<sup>3</sup>, sia essa introdotta dalle parti o dal giudice, possa produrre un risultato utile nel processo. Il problema si pone non tanto per gli strumenti scientifico-tecnici cosiddetti *tradizionali* (per i quali il quesito sull'affidabilità del mezzo di prova è stato già risolto positivamente, tanto che agli stessi si fa comunemente ricorso nelle aule giudiziarie), bensì per quelli normalmente indicati in dottrina col termine di *nuova prova scientifica*, ossia strumenti che si caratterizzano per essere nuovi o controversi, ed aventi contenuto di elevata specializzazione (cosiddetti *novel science*)<sup>4</sup> e dunque, in definitiva, non sempre di sicura attendibilità.

Il tema posto da questi strumenti, qualunque sia la loro finalità, non riguarda solo il momento della decisione, ma anche le fasi precedenti, a partire da quella dell'ammissione della prova<sup>5</sup>. In tale momento infatti già potrebbe essere compiuta un'indagine sulla validità della prova o tecnica utilizzata. Si tratta di indagine che viene spesso omessa, trascurata, poiché si tende a ritenere implicita la validità degli strumenti scientifici ad applicazione forense, ma naturalmente non è così.

La validità, in astratto, dello strumento tecnico-scientifico andrebbe valutata già prima di esperire la prova, in sede di ammissione appunto, al fine di evitare di disperdere tempo e risorse processuali preziose per l'esperimento di prove che si riveleranno poi inevitabilmente inattendibili e quindi non utilizzabili ai fini della decisione.

Nel nostro ordinamento non sono stati elaborati, come è avvenuto altrove, pa-

<sup>2</sup> Popper K.R., Bartley W.W., *Poscritto alla logica della scoperta scientifica. Volume 1*, Il Saggiatore, 1984, p. 87.

<sup>3</sup> Secondo Cass., Sez. 1, Sentenza 13 aprile 2011, n. 15139, in *Proc. Pen. e Giust.*, Anno I, n. 5/2011, p. 123, per prova scientifica deve intendersi “il mezzo ad efficacia dimostrativa che utilizza la legge scientifica per accertare il fatto ignoto ed è preordinato a procurare, nell'ambito di un procedimento che coinvolge le parti in un serrato contraddittorio tecnico, un sapere al giudice in relazione ad un'evenienza di cui non gli è più possibile la diretta percezione”. Sull'argomento v. anche Dominioni O., *La prova penale scientifica. Gli strumenti scientifico-tecnici nuovi o controversi e di elevata specializzazione*, Giuffrè, 2005, imprescindibile punto di paragone per chiunque intenda approfondire il tema della prova scientifica.

<sup>4</sup> Dominioni O., *La prova penale scientifica*, cit., p. 13, nonché pp. 75 e ss.

<sup>5</sup> Brusco C., *La valutazione della prova scientifica*, in *Dir. Pen. Proc.*, Dossier Processo Penale n. 6/2008, p. 23.

rametri di riferimento per orientare il giudice nella valutazione in ordine alla validità scientifica della prova esperita nel processo<sup>6</sup>. Uno sguardo oltreconfine ci consente di rilevare come negli Stati Uniti una tale problematica è stata ampiamente affrontata non solo a livello legislativo, ma anche giurisprudenziale. Normalmente si citano in proposito i due *leading cases*, *Frye vs. United States*<sup>7</sup>, deciso nel 1923 dalla Corte d'appello (Circuit Court) del distretto di Columbia, e *Daubert vs. Merrel Dow Pharmaceuticals*<sup>8</sup>, deciso, nel 1993, dalla Suprema Corte Federale, nonché le *Federal rules of evidence* del 1975 (in particolare le *rules 702 e 703*, come da ultimo emendate, dedicate alla *testimony by experts*). In particolare, nel caso *Daubert*, la Corte Suprema USA, mostrando un atteggiamento di generale apertura verso le innovazioni che l'evoluzione scientifica e tecnologica può offrire alle parti nel processo, ha indicato alcuni criteri idonei a valutare l'ammissibilità delle prove scientifiche (e dunque a dare ingresso processuale anche alla cosiddetta *scienza nuova*) e, in sostanza, a verificare la validità e l'attendibilità di dette prove. Il primo criterio elaborato dalla Federal Supreme Court è quello della verificabilità, controllabilità o falsificabilità (*i.e.*: confutabilità), della

<sup>6</sup> Va riconosciuto a Dominioni O., *La prova penale scientifica*, cit., il merito di aver teorizzato con sistematicità, per primo nel panorama italiano, i criteri che il giudice deve osservare per l'ammissione, assunzione e valutazione della prova scientifica e, in particolare, degli strumenti di prova di elevata specializzazione scientifica. In precedenza solo alcuni, pur pregevoli, studi isolati, tra i quali, senza alcuna pretesa di completezza: Denti V., *Scientificità della prova e libera valutazione del giudice*, in *Riv. Dir. Proc.*, 1972, 414; Taruffo M., *Le prove scientifiche nella recente esperienza statunitense*, in *Riv. Trim. dir. proc. civ.*, 1996, p. 219; Dondi A., *Paradigmi processuali ed 'expert witness testimony' nel diritto statunitense*, in *Riv. Trim. dir. proc. civ.*, 1996, 261; Canzio G., *Prova scientifica, ragionamento probatorio e libero convincimento del giudice nel processo penale*, in *Dir. Pen. Proc.*, 2003, p. 1193; Tonini P., *Prova scientifica e contraddittorio*, in *Dir. Pen. Proc.*, 2003, p. 1459.

<sup>7</sup> *Frye v. Unites States*, 293 F. 1013 (D.C. Cir., 1923). In particolare la Circuit Court della Columbia nel caso *Frye* del 1923, in cui si discuteva dell'ammissibilità come prova dei risultati sperimentali dell'utilizzazione di un poligrafo (una primordiale "macchina della verità"), aveva indicato quale unico parametro di valutazione dell'attendibilità della prova scientifica quello del consenso della comunità scientifica di riferimento (cd. *general acceptance test*), così dichiarando inammissibile la richiesta istruttoria avanzata dalla difesa. Siffatta impostazione non tardò tuttavia a manifestare i suoi limiti, non solo perché in tal modo sostanzialmente la prova scientifica "nuova" (come tale inevitabilmente priva di un giudizio di *general acceptance*) non poteva mai essere ammessa – a prescindere dalla sua validità – ma anche per l'evidente ragione che il consenso della comunità scientifica non poteva – e non può – attribuire di per sé solo ad una tecnica di indagine l'attitudine a dimostrare i fatti oggetto di accertamento.

<sup>8</sup> *Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals*, 509 U.S. 579 (1993). La sentenza, con l'opinione di minoranza del Presidente della Corte, è stata pubblicata (tradotta a cura di A. Dondi) su *Riv. Trim. dir. proc. civ.*, 1996, p. 277, in calce al commento di Angelo Dondi, *Paradigmi processuali ed 'expert witness testimony' nel diritto statunitense*, p. 261. La *Federal Supreme Court* degli USA, nella sentenza del 28 giugno 1993 relativa al caso *Daubert*, fu investita del problema dell'ammissibilità di una prova scientifica – consistente nel caso di specie nell'assunzione della testimonianza di alcuni esperti, ciascuno dei quali altamente qualificato – fondata su principi che non apparivano sufficientemente consolidati da ricevere generale accoglienza nella comunità scientifica dello specifico campo di ricerca.

teoria o tecnica posta a fondamento della prova. Il secondo criterio è rappresentato dalla sottoposizione della teoria o tecnica al controllo, alla revisione critica da parte degli altri membri della comunità scientifica (*peer review*) nonché dalla pubblicazione dei risultati delle relative ricerche su riviste specializzate (*publication*). La Corte ha poi indicato un ulteriore (duplice) criterio in base al quale il giudice, nel vagliare l'ammissibilità della prova scientifica, deve tener conto della frequenza (o percentuale) di errore, conosciuta o potenziale, nonché della presenza di standard costanti di verifica, ossia dell'eventuale riscontro di una molteplicità di casi. Ai menzionati criteri si deve poi aggiungere quello del consenso generale da parte della comunità scientifica che, se non deve essere utilizzato quale strumento esclusivo di valutazione per l'ammissione della *expert scientific testimony* (come ritenuto precedentemente, a partire dal caso Frye), può comunque offrire conferme importanti in ordine alla validità di una teoria o tecnica scientifica che si intenda utilizzare nel processo.

