

M2C4 I. 1.1: Realizzazione di un Sistema avanzato ed
Integrato di Monitoraggio e previsione

Documentazione Tecnica

—

Protocollo attività di campo rilievo pedologico

CU. O4: Caratterizzazione dello Stato dei Suoli a supporto
delle attività di Monitoraggio ambientale del SIM

Versione 1.0

Storia del documento

Versione	Data	Autore	Autorizzato da	Descrizione delle modifiche
1.0	15/01/2025			
1.1	05/03/2025	DXC		Integrazione contenuti
1.2	07/03/2025	Crea		Aggiornamenti

Sommario

1	Introduzione.....	5
1.1	Finalità del documento	5
1.2	Documentazione di riferimento.....	6
1.3	Glossario specifico del documento.....	6
1.4	Acronimi specifici del documento.....	10
2	Metodologia del rilievo pedologico	11
2.1	Approccio metodologico	11
2.2	Strumenti e materiali	11
2.3	Scelta del punto di rilievo.....	13
2.4	Esplorazione preliminare del sito.....	13
2.5	Descrizione pedologica e documentazione del rilievo	15
3	Rilievo in campo: parametri superficiali	19
3.1	Dati generali.....	19
3.2	Morfologia del paesaggio, topografia e condizioni meteorologiche	19
3.3	Vegetazione e uso del suolo.....	20
3.4	Superficie del suolo	22
3.5	Presenza d'acqua e idrorepellenza	25
3.6	Irregolarità superficiali.....	26
4	Rilievo in campo: parametri stratigrafici.....	30
4.1	Identificazione degli strati e dei loro spessori	30
4.2	Saturazione e idrologia.....	30
4.3	Composizione dei suoli.....	31
4.4	Frammenti, Cementati e Artefatti.....	33
4.5	Tessitura e struttura.....	37
4.6	Porosità e permeabilità	41
4.7	Colore e forme redoximorfiche.....	44
4.8	Pellicole e aggregati.....	47

4.9	Contenuti in carbonati e gesso	47
4.10	Parametri chimici	49
4.11	Consistenza	50
4.12	Croste e fenomeni di sigillatura	52
4.13	Vetri vulcanici e caratteristiche andic	53
4.14	Forme di permafrost.....	54
4.15	Densità e compattazione.....	55
4.16	Contenuto di carbonio.....	56
4.17	Presenza e distribuzione delle radici.....	57
4.18	Bioturbazione e attività biologiche	57
4.19	Impatti antropici.....	58
4.20	Natura del substrato	60

1 Introduzione

1.1 Finalità del documento

Il presente documento definisce il protocollo operativo per il rilievo pedologico di campo, attività propedeutica e fondamentale per la caratterizzazione dei suoli nell'ambito del progetto M2C4 I.1.1 – Sistema Avanzato ed Integrato di Monitoraggio e Previsione (SIM). Tale attività è focalizzata sulla raccolta sistematica e georeferenziata di dati pedologici mediante l'analisi di un set di 1.500 profili di suolo, distribuiti strategicamente su aree selezionate in base a criteri geomorfologici, climatici e di uso del suolo.

L'obiettivo primario del rilievo è la realizzazione di una carta dei pedopaesaggi in scala 1:100.000, strumento imprescindibile per supportare il monitoraggio ambientale attraverso l'identificazione e la classificazione delle principali unità pedologiche. La carta fornirà, inoltre, dati essenziali per la modellizzazione predittiva dei processi pedogenetici e delle dinamiche del suolo in risposta ai cambiamenti ambientali. Ulteriore obiettivo è la creazione di un dataset strutturato, interoperabile e conforme agli standard di settore, che possa essere integrato con sistemi informativi geografici (GIS) e piattaforme di gestione territoriale.

Il documento specifica in dettaglio le metodologie adottate per il rilievo, assicurando che tutte le fasi operative siano condotte in conformità alle linee guida internazionali, con particolare riferimento ai criteri stabiliti dalla World Reference Base for Soil Resources (WRB, IUSS 2022) e alle Linee guida per il rilevamento pedologico e l'informatizzazione dei dati (Costantini, 2007). L'applicazione di tali standard mira a garantire la qualità, l'accuratezza e la comparabilità dei dati raccolti, in linea con le migliori pratiche scientifiche nel campo della pedologia.

Obiettivi specifici del rilievo pedologico

L'indagine sul campo, come descritto nelle linee guida, si concentra su diversi aspetti chiave del suolo e del suo ambiente, con l'obiettivo di:

- Descrivere la morfologia e le proprietà fisico-chimiche del suolo, includendo stratificazione, tessitura, struttura, colore, figure pedogenetiche, caratteristiche redoximorfiche, permeabilità, capacità di ritenzione idrica e drenaggio. La descrizione del suolo si basa su guide di campagna che fanno riferimento alla manualistica internazionale, integrata con le esperienze accumulate nel corso degli anni in Italia.
- Analizzare i fattori di formazione del suolo che Jenny, nel 1941, identificò come: il clima, gli organismi, la morfologia e il rilievo, il materiale genitore e il tempo.
- Definire classi di suolo coerenti con i sistemi di classificazione pedologica internazionali, come WRB e USDA Soil Taxonomy, per garantire la compatibilità con banche dati nazionali e internazionali.
- Generare un archivio digitale delle osservazioni, standardizzato e conforme alle specifiche INSPIRE, per consentire l'integrazione con altre banche dati.

Le linee guida forniscono un riferimento per coloro che si occupano di cartografia pedologica, recependo le indicazioni della manualistica internazionale e le esperienze dei centri di ricerca italiani.

Integrazione con il SIM

Il dataset generato attraverso il rilievo pedologico rappresenta un elemento chiave del Sistema Informativo di Monitoraggio (SIM) e mira ad aumentare la densità di osservazioni pedologiche nelle aree agricole e forestali del Paese. Questo set di dati, ottenuto tramite un piano di monitoraggio e l'aggiornamento dei parametri pedologici dei suoli, è destinato a migliorare la comprensione dei processi di degrado del suolo, con particolare attenzione all'erosione, alla compattazione e alle variazioni di fertilità.

Parallelamente, il dataset consentirà di potenziare le capacità di monitoraggio e previsione, permettendo l'integrazione dei dati pedologici con informazioni satellitari, meteorologiche e geospaziali. Durante la fase di monitoraggio, sarà inoltre possibile ottenere automaticamente le informazioni delle unità tipologiche del suolo (STUs) presenti.

Infine, il dataset fornirà strumenti di supporto decisionale per una gestione sostenibile del territorio e per l'adattamento ai cambiamenti climatici. In questo contesto, l'applicativo del SIM, insieme alla restituzione cartografica in ambiente GIS, creerà una nuova mappa pedologica nazionale basata sui dati acquisiti.

1.2 Documentazione di riferimento

Nella seguente tabella sono elencati i riferimenti da considerare nel presente documento.

RIFERIMENTI	DESCRIZIONE
IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.	Sistema Internazionale di classificazione dei suoli per la denominazione dei suoli e la creazione di legende per le carte dei suoli, 4 ^a edizione
Costantini E. A. C. (Ed.) 2007. Linee guida dei metodi di rilevamento e informatizzazione dei dati pedologici, CRA-ABP, Firenze, Italia, pp. XV, 280	Metodologie di rilevamento, cartografia ed informatizzazione dei suoli

1.3 Glossario specifico del documento

TERMINE	DESCRIZIONE
Argic horizon	Orizzonte illuviale ricco in argilla accumulata per traslocazione.
Biopori	Cavità biologiche nel suolo create da radici e organismi del sottosuolo.
Capacità di scambio cationico (CSC)	Capacità del suolo di trattenerne e scambiare cationi essenziali per la crescita delle piante.
Carbonio organico del suolo (Corg)	Contenuto di carbonio derivato dalla decomposizione della materia organica nel suolo.
Classificazione FAO	Sistema di classificazione pedologica sviluppato dalla FAO per uso internazionale.
Classificazione USDA Soil Taxonomy	Sistema di classificazione dei suoli sviluppato dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti.
Classificazione WRB	Sistema internazionale per la classificazione dei suoli basato su proprietà diagnostiche.
Conducibilità idraulica	Velocità con cui l'acqua si infiltra e attraversa il suolo.
Copertura vegetale	Tipo di vegetazione presente su un'area e suo impatto sulle proprietà del suolo.
Croste superficiali	Strati consolidati sulla superficie del suolo dovuti a processi chimici o fisici.
Densità apparente	Massa di un volume unitario di suolo essiccato, indicativa della compattazione del terreno.
Deposizione eolica	Accumulo di particelle fini trasportate dal vento e depositate sul suolo.
Erosione incanalata	Erosione che si verifica quando l'acqua scorre in piccoli canali o fossi.
Erosione laminare	Erosione superficiale del suolo in cui lo strato superiore viene asportato uniformemente dall'azione dell'acqua.
Evidenza redoximorfica	Evidenza visibile di processi redoximorfici attraverso variazioni cromatiche nel suolo.
Formazione del suolo	Processo di alterazione e sviluppo del suolo da materiale parentale.
Fragipan	Orizzonte compatto e poco permeabile, caratterizzato da elevata densità e resistenza alla penetrazione delle radici.
Gesso nel suolo	Accumuli di solfato di calcio nel profilo pedologico, spesso associati a climi aridi.

TERMINE	DESCRIZIONE
Indice di compattazione	Indice che valuta la resistenza meccanica del suolo alla penetrazione e compattazione.
Indice di drenaggio del suolo	Classificazione della capacità di drenaggio del suolo in base alle proprietà idriche degli orizzonti.
Indice di idrorepellenza	Misura della capacità della superficie del suolo di respingere l'acqua, influenzando l'infiltrazione.
Indice di plasticità	Misura della plasticità del suolo e della sua capacità di deformarsi senza rompersi.
Materiale parentale	Materiale di origine del suolo, derivato da rocce o sedimenti non consolidati.
Orizzonte diagnostico	Orizzonte del suolo con proprietà diagnostiche distintive utilizzato nella classificazione pedologica.
Orizzonte eluviale	Orizzonte di perdita di materiali (lisciviazione) ricco di silice e povero di argilla.
Orizzonte illuviale	Orizzonte in cui avviene l'accumulo di argilla e composti derivati da orizzonti superiori.
Orizzonte minerale	Orizzonte composto prevalentemente da minerali derivati dal materiale parentale.
Orizzonte organico	Orizzonte dominato da materia organica in decomposizione, comune in ambienti umidi.
Orizzonte pedogenetico	Strato del suolo con caratteristiche distintive risultanti da processi pedogenetici.
Pedo-paesaggio	Unità territoriale caratterizzata da un insieme di suoli con proprietà omogenee.
Pedogenesi	Processi fisico-chimici e biologici che portano alla formazione e evoluzione del suolo.
Pellicole di argilla	Film sottili di argilla che rivestono aggregati del suolo o biopori, indicatori di illuviazione.
Permafrost	Strati di terreno permanentemente congelati che influenzano la pedogenesi e la stabilità del suolo.
Permeabilità	Capacità del suolo di lasciar passare l'acqua attraverso i suoi pori.
Pori non matriciali	Pori di grandi dimensioni non strutturali che influenzano l'aerazione e il drenaggio.
Processi di degradazione del suolo	Fenomeni che portano alla perdita di fertilità e alla degradazione fisica e chimica del suolo.

TERMINE	DESCRIZIONE
Processi pedogenetici	Processi di trasformazione, traslocazione, addizione e perdita che modellano il profilo pedologico.
Profilo pedologico	Sezione verticale del suolo che mostra la sequenza degli orizzonti pedogenetici.
Redoximorfismo	Alterazioni cromatiche nel suolo dovute alla redistribuzione di ferro e manganese sotto condizioni di saturazione idrica variabile.
SIM (Sistema Integrato di Monitoraggio)	Sistema di monitoraggio avanzato per l'analisi ambientale e pedologica.
Scheletro del suolo	Frazione del suolo costituita da frammenti di rocce con diametro superiore a 2 mm.
Sostanza organica del suolo	Componente organica del suolo derivante da processi di decomposizione e umificazione.
Struttura del suolo	Organizzazione spaziale degli aggregati di suolo che influisce sulla porosità e permeabilità.
Suolo idromorfo	Suolo che presenta segni di saturazione idrica permanente o temporanea.
Suolo vertico	Suolo caratterizzato dalla presenza di argille espansive con fessurazioni marcate.
Tessitura del suolo	Proporzione relativa delle particelle di sabbia, limo e argilla presenti nel suolo.

1.4 Acronimi specifici del documento

TERMINE	DESCRIZIONE
CEC	Capacità di Scambio Cationico
CSC	Capacità di Scambio Cationico
CaCl ₂	Cloruro di Calcio, usato per misurazioni di pH
Corg	Carbonio Organico del Suolo
EC	Conducibilità Elettrica
FAO	Food and Agriculture Organization
GIS	Geographic Information System
HCl	Acido Cloridrico, utilizzato per test di effervescenza carbonatica
KCl	Cloruro di Potassio, usato per misurazioni di pH
NaF	Fluoruro di Sodio, utilizzato per test di andicità del suolo
OM	Sostanza Organica del Suolo
SIM	Sistema Integrato di Monitoraggio
USDA	United States Department of Agriculture
WRB	World Reference Base for Soil Resources
pH	Potenziale Idrogeno, misura dell'acidità o alcalinità del suolo

2 Metodologia del rilievo pedologico

2.1 Approccio metodologico

Il rilievo pedologico rappresenta un'attività di fondamentale importanza per la caratterizzazione e la comprensione dei suoli in relazione ai processi pedogenetici, alle condizioni ambientali e alle pressioni antropiche. La metodologia adottata nel presente protocollo si basa su procedure rigorose e standardizzate, finalizzate a garantire l'accuratezza, la riproducibilità e la comparabilità dei dati raccolti.