I parametri individuati dalla giurisprudenza USA, proprio perché di valenza generale e obiettivamente utili per determinare se una prova scientifica sia affidabile, costituiscono di fatto un imprescindibile punto di riferimento anche per l'interprete italiano, ogniqualevolta egli intenda compiere un'indagine seria in ordine alla validità scientifica della prova che si propone di introdurre nel processo.

Del resto la stessa Corte di Cassazione italiana ha dimostrato di riconoscere validità ai citati criteri dettati dalla giurisprudenza statunitense.

In un primo tempo essa, pur omettendo di indicare i parametri da osservare nella verifica della validità degli strumenti scientifici "nuovi" di cui le parti chiedevano l'ammissione, ha comunque evidenziato la necessità per il giudice di compiere una tale verifica ogniqualevolta detti strumenti non avessero trovato "generale accettazione" all'interno della comunità scientifica di riferimento. La nostra Corte Suprema sembrava dunque, sia pur senza dirlo apertamente, ispirarsi al criterio – elaborato nel caso Frye del 1923 – della *general acceptance* da parte della comunità scientifica<sup>9</sup>.

Più recentemente la Corte regolatrice, richiamando in modo esplicito le linee

<sup>9</sup> Si può ricordare in proposito la sentenza Cass., sez. 5, n. 8416 del 9 luglio 1993 (dep. 3 settembre 1993), Rv. 196264, Ietto, che per prima ha affrontato il problema della prova scientifica di tipo innovativo, in un caso in cui i periti, nel contesto di una perizia fonica per il riconoscimento della voce, avevano presentato le loro conclusioni come il risultato di un nuovo metodo di indagine, definito *parametrico*, da essi stessi messo a punto. La Corte in particolare ha affermato che il giudice, difettando il "vaglio di una pluralità di casi" e il "confronto critico tra gli esperti", si da non potersi considerare i metodi utilizzati ancora "acquisiti al patrimonio della comunità scientifica", non potesse assumere senz'altro il risultato della prova dovendo prima compiere la "verifica circa la validità del nuovo approccio metodologico". Similmente: Cass. Sez. 2, Sentenza n. 834 del 17 ottobre 2003 (dep. 14 gennaio 2004) Rv. 227854, Trecarichi; Cass. S.U. Sentenza n. 9163 del 25 gennaio 2005 (dep. 8 marzo 2005) Rv. 230317, Raso, in motivazione; Cass. Sez. 4, Sentenza n. 4675 del 17 maggio 2006 (dep. 6 febbraio 2007) Rv. 235658, Bartalini (relativa al noto caso del petrolchimico di Porto Marghera).

guida elaborate oltreoceano, ha mostrato un parziale superamento delle proprie posizioni, indicando per la prima volta i criteri ai quali il giudice può ispirarsi nel delicato e difficile compito di vagliare l'affidabilità della prova scientifica, specie ove innovativa e dunque priva del riscontro di una molteplicità di casi e del confronto critico tra gli esperti. Così, nella sentenza n. 31456 del 2008<sup>10</sup>, relativa al tristemente noto omicidio di Cogne, in tema di applicazione della *Bloodstain Pattern Analysis* – tipo di indagine che studia la morfologia e disposizione delle macchie ematiche rinvenute sugli oggetti presenti sul luogo del delitto, per verificare la provenienza dei colpi inferti alla vittima e la reciproca posizione di quest'ultima e dell'aggressore – la Corte ha evidenziato come nel caso specifico fossero stati rispettati “anche i rigorosi criteri di validazione della prova scientifica (aventi per l'A.G. italiana natura meramente orientativa) elaborati dalla giurisprudenza degli USA”.

Da ultimo la Suprema Corte, con la sentenza n. 43786 del 2010 (sentenza “Cozzini”)<sup>11</sup>, ha intrapreso una vera e propria opera di ricostruzione dei criteri che il giudice di merito deve seguire nella valutazione della validità della prova scientifica<sup>12</sup>, ispirandosi – pur senza farvi esplicito riferimento – alle linee guida dettate dalla giurisprudenza statunitense, ritenute questa volta non più solo

<sup>10</sup> Cass. Sez. 1, Sentenza n. 31456 del 21 maggio 2008 (dep. 29 luglio 2008) Rv. 240764, Franzoni, pubblicata in *Cass. Pen.*, 2009, 5, p. 1840, con nota di Caprioli F., *Scientific evidence e logiche del probabile nel processo per il delitto di Cogne*, p. 1872.

<sup>11</sup> Cass., Sez. 4, Sentenza n. 43786 del 17 settembre 2010 (dep. 13 dicembre 2010) Rv. 248943 Cozzini.

<sup>12</sup> La Corte, chiamata ad esaminare il tema se il mesotelioma pleurico da esposizione a fibre di amianto sia una malattia “dose-correlata”, dove anche le esposizioni successive a quelle che hanno innescato il processo patologico hanno efficienza causale perché accelerano il processo di evoluzione della malattia anticipando il decesso, oppure se, una volta insorto il processo patologico, le successive esposizioni siano ininfluenti (secondo la teoria della *dose killer* o *dose trigger*), ha annullato con rinvio la sentenza impugnata, ritenendo che non fosse stata adeguatamente compiuta l'indagine in ordine alla validità della teoria scientifica prescelta e posta a fondamento della decisione. La Corte ha così ritenuto di individuare alcune “indicazioni basilari” che devono guidare il giudice nell'apprezzamento della prova scientifica: “Per valutare l'attendibilità di una teoria occorre esaminare gli studi che la sorreggono. Le basi fattuali sui quali essi sono condotti. L'ampiezza, la rigorosità, l'oggettività della ricerca. Il grado di sostegno che i fatti accordano alla tesi. La discussione critica che ha accompagnato l'elaborazione dello studio, focalizzata sia sui fatti che mettono in discussione l'ipotesi sia sulle diverse opinioni che nel corso della discussione si sono formate. L'attitudine esplicativa dell'elaborazione teorica. Ancora, rileva il grado di consenso che la tesi raccoglie nella comunità scientifica. Infine, dal punto di vista del giudice, che risolve casi ed esamina conflitti aspri, è di preminente rilievo l'identità, l'autorità indiscussa, l'indipendenza del soggetto che gestisce la ricerca, le finalità per le quali si muove.” Si tratta di indicazioni che non solo ripropongono in larga parte i criteri già enunciati dalla Corte Suprema Federale USA nel caso Daubert, ma a questi ne affiancano altri, quali la qualificazione e il grado di imparzialità dell'esperto e la considerazione delle finalità che lo animano. Indicazioni che il giudice di merito, quale fruitore delle leggi scientifiche, deve osservare dandone conto nella motivazione della sentenza, “esplicitando le informazioni scientifiche disponibili e fornendo razionale spiegazione, in modo completo e comprensibile a tutti, dell'apprezzamento compiuto”.

“meramente orientative” ma sostanzialmente vincolanti<sup>13</sup>. Si tratta di indicazioni che, seppure non ancora espressione di un orientamento consolidato, sono state prontamente recepite dalla giurisprudenza di merito<sup>14</sup>, ponendosi di fatto quale imprescindibile punto di riferimento per il giudice chiamato a misurarsi con la prova scientifica.

## 2.2. Gli accertamenti di polizia giudiziaria

Nel codice di procedura penale vi sono numerose norme che, pur non contenendo espresso riferimento alle indagini scientifiche, spesso ad esse implicitamente si riferiscono menzionando operazioni o atti che richiedono specifiche competenze tecniche e autorizzando le parti ad avvalersi del contributo di esperti in determinate discipline.

Così, a proposito dell'attività della polizia giudiziaria, l'art. 348, co. 4, c.p.p. prevede che, per il compimento – di propria iniziativa o su delega del p.m. – di atti o di operazioni finalizzate ad assicurare le fonti di prova, la polizia giudiziaria possa avvalersi di “persone idonee”, laddove l'assolvimento di quei compiti richieda “specifiche competenze tecniche”, e tali persone non potranno rifiutare la propria opera. L'art. 349, co. 2, c.p.p., entrando più nello specifico, prevede che la polizia giudiziaria possa procedere “anche eseguendo [...] rilievi dattiloscopici, fotografici, e antropometrici, nonché altri accertamenti”. L'art. 354 c.p.p. attribuisce poi alla polizia giudiziaria il potere – in ipotesi di urgenza, ove il p.m. non possa intervenire tempestivamente o non abbia ancora assunto la direzione delle indagini – di procedere “ad accertamenti e rilievi sullo stato dei luoghi e delle cose”, oppure sulle persone, se del caso disponendo il sequestro del corpo del reato e delle cose a questo pertinenti.