L'analisi del suolo si basa su un approccio integrato, che combina indagini dirette in campo – condotte con strumenti e tecniche, sia consolidate che innovative – con osservazioni qualitative e semi-quantitative delle proprietà del suolo visibili a occhio nudo, seguite da analisi di laboratorio. La scelta dei punti di rilievo, le modalità di campionamento e la descrizione dei profili pedologici rappresentano elementi chiave per descrivere in modo efficace la variabilità del suolo su scala territoriale.

L'osservazione dei suoli si articola in fasi distinte ma interdipendenti. In primo luogo, si effettua un'esplorazione preliminare del sito, anche da remoto tramite strumenti GIS, per individuare le aree rappresentative, definire le condizioni ambientali generali ed eventuali criticità logistiche. Successivamente, si passa al rilevamento, alla descrizione e all'osservazione pedologica vera e propria, per la quale questo manuale fornisce le linee guida.

L'applicazione di protocolli standardizzati per la classificazione dei suoli permette di collocare ciascun profilo all'interno di un sistema gerarchico di unità e sottounità pedologiche. Queste rappresentano i tasselli delle unità cartografiche, contribuendo alla costruzione di modelli previsionali e alla produzione di cartografia derivata. L'obiettivo quindi è fornire dati strutturati e affidabili, utili a supportare attività di monitoraggio, gestione delle risorse naturali e pianificazione territoriale.

I paragrafi successivi approfondiscono in dettaglio ciascuna fase della metodologia di rilievo, illustrando strumenti, procedure e criteri di valutazione impiegati per l'analisi del suolo.

2.2 Strumenti e materiali

L'esecuzione di un rilievo pedologico accurato richiede l'impiego di strumenti specifici, selezionati in funzione delle caratteristiche del suolo, della profondità di indagine e degli obiettivi dell'analisi. Gli strumenti devono garantire la raccolta di dati affidabili, minimizzando il disturbo del profilo e assicurando la rappresentatività del campione.

Di seguito sono elencate le principali attrezzature necessarie per le attività di campo:

Strumenti per il prelievo di campioni di suolo

- Sonda Pürckhauer e trivella Edelman, idonee per la raccolta di campioni non disturbati e per l'esplorazione preliminare del sito.
- Trivella manuale olandese, utilizzata per campionamenti più profondi in suoli compatti o inaccessibili con altri metodi.
- Vanga, necessaria per lo scavo del profilo pedologico e la preparazione delle pareti di osservazione.
- Martello tipo geologo-sedimentologo a punta piatta per la pulizia della parete del profilo dopo l'escavazione e per prelevare campioni di suolo sufficientemente abbondanti per eseguirvi le analisi di laboratorio. In alternativa si può utilizzare un trapiantatore o paletta da giardinaggio

Strumenti di misura e analisi morfologica

- Metro a nastro o snodato (≥ 2 m), per la misurazione della profondità del profilo e degli spessori degli orizzonti pedogenetici.
- Clinometro e bussola, per la determinazione dell'inclinazione del terreno e dell'orientamento del profilo.
- Tavole Munsell, per la determinazione del colore del suolo in condizioni asciutte e umide.
- Lente di ingrandimento, utile per l'osservazione delle caratteristiche strutturali e dei componenti organici e minerali.
- Macchina fotografica, per la documentazione del profilo e del contesto ambientale.

Materiali per il trattamento e la conservazione dei campioni

- Coltello a lama lunga (circa 10 cm), utilizzato per la pulizia e la preparazione dei campioni e per la delimitazione degli orizzonti.
- Cesoie da giardinaggio per tagliare le radici sporgenti del profilo e/o seghetto per tagliare quelle arboree più grossolane.
- Martello di plastica, utilizzato per facilitare l'inserimento della sonda (es. cilindretti per la densità apparente) nel suolo senza alterarne la struttura.
- Barra di torsione e/o martello tipo geologo-sedimentologo a punta piatta, strumenti necessari per l'estrazione della sonda, soprattutto nei suoli compatti o argillosi.
- Sacchetti di plastica (30 × 40 cm) e pennarello indelebile, per la conservazione e l'etichettatura dei campioni prelevati.

Reagenti per analisi preliminari in campo

- Spruzzetta con acqua distillata, utilizzata per umidificare la parete del profilo, impregnare il campione nella stima della tessitura, eseguire il test di idrorepellenza e determinare altre caratteristiche come la consistenza, l'adesività e la plasticità.

- Soluzione di acido cloridrico al 8,8% (1M HCl), per la rilevazione della presenza di carbonati tramite reazione effervescente.
- Soluzione di acqua ossigenata al 10% per distinguere eventuali noduli di manganese dal carbone
- Cartine indicatrici di pH, per la valutazione colorimetrica dell'acidità del suolo.
- Soluzione di fluoruro di sodio (NaF 1M, pH 7.5), per l'individuazione di proprietà anidiche tramite reazione colorimetrica.
- 2,2'-Dipiridile, reagente per la rilevazione di ferro solubile in campo tramite reazione colorimetrica.

2.3 Scelta del punto di rilievo

La scelta del punto di rilievo influisce sulla validità dei dati raccolti. La selezione del sito avviene secondo criteri rigorosi, basati su:

- Rappresentatività del suolo - Il punto di scavo deve essere scelto in modo da caratterizzare il suolo modale dell'unità territoriale in esame, evitando aree con anomalie locali non rappresentative della variabilità pedologica generale.
- Evitare aree disturbate - Devono essere escluse zone soggette a modificazioni antropiche recenti (es. aree di riporto, discariche, superfici artificiali, fossati), salvo che l'obiettivo dell'indagine preveda espressamente l'analisi di tali contesti.
- Condizioni topografiche - Il rilievo deve essere condotto preferibilmente su superfici stabili, lontano da zone di accumulo di materiali alluvionali, colluviali o da pendii soggetti a erosione attiva, per garantire una stratificazione del suolo intatta e interpretabile; salvo che l'obiettivo dell'indagine preveda espressamente l'analisi di tali contesti.
- Valutazione del contesto geomorfologico - La posizione del profilo deve considerare i fattori morfologici e la loro influenza sui processi pedogenetici, selezionando aree che rappresentino condizioni pedologiche coerenti con la classificazione del paesaggio. Questi elementi identificati come pedopaesaggi sono costituiti da unità territoriali, definite come insiemi di terre con caratteristiche simili in termini di morfologia, litologia e uso del suolo.
- Condizioni di accessibilità - Il sito deve essere accessibile per le operazioni di scavo e descrizione, assicurando la possibilità di prelevare campioni e registrare dati senza limitazioni logistiche.

In presenza di sezioni artificialmente aperte di recente (es. scavi stradali, fossati), queste possono essere utilizzate per l'osservazione del profilo solo previa pulizia della parete e approfondimento del fronte per almeno 20-30 cm, al fine di rimuovere eventuali alterazioni superficiali dovute all'esposizione.

2.4 Esplorazione preliminare del sito

L'esplorazione preliminare di campo è necessaria per annotare informazioni iniziali del sito, verificare la rappresentatività del punto di indagine e individuare eventuali eterogeneità che potrebbero influenzare la variabilità del suolo e la descrizione del profilo. Questa fase, realizzata anche tramite

interviste ai locali, permette di ottimizzare la posizione del campionamento e di interpretare meglio i dati raccolti.

L'analisi preliminare si avvale di strumenti e tecniche che consentono di effettuare indagini dirette e non invasive.

Metodologie di esplorazione preliminare o di controllo

L'indagine viene condotta attraverso una combinazione di metodi diretti, volti a individuare la sequenza stratigrafica e a delineare i principali caratteri pedogenetici:

L'indagine viene condotta attraverso una combinazione di metodi diretti, volti a individuare la sequenza degli orizzonti di suolo ed identificare le caratteristiche pedologiche principali:

- Indagine con sonda Pürckhauer o trivella Edelman
 - Penetrazione verticale nel suolo per osservare la stratificazione e ottenere campioni preliminari.
 - Permette una prima valutazione della morfologia del profilo e delle caratteristiche tessiturali dei suoli superficiali e profondi.
 - Ideale per individuare variazioni repentine nella sequenza degli orizzonti pedologici.
- Esame visivo della superficie del suolo
 - Osservazione di indicatori morfologici quali croste superficiali, crepacciature, presenza di frammenti litici e accumuli organici, utili per inferire la stabilità strutturale e le condizioni di umidità.
 - Analisi della copertura vegetale e delle condizioni di uso e gestione del suolo per individuare eventuali fattori di disturbo, degrado o forte influenza sui processi pedogenetico.
- Individuazione delle proprietà fisiche e chimiche
 - Determinazione del colore del suolo tramite tavole Munsell per identificare variazioni pedogenetiche e condizioni di idromorfia.
 - Analisi tattile della tessitura per stimare il contenuto relativo di sabbia, limo e argilla.
 - Valutazione della presenza di acqua nel suolo, mediante osservazione visiva di segni di saturazione, formazione di patine ferromanganesifere o altre evidenze di condizioni riduttive.
- Campionamento con trivella manuale olandese
- Utilizzata per estrarre campioni di suolo sotto forma di carote, che, essendo disturbate, permettono di osservare con precisione solo un numero limitato di caratteristiche. Questo metodo di osservazione, rapido ed economico, consente di verificare la disposizione verticale degli orizzonti e di individuare limiti netti o gradualmente tra strati con forti cambi di tessitura o tra suolo e substrato. Può risultare utile anche per validare l'accuratezza delle carte pedologiche, verificando la corretta definizione dei limiti e l'attribuzione delle tipologie di suolo.

Procedure operative e precauzioni

L'utilizzo della trivella richiede il rispetto di alcune precauzioni per evitare errori nell'interpretazione dei dati:

- La penetrazione deve avvenire verticalmente, evitando aree con tane di animali, fessure o cavità che potrebbero alterare la stratigrafia del profilo.
- Il primo campione deve includere lo strato superficiale (topsoil), mentre nei campioni successivi è necessario scartare i primi 5 cm per evitare contaminazioni tra orizzonti differenti.
- L'analisi delle carote deve includere la registrazione di parametri chiave, quali:
 - Spessore degli orizzonti
 - Colore della massa
 - Concentrazioni
 - Umidità e presenza di eventuali segnali di idromorfia
 - consistenza
 - Reattività chimica (pH, effervescenza all'HCl)
 - Tessitura e contenuto di scheletro.

Quando il suolo risulta particolarmente compatto, la sonda Pürckhauer offre una soluzione efficace per ottenere campioni più definiti, limitando il disturbo della stratigrafia. Questo strumento è particolarmente utile per l'osservazione di:

- Profondità effettiva dei limiti stratigrafici.
- Presenza di strati cementati o duripani.
- Distribuzione delle caratteristiche redoximorfiche e delle zone di accumulo di sostanze minerali o organiche.

Importanza dell'esplorazione preliminare

L'acquisizione di dati preliminari garantisce che la descrizione del profilo pedologico avvenga in condizioni precise e rappresentative. Già in questa fase, è possibile confrontare i dati raccolti con le tipologie di suolo precedentemente individuate (ad esempio, cataloghi regionali e/o servizi sul suolo), identificando il modello di distribuzione dei suoli e i pattern, distinguendo tra unità di paesaggio omogenee, transizioni graduali o eterogenee. Si supportano inoltre valutazioni sulla dinamica del suolo attraverso l'integrazione di informazioni sullo stato attuale della pedogenesi e sulle variazioni indotte da fattori ambientali e antropici.

2.5 Descrizione pedologica e documentazione del rilievo

Il rilievo pedologico è il passaggio essenziale per comprendere le proprietà fisiche, chimiche e morfologiche dei suoli. Fondamentale per applicazioni agronomiche, ambientali e geologiche, questo processo si basa su un approccio metodologico rigoroso e sull'impiego di strumenti analitici avanzati. Cuore del processo di raccolta dati, la scheda di campo consente di strutturare in modo coerente le informazioni pedologiche, garantendo un'acquisizione precisa e sistematica delle variabili osservate. L'integrazione con strumenti digitali, in particolare una "App di campo", offre un significativo salto di qualità: maggiore accuratezza, ottimizzazione del lavoro sul terreno e riduzione

degli errori, con il vantaggio di un'immediata connessione a database pedologici e sistemi di modellizzazione ambientale.

Descrizione del suolo mediante profilo

Il rilievo pedologico prevede la realizzazione e l'analisi di profili di suolo adeguatamente preparati, che costituiscono la base per descrivere la morfologia risultante dai processi pedogenetici e per raccogliere campioni destinati alle analisi di laboratorio.

Un profilo di suolo è una sezione verticale che mostra la sequenza degli orizzonti pedogenetici. In caso di pendio, tale sezione deve essere orientata parallelamente alle linee di livello; in alternativa, può essere rappresentata dalla faccia verticale di un parallelepipedo ideale (pedon), che costituisce l'unità minima di campionamento pedologico (Soil Survey Staff, 1993).