Tra le disposizioni richiamate l'art. 348, co. 4, c.p.p., rubricato “assicurazione delle fonti di prova”, più di ogni altra riassume i poteri investigativi attribuiti dal legislatore alla polizia giudiziaria. Esso mette bene in luce come l'esperimento di indagini tecniche e scientifiche non sia una prerogativa esclusiva del giudice e del pubblico ministero o degli esperti da costoro nominati, ma anche un potere specificamente riconosciuto alla polizia giudiziaria al fine di assicurazione delle fonti di prova.

Il legislatore, pur limitandosi apparentemente ad affermare che la polizia giudiziaria, per il compimento di accertamenti che richiedono specifiche competenze tecniche, può avvalersi di persone idonee che non possono rifiutare la loro opera,

<sup>13</sup> In tal senso v. Tonini P., *La Cassazione accoglie i criteri Daubert sulla prova scientifica. Riflessi sulla verifica delle massime di esperienza*, in *Dir. Pen. Proc.* 2011, 11, 1345.

<sup>14</sup> Si può citare in proposito la sentenza pronunciata dalla Corte d'assise d'appello di Milano, sez. II, 6 dicembre 2011, dep. 5 marzo 2012, Stasi, Pres. Conforti, Est. Tucci (consultabile on line su [www.penalecontemporaneo.it](http://www.penalecontemporaneo.it)), in relazione all'omicidio di Chiara Poggi avvenuto a Garlasco il 13 agosto 2007, peraltro annullata dalla Corte di Cassazione con sentenza in data 18 aprile 2013.

ossia gli ausiliari di p.g., in realtà implicitamente afferma anche: che la polizia giudiziaria, nello svolgimento delle indagini, può compiere pure accertamenti di natura tecnica e scientifica, che per l'appunto richiedono specifiche competenze; che tale potere di indagine, involgente l'esperienza di accertamenti tecnici, può essere esercitato sia a seguito di delega del p.m. sia di iniziativa, e dunque anche in ipotesi in assenza di delega, direttiva o consultazione con l'organo titolare delle indagini; che la polizia giudiziaria può avvalersi a tal fine di ausiliari di p.g., ma può anche non avvalersene, il che significa che essa può effettuare gli accertamenti in parola anche personalmente, verosimilmente attraverso i reparti specializzati di cui normalmente sono dotate le diverse forze di polizia.

Così, ad esempio, la Suprema Corte ha riconosciuto come validi gli accertamenti svolti dalla polizia giudiziaria sul contenuto dell'hard disk di un computer sequestrato, quale attività di p.g. volta, anche con urgenza, all'assicurazione delle fonti di prova (Cass. n. 11503/2009<sup>15</sup>), gli accertamenti dattiloscopici compiuti dalla polizia giudiziaria, inquadrabili nell'attività preliminare d'accertamento e d'assicurazione delle prove (Cass. n. 38544/2008<sup>16</sup>), i rilievi fonometrici quali tipici accertamenti "a sorpresa" da inquadrare fra le attività svolte ai sensi degli artt. 348 e 354, co. 2, c.p.p. (Cass. n. 632/2007<sup>17</sup>), e così pure gli accertamenti sulla natura stupefacente di una sostanza, eseguiti di iniziativa dalla polizia giudiziaria (Cass. n. 40180/2010<sup>18</sup>).

Chiaramente l'attività svolta dalla polizia giudiziaria deve essere sottoposta al controllo e alla direzione del p.m. che resta pur sempre il titolare delle indagini (art. 56 c.p.p.). Del resto lo stesso art. 348 c.p.p., nell'autorizzare la polizia giudiziaria a svolgere indagini di iniziativa anche dopo l'intervento dell'autorità giudiziaria, richiede espressamente che la stessa informi "prontamente" il p.m. delle attività in tal modo compiute (comma 3). Dunque essa non è libera di determinare unilateralmente le strategie di indagine da adottare: la subordinazione della polizia giudiziaria al pubblico ministero le inibisce non solo lo svolgimento di indagini che siano in contrasto con le direttive ricevute da quest'ultimo<sup>19</sup>, ma

<sup>15</sup> Cass., Sez. 1, Sentenza n. 11503 del 25 febbraio 2009 (dep. 16 marzo 2009) Rv. 243495, Dell'Aversano.

<sup>16</sup> Cass., Sez. 4, Sentenza n. 38544 del 25 giugno 2008 (dep. 10 ottobre 2008) Rv. 241022, Sparer.

<sup>17</sup> Cass., Sez. 1, Sentenza n. 632 del 07 dicembre 2006 (dep. 15 gennaio 2007) Rv. 236561, Curcio. Conf. Cass., Sez. 1, Sentenza n. 25103 del 16 aprile 2004 (dep. 03 giugno 2004) Rv. 228243, Amato. Sul punto occorre precisare tuttavia che i rilievi fonometrici, finalizzati a determinare l'intensità del rumore promanante da una fonte sonora, non richiedono di norma una valutazione critica dei dati raccolti, e non sono pertanto a rigore ascrivibili alla categoria degli accertamenti tecnici in senso proprio.

<sup>18</sup> Cass., Sez. 3, Sentenza n. 40180 del 06 ottobre 2010 (dep. 15 novembre 2010) Rv. 248566, Tumolo. Conf. Cass. Sez. 4, Sentenza n. 15384 del 02 marzo 2005 (dep. 26 aprile 2005) Rv. 231551, Calò, e Cass., Sez. 4, Sentenza n. 4817 del 20 novembre 2003 (dep. 06 febbraio 2004) Rv. 229365, De Lorenzo.

<sup>19</sup> Cass., Sez. 2, Sentenza n. 12393 del 10 agosto 2000 (dep. 30 novembre 2000) Rv. 217421, Za-

### 3. I materiali geologici

di Rosa Maria Di Maggio

*Ogni azione fatta dalla natura non si pò fare con più breve modo co' medesimi mezzi. Date le cause la natura partorisce li effetti per i più brevi modi che far si possa.*

Leonardo da Vinci, *Codice Arundel*

#### 3.1. Cenni introduttivi

I minerali, le rocce, i terreni e tutti i materiali da essi derivati vengono in contatto con l'uomo quotidianamente e assumono un ruolo precipuo in molte attività antropiche che vanno dall'industria all'agricoltura, dall'edilizia al tempo libero.

I materiali geologici, essendo i principali costituenti della superficie terrestre, entrano in contatto con l'uomo o vengono volontariamente utilizzati anche in attività illecite o durante lo svolgimento di un crimine e a volte possono ricoprire un ruolo primario come elementi di prova<sup>1</sup>.

In questo capitolo vengono trattati i materiali geologici maggiormente coinvolti nelle indagini forensi e per alcuni di essi si illustra anche a che titolo possono entrare a farne parte. Il coinvolgimento nelle indagini forensi dei materiali geologici incoerenti, quali le sabbie, i suoli e le polveri, verrà trattato nel quarto capitolo. Tuttavia, per poter meglio comprendere le analisi svolte sui materiali geologici incoerenti ai fini forensi e la potenzialità dei dati ottenibili, è necessario conoscerne le modalità genetiche ed evolutive, le quali vengono illustrate in questa sezione.

#### 3.2. I minerali

Un minerale è una sostanza solida naturale che ha una caratteristica struttura interna dovuta a una regolare disposizione tridimensionale degli atomi<sup>2</sup>; ha una

<sup>1</sup> Si pensi, per esempio, a tracce di terriccio che, durante lo svolgimento di un reato, si depositano sulle calzature dell'autore di un delitto, o all'uso improprio di materiali lapidei come arma contundente, o all'utilizzo di cavità sotterranee o porzioni di terreno nei quali occultare corpi, armi o rifiuti tossici.