La trincea deve essere sufficientemente ampia da cogliere la variabilità laterale del suolo, con una larghezza adeguata a garantire il rilevamento in condizioni di comodità e sicurezza. La profondità, ove possibile, non dovrebbe superare i 2 metri o il limite del materiale parentale. In

presenza di pendii, la profondità del profilo deve essere calcolata applicando la correzione relativa all'inclinazione del terreno, secondo la formula proposta da Prietzel & Wiesmeier (2019):

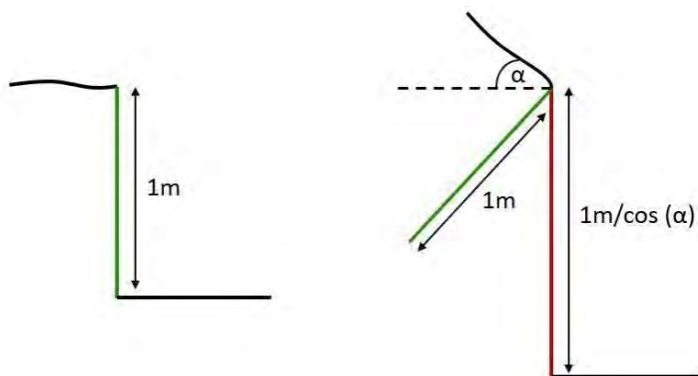


Figura 1 - Profondità corretta del profilo su terreno inclinato.
Modificato da WRB 2022

$$1.5 \frac{m}{\cos(\alpha)}$$

La preparazione della parete del profilo di suolo richiede particolare attenzione. La superficie deve essere accuratamente lisciata per garantire uniformità e resa perfettamente verticale, facilitando così l'osservazione degli orizzonti pedogenetici e una descrizione accurata. Eventuali radici presenti vanno tagliate o rimosse con precisione e delicatezza, in modo da non alterare le caratteristiche del suolo.

È fondamentale che il materiale rimosso durante lo scavo non venga depositato sopra o nelle immediate vicinanze del profilo, per evitare contaminazioni e preservare le condizioni naturali del suolo, garantendo così un'osservazione più rappresentativa. Si raccomanda di raccogliere il materiale su due teli distinti, separando il topsoil dal subsoil. Durante il successivo riempimento del profilo, il subsoil dovrà essere sistemato per primo, seguito dal topsoil. Questa procedura, oltre a garantire il corretto riassetto dello scavo, può facilitare la descrizione in campo e la raccolta dei campioni.

Descrizione del suolo mediante pozzetto

In molte situazioni, il topsoil può risultare parzialmente escluso dal campione prelevato con sonda o trivella. Per garantire una descrizione più dettagliata e accurata di questo strato superficiale, è consigliabile realizzare un mini-profilo accanto al punto di campionamento. Tale mini-profilo dovrebbe avere dimensioni minime di 25 cm sia in larghezza sia in profondità, con pareti rigorosamente verticali e ben levigate.

Per effettuare misurazioni precise, si raccomanda di posizionare un metro snodato in modo perpendicolare alla superficie del terreno, con il punto zero allineato al livello del suolo. In alternativa al mini-profilo, è possibile realizzare un pozzetto (minipit), uno scavo di dimensioni maggiori, generalmente profondo tra 50 e 70 cm e largo circa 100 cm. Questa metodologia è particolarmente utile in contesti dove l'uso di mezzi meccanici è limitato, come in aree protette o di difficile accesso. Il minipit è inoltre da ritenersi la forma di scavo più adatta per descrivere le forme di humus in ambienti naturali.

Dal fondo del pozzetto è possibile acquisire ulteriori informazioni sul suolo utilizzando una trivella manuale, estendendo così l'indagine alle sezioni più profonde. La scelta del sito per il pozzetto deve seguire gli stessi criteri adottati per il posizionamento di un profilo completo, al fine di garantire la rappresentatività del campione rispetto all'ambiente indagato.

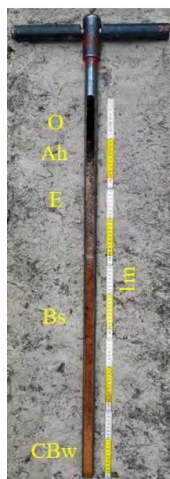


Figura 2 - Profilo con sonda Pürckhauer (da WRB 2022)



Figura 3 - Profilo del suolo (da WRB 2022)

La scheda di campo e gli strumenti informatici per il rilievo pedologico

L'adozione di strumenti digitali migliora significativamente la gestione e l'analisi dei dati, offrendo vantaggi quali:

- Digitalizzazione avanzata delle schede di campo, per una documentazione accurata, strutturata e standardizzata, con riduzione degli errori.
- Applicazioni mobili dedicate, che consentono la registrazione diretta delle informazioni, la georeferenziazione automatica e l'acquisizione di immagini digitali.

- Piattaforme GIS e sistemi di gestione delle informazioni geospaziali, per un'analisi spaziale avanzata, migliorando l'individuazione di pattern pedologici e la correlazione con variabili ambientali.
- Software di modellazione tridimensionale, che consente la rappresentazione visiva della stratificazione del suolo, facilitando lo studio della distribuzione degli orizzonti pedogenetici.
- Sincronizzazione con database remoti e piattaforme cloud, per la condivisione immediata dei dati tra gruppi di ricerca e sistemi di monitoraggio.

Il sistema prevede la gestione completa dei dati di campionamento, comprendendo schede di campo digitalizzate, immagini georeferenziate e analisi di laboratorio. Un software gestionale per il campionamento e l'analisi, dotato di una dashboard per la pianificazione e il monitoraggio, consentirà la consultazione dei dati e l'esportazione in formato GeoPackage INSPIRE. Sarà inoltre possibile visualizzare i punti di campionamento su mappa e generare etichette univoche per ciascun punto e profondità.

L'applicativo sarà accessibile tramite i principali web browser, garantendo indipendenza dalla piattaforma. Il sistema risponderà a stringenti requisiti prestazionali, assicurando tempi di risposta rapidi e affidabilità dei dati.

3 Rilievo in campo: parametri superficiali

3.1 Dati generali

Data e autori

Per garantire la tracciabilità e la validità dei dati raccolti, è obbligatorio registrare con precisione la data del rilievo e i nomi degli operatori responsabili della descrizione del suolo. Questa informazione è fondamentale per correlare i dati pedologici con le condizioni ambientali e climatiche del momento della rilevazione, assicurando la ripetibilità dell'analisi.

Localizzazione

- L'identificazione geografica del punto di rilevamento deve essere effettuata con la massima precisione attraverso i seguenti parametri:
- Nome della località: attribuire un nome univoco al sito di indagine (es. "Piana del Fucino, Stazione 12").
- Coordinate geografiche: utilizzare un sistema di riferimento standardizzato (es. WGS84) e riportare latitudine e longitudine in gradi decimali.
- Altitudine: registrare l'altitudine del sito rispetto al livello medio del mare (s.l.m.), espressa in metri (m), per valutarne l'influenza sulle caratteristiche pedologiche.
- Posizione relativa nel paesaggio: specificare l'inserimento del punto di indagine nel contesto geomorfologico (es. sommità di collina, versante, fondovalle).

3.2 Morfologia del paesaggio, topografia e condizioni meteorologiche

La caratterizzazione della morfologia del paesaggio e della topografia del sito di rilievo è essenziale per comprendere i processi pedogenetici e le dinamiche geomorfologiche. Inoltre, le condizioni meteorologiche al momento del rilievo possono influenzare la descrizione e l'interpretazione delle caratteristiche del suolo.

Forme del paesaggio e topografia

- Unità geomorfologica: identificazione della configurazione morfologica del territorio (pianura alluvionale, terrazzo fluviale, collina, montagna, versante, fondovalle).
- Pendenza: espressa in gradi o percentuale, per determinare l'intensità dei processi erosivi e il drenaggio superficiale (runoff).
- Esposizione del pendio: angolo di orientamento rispetto ai punti cardinali, utile per valutare l'influenza della radiazione solare e delle condizioni microclimatiche.
- Forma del versante

La descrizione della forma del pendio deve essere effettuata in due direzioni:

- A monte/a valle (curvatura verticale): valutata perpendicolarmente alle curve di livello.
- Attraverso il pendio (curvatura orizzontale): misurata lungo le linee di livello

Le forme possono essere classificate come:

- Lineare (L): superficie senza variazioni di concavità o convessità.
- Convessa (V): superficie con una curvatura rivolta verso l'esterno.
- Concava (C): superficie con una curvatura rivolta verso l'interno.

Condizioni meteorologiche al momento del rilievo

Le condizioni atmosferiche registrate durante il rilievo forniscono informazioni utili per l'interpretazione dei dati pedologici. I parametri da rilevare includono:

- Temperatura dell'aria: misurata in gradi Celsius.
- Precipitazioni: specificare la presenza di pioggia o neve e la loro intensità.
- Copertura nuvolosa: classificata come sereno, parzialmente nuvoloso o coperto.
- Umidità relativa: espressa in percentuale, per valutare la disponibilità idrica nel suolo.
- Velocità e direzione del vento: elementi che possono influenzare l'evaporazione e la mobilizzazione delle particelle superficiali del suolo.

Le condizioni meteorologiche attuali possono essere classificate secondo i seguenti codici standard

CONDIZIONI METEOROLOGICHE	CODICE
Soleggiato/limpido (Sunny)	SU
Parzialmente nuvoloso (Partly Cloudy)	PC
Coperto (Overcast)	OV
Pioggia (Rain)	RA
Nevischio (Sleet)	SL
Neve (Snow)	SN

Questa classificazione standardizzata, basata su Schoeneberger et al. (2012), consente di annotare le condizioni atmosferiche in modo chiaro e uniforme, favorendo l'interpretazione e il confronto tra diverse osservazioni.

3.3 Vegetazione e uso del suolo

L'uso del suolo e la copertura vegetale sono parametri per la caratterizzazione pedologica, poiché influenzano direttamente la formazione, l'evoluzione e la conservazione del suolo. La descrizione accurata di questi elementi consente di valutare l'impatto delle attività antropiche e dei fattori naturali sulla qualità e sulla funzionalità del suolo.

Vegetazione

La vegetazione può essere classificata in:

- Vegetazione naturale: boschi, praterie, macchia mediterranea, tundra e altre formazioni spontanee.
- Vegetazione seminaturale: pascoli gestiti, prati permanenti, zone umide antropizzate.
- Vegetazione coltivata: colture annuali, colture perenni, sistemi agroforestali.

L'osservazione deve includere la densità, l'altezza media e lo stato fitosanitario della vegetazione presente, al fine di comprendere il suo ruolo nella protezione del suolo e nel ciclo biogeochimico dei nutrienti.

Tipo di coltivazione

Per una descrizione accurata del contesto agricolo e dell'uso del suolo, è necessario identificare e riportare il tipo di coltivazione presente nell'area di studio. La classificazione dei tipi di coltivazione segue una codifica standardizzata che consente una chiara identificazione delle pratiche gestionali e delle combinazioni colturali.

TIPO DI COLTIVAZIONE	CODICE
Sistema agroforestale simultaneo, con alberi e colture perenni	ACP
Sistema agroforestale simultaneo, con alberi e colture annuali	ACA
Sistema agroforestale simultaneo, con alberi, colture perenni e annuali	ACB
Sistema agroforestale simultaneo, con alberi e prateria	AGG
Sistema agroforestale simultaneo, con alberi, colture e prateria	ACG
Pascolo su vegetazione (semi-)naturale	GNP
Prateria a gestione intensiva, pascolata	GIP
Prateria a gestione intensiva, non pascolata	GIN
Produzione di colture perenni (e.g. orticole, foraggio, combustibile, fibre, piante ornamentali)	CPP
Produzione di colture annuali (e.g. orticole, foraggio, combustibile, fibre, piante ornamentali)	CPA
Maggese, meno di 12 mesi, con vegetazione spontanea	FYO
Maggese, almeno 12 mesi, con vegetazione spontanea	FOL
Maggese, tutte le piante costantemente rimosse (agricoltura non irrigua)	FD

Questa classificazione è utile per documentare l'interazione tra suolo e utilizzo del territorio, fornendo informazioni preziose per l'analisi della sostenibilità agricola e per studi sull'impatto ambientale delle pratiche colturali.

Tecniche per migliorare la produttività del sito

Durante la descrizione del profilo pedologico, è essenziale documentare le tecniche utilizzate per migliorare la produttività del suolo, considerando sia l'area circostante sia eventuali interventi specifici sugli strati del profilo. Se sono presenti più tecniche, riportarne fino a tre, indicando per primo il tipo dominante.

TIPO DI TECNICA	CODICE
Drenaggio con canali a cielo aperto	DC
Drenaggio sotterraneo	DU
Coltivazione irrigua	CW
Irrigazione	IR
Prose (Raised Beds)	RB
Terrazzamenti antropici	HT
Innalzamento locale della superficie del terreno	LO
Altro	OT
Nessuno	NO

3.4 Superficie del suolo

La superficie del suolo rappresenta l'interfaccia diretta tra l'atmosfera e il suolo sottostante, influenzando la dinamica idrologica, l'erosione e la stabilità del terreno. La sua caratterizzazione è essenziale per comprendere i processi pedologici e geomorfologici in atto. Questa sezione descrive le principali caratteristiche della superficie del suolo, includendo affioramenti rocciosi, frammenti superficiali grossolani, suoli poligonali, croste superficiali e crepacciature.