<sup>2</sup> I minerali sono caratterizzati dall'avere una ben precisa struttura cristallina; a livello atomico possiedono un reticolo cristallino formato dalla ripetizione di una struttura geometrica detta *cella elementare*. La struttura cristallina influenza notevolmente le proprietà fisiche di un minerale; per esempio, diamante e grafite hanno analoga composizione chimica, ma le loro differenti strutture cristalline rendono la grafite molto tenera e il diamante molto duro.

composizione chimica definita, o variabile entro i limiti ben precisi, e determinate caratteristiche fisiche e chimiche. I minerali possono essere costituiti da un solo elemento chimico, come l'argento (Ag) o lo zolfo (S), da uno o più elementi legati in un composto chimico semplice, come per esempio il quarzo ( $\text{SiO}_2$ ) o la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), o da composti di formula chimica complessa comprensiva di molecole di acqua di cristallizzazione ( $\text{OH}$  o  $\text{H}_2\text{O}$ ). Ad oggi sono note oltre 4000 specie di minerali, della cui classificazione si occupa l'International Mineralogical Association (IMA), responsabile dell'approvazione e della denominazione di nuove specie rinvenute in natura.

I minerali possono essere considerati i costituenti fondamentali dei materiali geologici, anche quelli di interesse forense. Essi sono presenti nei materiali incoerenti, quali le sabbie e i suoli<sup>3</sup>, come anche nelle rocce<sup>4</sup>. Inoltre, gran parte delle gemme è costituita da minerali rari con particolari proprietà di bellezza e resistenza. I minerali sono materiali indispensabili nelle attività umane per le quali hanno rappresentato da sempre una risorsa primaria. Alcuni minerali vengono utilizzati tal quali, come il talco, lo zolfo o l'amianto; altri vengono trattati per ottenere materiali utilizzabili nei più svariati campi di applicazione. Si pensi al loro impiego nei componenti elettronici e meccanici, nei materiali da costruzione e ceramici, nelle vernici e nei pigmenti, nei cosmetici, nell'industria farmaceutica e così via. Inoltre, le strutture cristalline prodotte in natura, in tempi geologici, rappresentano una fonte di ispirazione per la sintesi, vale a dire per la riproduzione artificiale, di materiali tecnologicamente avanzati.

Lo studio dei minerali, della loro struttura e della loro composizione, quindi, riveste un interesse forense non solo per le indagini inerenti le geoscienze, ma anche per tutte quelle scienze criminalistiche che hanno come fine l'identificazione di un materiale di qualsiasi natura, sia essa organica, inorganica o sintetica.

Sui minerali vengono svolte analisi chimiche finalizzate all'identificazione della loro struttura cristallina e degli elementi che li compongono, nonché analisi fisiche che ne determinano le proprietà principali, quali la durezza, il colore, la lucentezza, la sfaldatura e/o la frattura, la birifrangenza, la densità, la conducibilità e l'eventuale fluorescenza, magnetismo e radioattività.

### 3.3. Le rocce

Una roccia è un aggregato di minerali e/o sostanze amorfe (cioè senza una struttura cristallina, per esempio i vetri), formatosi naturalmente per processi diversi. Le rocce vengono suddivise, in base al loro processo di formazione, in tre grandi

<sup>3</sup> Le proprietà chimico-fisiche dei terreni dipendono grandemente dai minerali che li costituiscono; si pensi, per esempio, al legame tra i minerali argillosi e i fenomeni franosi.

<sup>4</sup> La rilevanza che lo studio dei minerali riveste nell'ambito della geologia e delle scienze dei materiali viene efficacemente riassunta in un aforisma secondo il quale "se le rocce sono il vocabolario della geologia, i minerali ne costituiscono l'alfabeto".

famiglie: le rocce ignee, che si suddividono in intrusive ed effusive, le rocce sedimentarie e le rocce metamorfiche.

Le rocce ignee hanno in comune una genesi per consolidazione di masse fluide ad alta temperatura. Le modalità di consolidazione possono avvenire in profondità, all'interno della crosta terrestre, dando origine alle rocce intrusive, o a giorno, dando origine alle rocce effusive o vulcaniche. Le rocce sedimentarie si formano sulla superficie terrestre ad opera di agenti esogeni. Tali rocce si generano, prevalentemente, tramite il riutilizzo dei materiali delle formazioni rocciose affioranti, i cui prodotti di disfacimento si depositano attraverso processi di natura meccanica, chimica e biologica. Le rocce metamorfiche si generano per processi ad alte temperature e alte pressioni ai quali vengono sottoposte rocce preesistenti<sup>5</sup>. Questa tipologia di rocce può quindi derivare dalla trasformazione di rocce sedimentarie, rocce ignee o da altre metamorfiche. In ciascuna roccia sono impressi i processi che hanno portato alla sua formazione e alle sue caratteristiche; attraverso il loro studio, quindi, è possibile risalire alle condizioni ambientali in cui si è formata. Esistono migliaia di tipi di rocce e con vari metodi analitici si può valutare l'analogia tra campioni in funzione delle loro modalità genetiche.

Le rocce sono materiali geologici che spesso vengono coinvolti nelle dinamiche delittuose sia perché sono presenti in frammenti nei terreni<sup>6</sup>, quindi nei materiali geologici incoerenti, sia perché vengono di frequente utilizzate come oggetto contundente o balistico (figura 3.1).



Figura 3.1. Blocco di leucite impiegato per la pavimentazione delle strade urbane, utilizzato come proiettile durante una sassaiola

Generalmente sulle rocce vengono eseguite analisi identificative finalizzate sia alla comparazione tra più campioni sia alla determinazione della loro provenienza.

<sup>5</sup> Manzoni M., *Dizionario di geologia*, Zanichelli, 1983, cit.: “Il metamorfismo è il processo di trasformazione strutturale, mineralogica e chimica delle rocce sottoposte all’effetto di pressioni di carico, pressioni orientate, temperature, migrazione di fluidi ed altri fattori fisico-chimici diversi da quelli dell’ambiente originario della roccia”.

<sup>6</sup> Si veda paragrafo 4.3.1.2.

### 3.3.1. Il danneggiamento delle tombe ebraiche (Di Maggio, Nuccetelli – 2002)

Nell'estate del 2002, alla vigilia di una celebrazione religiosa ebraica, nel cimitero monumentale del Verano in Roma, alcune sepolture ebraiche furono danneggiate: le lapidi erano state spezzate, alcune tombe erano state aperte e la ferocia degli autori era arrivata al punto di scoperchiare alcune bare. Era la prima volta che accadevano episodi di intolleranza razziale al cimitero monumentale di Roma; si temeva la presenza di falangi neonaziste nella capitale o, alternativamente, che tale atto fosse collegato agli eventi di politica internazionale relativi alla questione israelo-palestinese.

Dopo qualche giorno, le indagini indirizzarono i sospetti su alcuni giardinieri che lavoravano abusivamente nel cimitero. La Polizia effettuò un sopralluogo presso il cimitero durante il quale furono sequestrati gli attrezzi da giardinaggio appartenenti ai giardinieri indagati. Insieme agli attrezzi furono trovati dei picconi e delle spranghe di ferro, sui quali vi erano delle tracce di materiale bianco. I giardinieri affermarono che usavano quegli attrezzi per fare alcuni lavori di manutenzione all'interno del cimitero, utilizzando calce e cemento; tuttavia vi era il sospetto che i giardinieri avessero usato le spranghe e i picconi per danneggiare le tombe. A tale scopo si reperirono dei campioni delle lapidi danneggiate, che erano costituite da marmo e travertino, per compararli con il materiale bianco rinvenuto sugli attrezzi. L'analisi al microscopio stereoscopico<sup>7</sup> permise di studiare in dettaglio la morfologia delle tracce bianche che risultavano di aspetto pastoso, non compatto, facilmente asportabili, e presentavano delle striature micrometriche il cui orientamento era compatibile con un movimento degli attrezzi dall'alto verso il basso (figura 3.2).

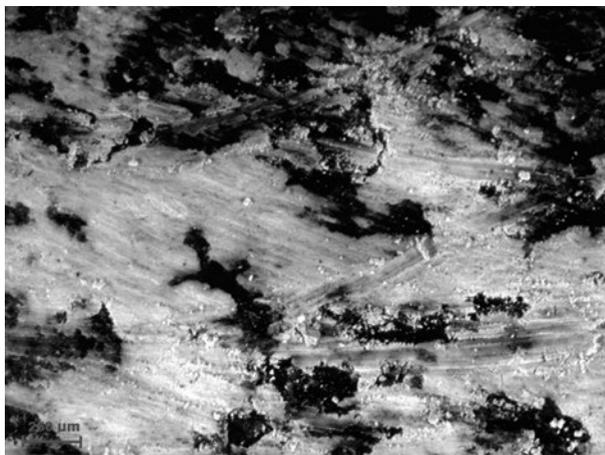


Figura 3.2. Striature di materiale bianco presente sulla testa di un attrezzo sequestrato ai giardinieri indagati

<sup>7</sup> Si veda paragrafo 5.5.