3.4.1 Affioramenti rocciosi

Gli affioramenti rocciosi sono esposizioni del substrato litologico e costituiscono un elemento rilevante per la valutazione della stabilità del suolo e della disponibilità di materiali alterabili. L'osservazione deve essere effettuata su una superficie di riferimento di almeno **10 m × 10 m**, con il profilo pedologico posizionato al centro. La documentazione deve includere:

- Percentuale della superficie coperta da affioramenti rocciosi.

- Distanza media tra affioramenti (in metri).
- Dimensione degli affioramenti, intesa come lunghezza media della dimensione maggiore.

Frammenti superficiali grossolani

I frammenti superficiali grossolani comprendono particelle sciolte di dimensioni superiori a 0,2 cm presenti sulla superficie del suolo. L'analisi deve essere condotta su una superficie di riferimento di **5 m × 5 m**, con il profilo al centro.

La dimensione dei frammenti grossolani viene determinata misurando la lunghezza media della loro maggiore dimensione, seguendo la classificazione riportata nella seguente tabella:

DIMENSIONE (CM)	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
> 0,2 - 0,6	Ghiaia fine	F
> 0,6 - 2	Ghiaia media	M
> 2 - 6	Ghiaia grossolana	C
> 6 - 20	Pietre	S
> 20 - 60	Massi	B
> 60	Massi grandi	L
Assenza di frammenti	Nessun frammento presente	N

Documentazione dei dati

- Percentuale totale: Annotare la percentuale complessiva della superficie osservata coperta da frammenti superficiali grossolani.
- Classi dimensionali: Registrare almeno una e fino a tre classi dimensionali, specificando la percentuale di superficie coperta da frammenti appartenenti a ciascuna classe. La classe dominante deve essere riportata per prima.

Suoli poligonali

I suoli poligonali si formano per effetto dei cicli di gelo e disgelo, determinando una caratteristica organizzazione dei frammenti superficiali in forme geometriche. L'osservazione deve includere:

- Dimensione media dei frammenti grossolani associati alla struttura poligonale (in cm).
- Identificazione della struttura dominante, con classificazione secondo i seguenti codici:

FORMA	CODICE
Cerchi (Rings)	R
Poligoni (Polygons)	P
Strisce (Stripes)	S
Nessuna (None)	N

Croste superficiali

Le croste superficiali sono strati consolidati presenti sulla superficie del suolo, formati da processi fisici, chimici o biologici. Devono essere osservate su un'area di almeno 5 m × 5 m e documentate in termini di:

- Percentuale della superficie coperta da croste.

Crepacciature superficiali

Le crepacciature superficiali sono fessure distinte da quelle derivanti dalla struttura del suolo e devono essere documentate in base alle seguenti caratteristiche:

- Larghezza media, classificata secondo la seguente scala:

LARGHEZZA (CM)	CLASSE DI LARGHEZZA	CODICE
≤ 1	Molto fine (Very Fine)	VF
> 1 - 2	Fine (Fine)	FI
> 2 - 5	Media (Medium)	ME
> 5 - 10	Larga (Wide)	WI
> 10	Molto larga (Very Wide)	VW
Nessuna	Nessuna fessura superficiale	NO

Se sono presenti più classi di larghezza: Indicare fino a due classi, riportando quella dominante per prima. Se le diverse classi sono distribuite casualmente, documentare esclusivamente la classe dominante.

- Distanza media tra le crepacciature, registrata in classi standardizzate:

DISTANZA (CM)	CLASSE DI DISTANZA	CODICE
≤ 0,5	Minuscola (Tiny)	TI
> 0,5 - 2	Molto piccola (Very Small)	VS
> 2 - 5	Piccola (Small)	SM
> 5 - 20	Media (Medium)	ME
> 20 - 50	Grande (Large)	LA
> 50 - 200	Molto grande (Very Large)	VL
> 200 - 500	Elevata (Huge)	HU
> 500	Molto elevata (Very Huge)	VH

Organizzazione spaziale, distinguendo tra:

- Poligonale (P): le crepacciature formano una disposizione regolare a poligoni.
- Non poligonale (N): le crepacciature non seguono un'organizzazione specifica.

3.5 Presenza d'acqua e idrorepellenza

La presenza di acqua e l'idrorepellenza della superficie del suolo sono parametri fondamentali per valutare il bilancio idrico e la capacità del suolo di assorbire e trattenere l'umidità. La documentazione di questi aspetti è essenziale per comprendere il comportamento idrologico del suolo e il suo potenziale utilizzo in ambito agricolo, ambientale e ingegneristico.

Presenza di acqua

La presenza di acqua sulla superficie del suolo deve essere documentata specificando la sua origine e la frequenza con cui il fenomeno si verifica. Se sono presenti più origini d'acqua, è necessario riportare quella predominante.

CRITERIO	CODICE
Permanentemente sommerso da acqua marina (sotto il livello medio della bassa marea)	MP
Superficie di marea (fra livello medio della bassa marea e il livello medio dell'alta marea)	MT
Mareggiate occasionali (sopra il livello medio dell'alta marea)	MO
Permanentemente sommerso da acque interne	FP

CRITERIO	CODICE
Sommerso almeno una volta all'anno da acque interne correnti di provenienza remota	FF
Sommerso meno di una volta all'anno da acque interne correnti di provenienza remota	FO
Sommerso almeno una volta all'anno da acque di falda locali emergenti	GF
Sommerso meno di una volta all'anno da acque di falda locali emergenti	GO
Sommerso da acque di pioggia locale almeno una volta all'anno	RF
Sommerso da acque di pioggia locale meno di una volta all'anno	RO
Sommerso almeno una volta all'anno da acque interne di origine sconosciuta	UF
Sommerso meno di una volta all'anno da acque interne di origine sconosciuta	UO
Nessuno dei casi sopracitati	NO

Idrorepellenza

L'idrorepellenza è una proprietà di alcuni suoli secchi che ostacola l'infiltrazione dell'acqua, influenzando la ritenzione idrica e la distribuzione dell'umidità. La valutazione di questa caratteristica deve essere effettuata esclusivamente su suoli asciutti e segue il metodo standard di rilevazione.

Metodo di valutazione:

- Applicare una piccola quantità di acqua sulla superficie del suolo secco.
- Misurare il tempo necessario affinché l'acqua si infiltri completamente.
- Classificare l'idrorepellenza secondo i criteri indicati nella Tabella.