L'analisi in diffrazione a raggi X<sup>8</sup> consentì di identificare calcite in abbondanza e secondariamente quarzo e plagioclasti sia nelle tracce di materiale bianco che nei campioni lapidei. Per escludere la presenza di tracce di materiali da costruzione sugli attrezzi, si svolse un'analisi su diverse tipologie di calce, malte e cementi, prese come termini di riferimento, che risultarono essere composte principalmente da calcite, portlandite e larnite, quindi da fasi cristalline totalmente differenti da quelle presenti nelle tracce di materiale bianco.

Per ulteriori conferme, furono eseguite analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM-EDX)<sup>9</sup> per identificare gli elementi chimici presenti nelle tracce di materiale bianco, nei campioni lapidei e nei materiali da costruzione presi come termini di riferimento. Il materiale sugli attrezzi e i campioni delle lapidi presentavano calcio in abbondanza e secondariamente alluminio e silicio, con le stesse abbondanze percentuali. I materiali da costruzione contenevano calcio e silicio in abbondanza, ma non presentavano alluminio.

Tali risultati fornirono la prova che le tracce di materiale bianco sugli attrezzi non erano state lasciate da materiali da costruzione, quali calce, malte o cementi, ma più probabilmente da un contatto violento con le lapidi.

### 3.4. Le sabbie

Le sabbie sono depositi clastici sciolti composti da almeno il 50% delle particelle aventi dimensioni comprese tra 2 millimetri e 0,063 millimetri.

Virtualmente, le sabbie possono trovarsi ovunque sulla superficie terrestre, ma comunemente si trovano lungo le fasce costiere, i fiumi, i laghi e laddove gli agenti esogeni, quali l'acqua e il vento, agiscono frequentemente con energie abbastanza alte.

Le sabbie possono formarsi attraverso tre principali meccanismi: per erosione di rocce preesistenti, di qualunque natura, per precipitazione chimica da acque soprassature in ioni, per accumulo di scheletri e gusci di organismi, come per esempio le conchiglie (figura 3.3). Nel primo caso la composizione di una sabbia, così come il colore con il quale essa si presenta, dipende dalle rocce che l'hanno generata ed è quindi strettamente legata al bacino idrografico di provenienza<sup>10</sup>.

Le rocce locali sono la fonte della maggior parte dei granuli che costituiscono la sabbia e, siccome la sabbia si forma in differenti ambienti della superficie terrestre, essa può mostrare caratteristiche molto differenti da un luogo all'altro, con ampie variabilità composizionali e differenti micro tessiture e morfologie dei

<sup>8</sup> Si veda paragrafo 5.7.

<sup>9</sup> Si veda paragrafo 5.8.

<sup>10</sup> Per esempio, in prossimità di un vulcano, la sabbia sarà tendenzialmente scura; nei pressi di una barriera corallina, la sabbia apparirà bianco-rosata; in mari non tropicali la composizione della sabbia rispecchierà quella delle rocce nelle aree montuose circostanti.

singoli granuli. Per tale motivo, lo studio delle sabbie permette di identificare specifiche aree di formazione.

In generale, le tecniche analitiche e la terminologia adottate nello studio geologico delle sabbie possono essere applicate, eccetto qualche eccezione, a qualsiasi tipo di sedimento sciolto a prescindere dalle dimensioni delle particelle che lo costituiscono.

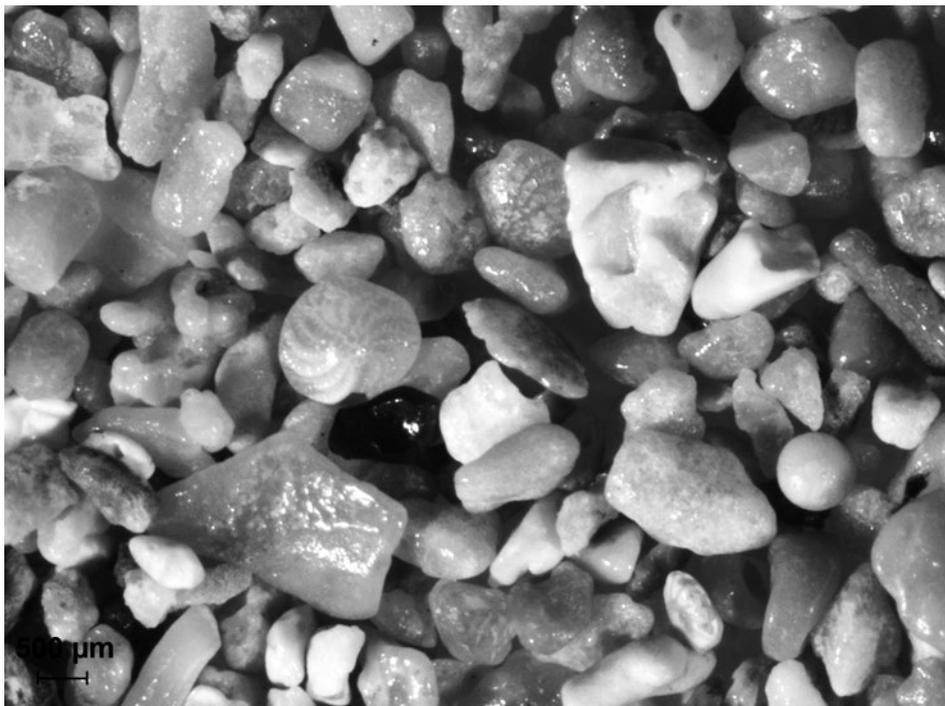


Figura 3.3. Campione di sabbia di litorale marino reperita su una spiaggia pugliese e utilizzata come termine di confronto con tracce di terreno presenti sulla scena di un crimine

I principali processi responsabili della formazione e l'evoluzione delle sabbie, così come di tutti i materiali geologici incoerenti, sono l'erosione, il trasporto, la sedimentazione e gli stadi iniziali della diagenesi.

#### *3.4.1. L'erosione e il trasporto*

I processi erosivi comprendono principalmente l'alterazione e la conseguente disgregazione delle rocce che, originate in determinate condizioni chimico-fisiche e portate in superficie da cause tettoniche e/o erosive, subiscono trasformazioni che determinano nuovi equilibri chimico-fisici idonei alle mutate condizioni am-

bientali. Queste trasformazioni possono essere dovute a processi fisici, chimici e biologici.

I processi fisici comprendono la frammentazione delle rocce e la successiva riduzione dei frammenti e generalmente sono legati all'attacco meccanico degli agenti esogeni, quali le acque, il vento o il ghiaccio, alla dilatazione delle rocce conseguente a variazioni termiche e a cause strutturali e tettoniche. I processi chimici avvengono per attacco chimico delle acque, la cui azione solvente può variare in funzione della temperatura, del pH (concentrazione degli ioni  $H^+$ ) e dell'eH (potenziale di ossidoriduzione). I processi biologici sono più limitati rispetto ai precedenti, perché agiscono in dettaglio, e sono legati all'attività di alcuni organismi che per necessità biologiche disgregano le rocce per processi chimici e meccanici. Il trasporto del materiale disgregato dall'erosione può essere messo in opera da cause fisiche, chimiche e biologiche e comprende principalmente: il trasporto di sostanze in sospensione, sul fondo e per via chimica da parte delle acque, il trasporto biologico, il trasporto eolico e il trasporto glaciale. Il trasporto in sospensione interessa le particelle più fini ed è caratterizzato da lunghi tratti in cui la particella resta sospesa nel fluido che provoca il suo movimento. Nel trasporto per sospensione è compreso anche il trasporto per saltazione, dove le particelle con dimensioni intermedie sono sottoposte a balzi di lunghezza proporzionale al loro peso. Il trasporto sul fondo interessa le particelle più grandi e più pesanti, le quali vengono messe in movimento per trascinamento o rotolamento. Il trasporto per via chimica avviene per sospensione colloidale o per soluzione: il primo interessa le sostanze inorganiche quasi insolubili, il secondo interessa tutte le altre sostanze e dipende dalle loro caratteristiche di solubilità, dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche chimiche del solvente. Il trasporto biologico è operato da organismi viventi che sottraggono sostanze chimiche all'ambiente e le depositano dopo la loro morte in luoghi anche lontani dal luogo di origine. Il trasporto eolico avviene per mezzo del vento; le particelle vengono prevalentemente trasportate per sospensione, nel caso, per esempio, di ceneri vulcaniche, o per saltazione, nel caso delle sabbie. Nel trasporto glaciale il mezzo trasportante è il ghiaccio che mobilita i detriti, anche di grandi dimensioni, e può depositarli a notevoli distanze dal luogo di origine.

### 3.4.2. *La sedimentazione e la diagenesi*

La sedimentazione è il deposito e l'accumulo di materiali solidi organici e inorganici sulla superficie subaerea o subacquea del globo terrestre. I processi di sedimentazione comprendono: la precipitazione dei soluti dalle acque, processi gravitativi e tutte le condizioni in cui l'energia del trasporto diminuisce fino ad esaurire.

## 5. Le analisi sui terreni e su altri materiali geologici

di Rosa Maria Di Maggio

*Uno scienziato nel suo laboratorio non è soltanto un tecnico,  
è anche un fanciullo posto di fronte a fenomeni naturali  
che lo impressionano come un racconto di fate.*

Marya Sklodowska, alias Maria Curie

### 5.1. Cenni introduttivi

Nel presente capitolo vengono illustrate le tecniche di laboratorio più frequentemente utilizzate per lo studio dei materiali geologici, al fine di accennarne i principi teorici e di introdurre le informazioni ottenibili dai risultati analitici nelle applicazioni di geologia forense<sup>1</sup>.

Generalmente, la caratterizzazione dei materiali geologici prevede l'utilizzo di poche tecniche analitiche finalizzate al tipo di determinazione che si vuole effettuare. La caratterizzazione dei terreni, tuttavia, essendo essi composti da numerosi componenti, prevede un maggior numero di analisi mirate ad ottenere più informazioni possibili, idonee sia per la comparazione tra più campioni sia per la determinazione di una probabile area di provenienza.

Come già trattato nei capitoli 3 e 4, i terreni che interessano le analisi forensi sono generalmente campioni rimaneggiati. Il rimaneggiamento va ad obliterare o ad alterare irreversibilmente le proprietà prettamente chimiche di un terreno, quali il pH, il potenziale di ossidoriduzione o la capacità di scambio cationico, e alcune proprietà fisiche, quali la temperatura o la porosità, che hanno valore caratterizzante se analizzate in situ o su campioni indisturbati.

Le analisi dei terreni sono per lo più dedicate alla caratterizzazione chimico-fisica delle varie tipologie di particelle che li compongono e allo studio dei caratteri fisici che non vengono alterati dal rimaneggiamento, come il colore. Lo studio dei terreni, quindi, deve essere svolto seguendo procedure analitiche *ad hoc* che abbiano una logica sequenzialità e che siano in grado di meglio caratterizzare i campioni sulla base dei loro elementi distintivi.

<sup>1</sup> Per gli approfondimenti sulle singole tecniche e sulle relative strumentazioni si rimanda la trattazione a testi specifici, alcuni dei quali inseriti in bibliografia.

## 5.2. La determinazione del colore

Il colore ha sempre rappresentato, fin dall'antichità, un criterio diagnostico molto importante per il riconoscimento e la valutazione dei suoli poiché fornisce un'indicazione sul loro ambiente di formazione, costituendone una delle caratteristiche più evidenti.

Il colore di un suolo è la risultante di un insieme di elementi; tra i più importanti vi sono la quantità e il tipo di sostanza organica, la natura dei minerali presenti e l'ossidazione e la riduzione del ferro<sup>2</sup>.

Inizialmente il colore dei suoli era attribuito in modo molto soggettivo usando termini qualitativi, senza che vi fosse alcuna convenzione sul loro uso. Dal 1954 tutti i colori del suolo sono determinati per confronto con il sistema Munsell, che prevede l'utilizzo di tavole colorimetriche create appositamente per lo studio dei colori dei suoli.

Nel campo della pedologia forense la determinazione del colore è un'analisi che si svolge, oltre che sui suoli, su tutte le tipologie di materiali sciolti a grana fine. Per codificare la colorazione dei terreni si utilizza generalmente il sistema Munsell, ma è possibile misurare i colori anche strumentalmente, tramite spettrofotometri di ultima generazione<sup>3</sup>. Il colore è dunque una caratteristica del terreno utile da interpretare che, insieme ad altre, consente il riconoscimento e la delimitazione delle unità di terreno rappresentative di una determinata area.

Tra i suoli possono essere distinti oltre 1100 colori differenti; tale ampia variabilità fa sì che l'analisi del colore sia un metodo potenzialmente utile per discriminare i campioni di suolo.

### 5.2.1. Il sistema Munsell

Il Munsell Soil Color Charts è un manuale che comprende una serie di tavole, ognuna contenente 25 tessere colorate, particolarmente rilevanti per la determinazione del colore dei suoli, tra le quali vi è un foro dove si posiziona il campione di terreno da codificare (figura 5.1).

Ogni colore viene descritto con un termine qualitativo standard, e codificato da una combinazione alfanumerica di tre parametri: *hue* (H), *value* (V) e *chroma* (C). La codifica del colore viene espressa con la forma H V/C. Lo hue indica la

<sup>2</sup> Per esempio, gli ossidi di ferro conferiscono al suolo una colorazione che va dal rossiccio al giallastro, mentre le materie organiche gli conferiscono una colorazione scura. Il colore castano è invece frequente nei suoli dove la sostanza organica è saturata da ioni calcio. Il colore bianco denota la presenza di forti quantità di carbonato di calcio, gesso o altri sali. Le rocce madri bianche, rosse, verdi o di colore scuro influiscono anch'esse sul colore del terreno, sebbene i minerali primari non abbiano nessuna influenza sulla colorazione dei suoli ricchi di argilla.

<sup>3</sup> Nella colorimetria scientifica vengono utilizzati spettrofotometri che operano nella regione del visibile, tra 400 e ca. 700 nanometri.

tonalità del colore ed è suddiviso in cinque tinte di base (rosso, giallo, verde, blu e porpora) e indica, fisicamente, la quantità relativa del colore presente in una tinta. Nel sistema Munsell il valore dello hue è individuato da ogni singola tavola contenente le 25 tesserine colorate. Il value rappresenta il livello di luminosità od oscurità di un colore, mentre il chroma, o purezza, ne definisce la saturazione. All'interno di ogni tavola il value e il chroma variano rispettivamente in senso verticale e orizzontale.

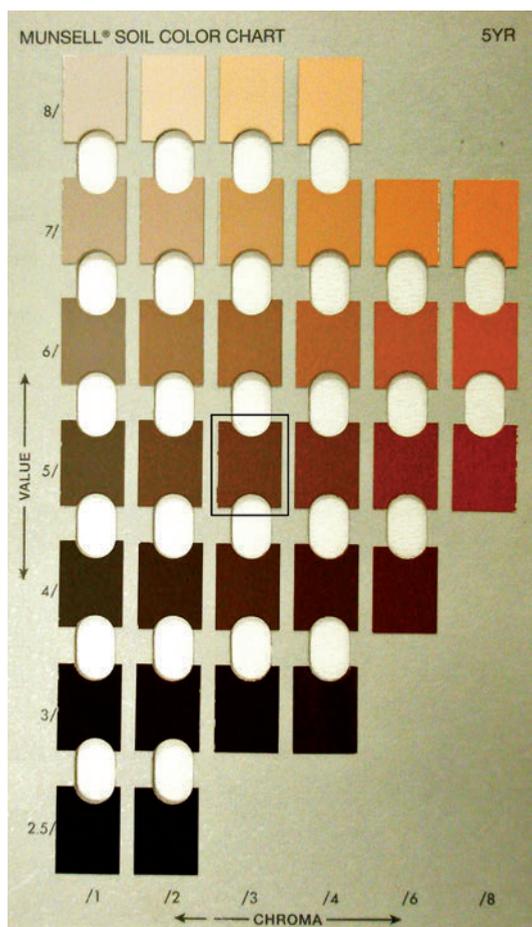


Figura 5.1. Munsell Color Chart. In figura è rappresentata la scheda di colori aventi lo hue pari a 5YR. Secondo il sistema Munsell, il colore indicato con il rettangolo è codificato con 5YR 5/3

Generalmente i pedologi forensi prediligono una classificazione dei colori in base alla sola frazione argillosa dei campioni di terreno, al fine di ridurre al minimo

le variazioni dovute alla loro eterogeneità. Effettivamente, è proprio l'argilla che avvolge le particelle minerali che dà il colore al terreno.

Per ottenere un campione d'argilla omogeneo a partire da un campione di terreno grezzo, si filtra una sospensione del campione per mezzo di un setaccio aventi maglie con dimensioni di 4 micrometri in modo da separare l'argilla. Successivamente, la frazione argillosa viene trattata in perossido di idrogeno, per decomporre le materie organiche in essa contenute, essiccata e omogeneizzata.

### 5.3. L'analisi granulometrica

Gli elementi minerali e i frammenti di roccia presenti nei terreni mostrano, in genere, dimensioni molto variabili. La granulometria, detta anche *tessitura*, è la misura delle dimensioni delle particelle di un sedimento. I processi erosivi, il trasporto e la sedimentazione influenzano molto le dimensioni dei granuli di un deposito clastico, come anche quelle di un suolo.

Seguendo la classificazione dimensionale dei clasti secondo Wentworth (tabella 5.1), le particelle vengono suddivise in base al loro diametro in classi dimensionali denominate *ghiaia* (con particelle aventi diametro maggiore di 2 mm), *sabbia* (con particelle aventi diametro compreso fra 0,0625 e 2 mm), *silt* (con particelle aventi diametro compreso fra 0,0039 e 0,0625 mm) e *argilla* (con particelle aventi diametro inferiore a 0,0039 mm).

La tessitura di un terreno è definita dalla percentuale in peso con la quale sono presenti la ghiaia, la sabbia, il silt e l'argilla. Poiché le frazioni granulometriche sono presenti in varia percentuale nei diversi terreni, questi ultimi avranno denominazioni tessiturali diverse, quali terreno argilloso o ghiaioso-sabbioso, sabbioso-siltoso, e così via.

In sedimentologia l'analisi granulometrica acquista significato solo se effettuata con criteri statistici; questo in pedologia forense non è sempre possibile perché molte volte i campioni di terreno prelevati da superfici di diversa natura possono essere limitati in peso o non rappresentare la tessitura originaria per fenomeni di dispersione o deposizione selettiva<sup>4</sup>. Tuttavia, quando la tipologia dei campioni lo permette, vengono effettuate rappresentazioni grafiche delle distribuzioni granulometriche; inoltre vengono determinati i parametri statistici per analizzare quantitativamente le curve di distribuzione granulometrica e utilizzarle come elemento di confronto tra campioni.

Quando il campione è limitato in quantità, la tessitura viene determinata solo in via qualitativa. Può capitare che i campioni di terreno siano talmente limitati in peso che la granulometria, anche se determinata in via qualitativa, non sarebbe comunque indicativa per caratterizzare un campione e per effettuare una comparazione con eventuali terreni di riferimento.

<sup>4</sup> Si vedano paragrafi 4.6.1. e 4.6.2.

**Tabella 5.1. Classificazione dimensionale dei clasti secondo Wentworth.**  
**In tabella sono state omesse le classi dimensionali superiori ai 2 millimetri**  
**perché raramente significative nelle applicazioni forensi**

Millimetri (mm)	Micrometri ( $\mu\text{m}$ )	Phi ( $\phi$ )	Classe granulometrica
2,00	2000	- 1,0	Ghiaia
1,00	1000	0,0	Sabbia molto grossolana
1/2 0,50	500	1,0	Sabbia grossolana
1/4 0,25	250	2,0	Sabbia media
1/8 0,125	125	3,0	Sabbia fine
1/16 0,0625	63	4,0	Sabbia molto fine
1/32 0,031	31	5,0	Silt grossolano
1/64 0,0156	15,6	6,0	Silt medio
1/124 0,0078	7,8	7,0	Silt fine
1/256 0,0039	3,9	8,0	Silt molto fine
0,00006	0,06	14,0	Argilla

### 5.3.1. La separazione granulometrica

Prima di effettuare la separazione granulometrica i campioni di terreno vengono immersi in acqua e trattati con ultrasuoni per eliminare lo stato di coesione apparente. Successivamente, le particelle sciolte vengono separate, a secco o in acqua, tramite una torre di setacci, aventi maglie con dimensioni note e standardizzate, decrescenti dall'alto verso il basso. I setacci si pongono su una macchina a vibrazione, il cui movimento permette alle particelle di suolo di scendere per gravità attraverso le maglie e di distribuirsi in funzione delle dimensioni.

Le percentuali in peso delle classi dimensionali dei granuli vengono determinate pesando di volta in volta le frazioni che passano attraverso il setaccio con maglie di dimensione prescelta. Il rapporto fra il peso di queste frazioni e il peso totale del campione moltiplicato per cento definisce la percentuale di particelle di diametro inferiore o uguale a quello delle maglie del setaccio. I dati percentuali vengono utilizzati per ottenere grafici di distribuzione granulometrica caratteristici del campione esaminato. Le rappresentazioni grafiche di distribuzione granulometrica possono essere di vario tipo, quali istogrammi, curve di frequenza semplici o cumulate o curve cumulative probabilistiche; queste ultime vengono utilizzate per la determinazione dei parametri statistici che indicano numericamente le caratteristiche salienti delle curve granulometriche.

Generalmente, il procedimento di separazione per setacciatura viene effettuato per granulometrie decrescenti fino alla sabbia o al silt. Tuttavia sono stati messi in commercio da diversi anni setacci con maglie aventi dimensioni di 4 micrometri, per mezzo dei quali è possibile separare in acqua la frazione argillosa di un terreno. Alternativamente, per la separazione della frazione argillosa possono essere utilizzati altri metodi; quello più noto è l'analisi granulometrica per sedimentazione, o aerometria, che, secondo la legge di Stokes, si basa sull'evidenza fisica che una particella solida immersa nell'acqua si muove verso il basso con una velocità che dipende dalla sua dimensione, dal suo peso specifico e dalla viscosità e dal peso specifico del liquido in cui si muove. Tale metodo consiste nel disperdere in acqua la parte fine di un terreno e nel quantificare il diametro dei granuli misurando le loro diverse velocità.

#### 5.4. Le determinazioni della densità

La densità (chiamata più correttamente *massa volumica* o *massa specifica*) di un corpo è definita come il rapporto tra la massa del corpo e il suo volume. Le particelle inorganiche di un terreno, quindi minerali e rocce, come anche tutti gli altri materiali geologici, hanno densità definite e dipendono dalla distribuzione dei loro atomi nello spazio.

I laboratori di analisi forensi utilizzano già da una cinquantina di anni la ripartizione delle particelle e degli aggregati in funzione della densità per comparare i campioni di terreno. Il procedimento consiste nel riempire un tubo di liquidi con densità diverse, dal più pesante, sul fondo, al più leggero, in alto. Tali liquidi di riferimento sono delle mescolanze di liquidi leggeri e di liquidi pesanti in diverse proporzioni: generalmente del bromoformio (2,89 g/ml) o del tetrabromoetano (2,96 g/ml) per i liquidi pesanti, e del bromobenzene (1,50 g/ml) o dell'etanolo (0,789 g/ml) per i liquidi leggeri. I campioni di terreno vengono essiccati e omogeneizzati e successivamente inseriti nel tubo, dove le particelle si separano tra i liquidi in funzione della loro densità.

Molti studiosi hanno condotto studi approfonditi sulla ripartizione delle particelle di terreno in funzione della densità e hanno dimostrato che la maggior parte dei campioni rispondeva a uno schema di ripartizione identico a quello di altri campioni prelevati in altri luoghi. Inoltre, i risultati delle comparazioni variavano sensibilmente a seconda dell'osservatore. In passato, gli esperti hanno avuto la tendenza a raccomandare l'osservazione della ripartizione delle particelle in funzione della densità allo scopo di comparare i campioni di terreno. Ad oggi, si è compreso che questo test fornisce risposte molto limitate e può rivelarsi utile solo in casi specifici e in associazione con altre caratterizzazioni.

La determinazione della densità dei materiali geologici coerenti, quali gemme e

pietre preziose, metalli e rocce, generalmente viene eseguita utilizzando il principio di Archimede, con il metodo della pesatura in immersione in acqua distillata, per mezzo di una bilancia idrostatica. Tale metodologia permette di determinare il peso e il volume del campione, valori necessari per il calcolo della densità. La procedura consiste nelle seguenti fasi: si pesa il campione in aria e si ripete l'operazione quando esso è immerso in acqua; la differenza tra i due pesi misurati corrisponde a quello del liquido che è stato spostato, cioè una quantità d'acqua il cui volume è uguale a quello del campione in esame. La densità corrisponderà quindi al rapporto tra il peso in aria dell'oggetto e la perdita di peso che si verifica quando esso viene immerso in acqua.

### 5.5. Le analisi al microscopio stereoscopico

Il microscopio stereoscopico, o stereomicroscopio, è uno strumento progettato per produrre una visione spaziale del campione in esame. A tale scopo, lo strumento è provvisto di due percorsi ottici separati e diversamente allineati per fornire immagini differentemente angolate per gli occhi destro e sinistro. L'illuminazione dell'oggetto avviene per luce riflessa, che consente lo studio di oggetti spessi od opachi; i moderni stereomicroscopi sono, tuttavia, forniti anche di luce trasmessa per l'osservazione di oggetti tridimensionali trasparenti.

Le determinazioni in microscopia stereoscopica consentono di eseguire accertamenti di natura ripetibile, di studiare le superfici di campioni solidi e di ispezionare particolari non visibili ad occhio nudo o a basso ingrandimento<sup>5</sup>.

In pedologia forense l'osservazione stereoscopica permette lo studio dei caratteri morfologici delle particelle di terreno, determinandone il grado di angolosità o sfericità, la lucentezza, la forma e qualsiasi altra caratteristica evidente (figura 5.2); inoltre, consente di osservare, separare, descrivere e caratterizzare gli eventuali componenti organici e antropogenici, ritenuti utili ai fini forensi. Generalmente, l'osservazione al microscopio stereoscopico viene eseguita più volte durante il susseguirsi delle fasi analitiche. I campioni vengono, infatti, controllati dapprima tal quali, senza operare nessun trattamento preliminare, per osservarne i caratteri principali; successivamente, vengono esaminati dopo il lavaggio in bagno di ultrasuoni e la setacciatura. In questa fase l'osservazione di ogni singola frazione granulometrica è finalizzata a studiare i caratteri di dettaglio delle singole particelle e a separare peculiari elementi su cui svolgere analisi mirate.

<sup>5</sup> Lo stereomicroscopio permette di utilizzare diversi ingrandimenti, fino anche a 250 volte, tuttavia, si deve sempre tener presente che gli ingrandimenti molto alti non consentono di avere una ampia profondità di campo.

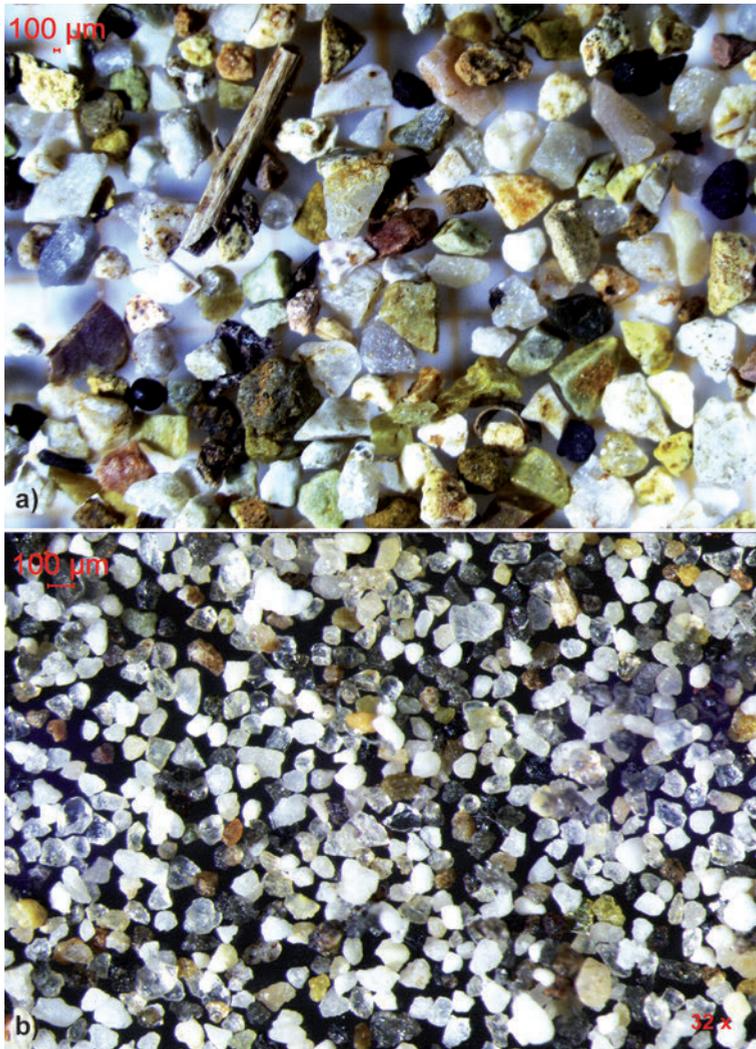


Figura 5.2. Terreni forensi osservati al microscopio stereoscopico: a) terreno agricolo caratterizzato da clasti sub-angolosi; b) terreno proveniente da una zona vulcanica con clasti a morfologia sub-arrotondata

In geologia forense, l'osservazione al microscopio stereoscopico viene svolta su tutti quei materiali geologici per i quali è utile studiarne i caratteri morfologici, geometrici e microscopici.

Per esempio, nello studio delle gemme la stereoscopia in campo scuro permette una accurata osservazione dei tagli, delle geometrie delle facce, della finitura e soprattutto delle entità delle inclusioni e delle distorsioni strutturali che ne determinano il grado di purezza.

### 5.5.1. *La morfoscopia e la morfometria*

In sedimentologia la morfoscopia è lo studio dell'aspetto delle superfici delle particelle di un sedimento, mentre la morfometria è lo studio della loro forma.

In pedologia forense, la morfoscopia e la morfometria vengono applicate per lo studio delle particelle inorganiche che costituiscono i campioni di terreno. La forma e la superficie delle particelle dei terreni sono condizionate principalmente dalle loro caratteristiche mineralogiche e tessiturali e dalle dimensioni e la forma dei frammenti iniziali; a parità di condizioni intervengono la durata e la modalità di erosione e trasporto, le modalità di sedimentazione e le alterazione chimico-fisiche subite dopo la deposizione. La forma e l'aspetto della superficie delle particelle sono, quindi, proprietà che possono dare indicazioni importanti sul loro ambiente di trasporto e di deposizione<sup>6</sup> e possono essere utilizzate come termine di confronto tra campioni di terreno. Infatti, a parità di componenti mineralogico-petrografiche e a parità di dimensioni, i granuli di campioni di terreno possono presentare forme e aspetto della superficie dissimili nel caso in cui hanno avuto evoluzioni differenti.

La descrizione della superficie dei granuli contempla l'osservazione visiva e l'utilizzo di uno o più termini qualitativi; la superficie potrà, quindi, essere scabrosa, lucida, opaca, fratturata. La descrizione della forma prevede misure angolari e lineari rispettivamente degli spigoli e degli assi dei granuli. I dati quantitativi vengono espressi in termini qualitativi che descrivono il grado di arrotondamento, la spigolosità e l'allungamento delle particelle.

L'osservazione della superficie e della forma dei granuli può essere condotta con diversi mezzi di indagine a seconda delle dimensioni delle particelle esaminate. Le particelle più grandi sono osservate con il microscopio stereoscopico interfacciato a un software che permetta misure lineari ed angolari; per le particelle più piccole è necessario l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione<sup>7</sup>.

## 5.6. **Le analisi al microscopio polarizzatore**

Il microscopio petrografico a luce polarizzata consente lo studio e il riconoscimento dei minerali e delle rocce in sezione sottile. In geologia forense l'analisi al microscopio petrografico è utile per svolgere una accurata identificazione dei minerali e dei frammenti di roccia costituenti le particelle dei terreni, nonché lo studio di singoli materiali geologici quali minerali, rocce, microfossili e materiali antropogenici quali cementi o laterizi (figura 5.3).

<sup>6</sup> Si veda anche paragrafi 3.4.1. e 3.4.2.

<sup>7</sup> Si veda paragrafo 5.8.