CRITERIO	CODICE
L'acqua rimane sulla superficie per un tempo pari o superiore a 60 secondi	R
L'acqua si infiltra completamente entro meno di 60 secondi	N

3.6 Irregolarità superficiali

Le irregolarità della superficie del suolo derivano da processi naturali, attività antropiche o fenomeni erosivi. La loro classificazione è fondamentale per la caratterizzazione del paesaggio pedologico e per la valutazione della stabilità del suolo. Questa sezione descrive le irregolarità naturali, antropogeniche e quelle causate da erosione.

Irregolarità naturali della superficie

Le irregolarità naturali della superficie del suolo sono generate da processi geomorfologici o pedogenetici, come la crioturbazione o il rigonfiamento delle argille.

CRITERIO	CODICE
Irregolarità causata da crioturbazioni (e.g., palsa, pingo, bolle di fango, thufurs)	P
Irregolarità causata da argille rigonfianti (e.g., rilievo a gilgai)	G
Altro	O
Nessuna irregolarità	N

Irregolarità antropogeniche della superficie

Le irregolarità superficiali di origine antropogenica devono essere documentate solo se presentano una differenza media di altezza **pari o superiore a 5 cm** e mostrano una distribuzione ripetitiva. Caratteristiche isolate, come singoli mucchi di terra o depressioni, non devono essere incluse nella descrizione.

TIPO DI IRREGOLARITÀ	CODICE
Terrazzamenti antropogenici	HT
Prose (Raised Beds)	RB
Altre elevazioni longitudinali	EL
Elevazioni poligonali	EP
Elevazioni arrotondate	ER
Canali di drenaggio	CD
Canali di irrigazione	CI
Altri canali	CO
Cavità poligonali	HP
Cavità rotonde	HR
Altro	OT
Nessuna	NO
Tipo di irregolarità	Codice

Irregolarità della superficie causata da erosione

Le irregolarità superficiali possono anche derivare da processi di erosione, che determinano differenze di altezza **pari o superiori a 5 cm**. Per ogni caso osservato, è necessario riportare la categoria dell'erosione, il grado di intensità e lo stato di attività.

CATEGORIA	CODICE
Erosione idrica	
Laminare (sheet erosion)	WS
Incanalata in rivoli (rill erosion)	WR
Incanalata a fossi (gully erosion)	WG
Subsuperficiale (tunnel erosion)	WT
Erosione eolica (vento)	
Dune mobili (shifting sands)	AS
Altri tipi di erosione eolica	AO
Erosione idrica ed eolica combinata	WA
Movimenti in massa (frane e fenomeni simili)	MM
Non categorizzata	NC
Nessuna evidenza di erosione	NO

Grado di erosione

Il grado di erosione descrive l'intensità del fenomeno e il suo impatto sugli strati superficiali e subsuperficiali del suolo.

CRITERIO	GRADO	CODICE
Qualche evidenza di danno agli strati superficiali; funzioni ecologiche intatte	Debole	S
Chiara evidenza di rimozione degli strati superficiali; funzioni ecologiche parzialmente distrutte	Moderato	M

CRITERIO	GRADO	CODICE
Strati superficiali completamente rimossi e strati subsuperficiali esposti, funzioni ecologiche largamente distrutte	Severo	V
Rimozione sostanziale degli strati subsuperficiali profondi; funzioni ecologiche completamente distrutte (calanchi, badlands)	Estremo	E

Attività dell'erosione

L'attività dell'erosione viene classificata in base al periodo in cui il fenomeno è stato attivo.

CRITERIO	CODICE
Attualmente attiva	PR
Attiva nel passato recente (negli ultimi 100 anni)	RE
Attiva in tempi storici	HI
Periodo di attività non conosciuto	NK

Posizione del profilo pedologico rispetto alle irregolarità della superficie

La posizione del profilo pedologico su una superficie irregolare può essere classificata utilizzando i codici indicati nella successiva tabella.

POSIZIONE	CODICE
In alto	H
Sul pendio	S
In basso	L
Su una superficie inalterata	E

4 Rilievo in campo: parametri stratigrafici

4.1 Identificazione degli strati e dei loro spessori

Nel rilevamento pedologico, è cruciale identificare e caratterizzare gli strati, o orizzonti, che compongono il profilo del suolo. Questi strati, generati dai processi pedogenetici, si distinguono per variazioni di colore, tessitura, struttura, consistenza, contenuto di scheletro, figure di ossido-riduzione, concentrazioni, attività biologica e densità apparente.

Per ogni strato identificato, si devono registrare il numero totale di strati, i limiti superiore e inferiore (in cm dalla superficie), lo spessore minimo, medio e massimo (in cm), e il tipo di limite rispetto allo strato sottostante (netto, chiaro, graduale, diffuso, sconosciuto).

In presenza di orizzonti eterogenei, è necessario descrivere separatamente ciascuna componente, indicando le percentuali relative e altre caratteristiche rilevanti.

Particolare attenzione va posta alla profondità utile per le radici, ovvero lo spessore di suolo esplorabile, e alla profondità della roccia sottostante.

4.2 Saturazione e idrologia

Lo stato di saturazione influenza significativamente le proprietà chimico-fisiche del suolo, i processi pedogenetici e la sua funzionalità. Si riportano di seguito i criteri e i codici per la classificazione.

CRITERIO	CODICE
Saturazione con acqua marina per ≥ 30 giorni consecutivi	MS
Saturazione con acqua marina a seconda del cambio di marea	MT
Saturazione dovuta all'acqua di falda o all'acqua corrente per ≥ 30 giorni consecutivi con valori di conducibilità elettrica $\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$	GS
Saturazione dovuta all'acqua di falda o all'acqua corrente per ≥ 30 giorni consecutivi con valori di conducibilità elettrica $< 4 \text{ dS m}^{-1}$	GF
Saturazione dovuta alla pioggia per ≥ 30 giorni consecutivi	RA
Saturazione dovuta all'acqua di scioglimento del ghiaccio per ≥ 30 giorni consecutivi	MI
Acqua libera coperta da materia organica galleggiante	PW
Nessuno dei casi precedenti	NO

Oltre alla saturazione, altri aspetti idrologici rilevanti da considerare includono:

- Falda: Rilevare la presenza di falda superficiale, indicandone il tipo (assente, non confinata) e citando la fonte dell'informazione.
- Drenaggio interno: Valutare la frequenza e la durata dei periodi in cui il suolo non è saturo, considerando la conducibilità idraulica, la profondità della falda e la fisiografia.
- Rischio di inondazione: Stimare la probabilità e la durata delle inondazioni, basandosi su dati storici o testimonianze locali.
- Scorrimento superficiale (Runoff): Stimare la perdita di acqua per scorrimento, in relazione alla pendenza e alla permeabilità.
- Gestione delle acque: Identificare il tipo di gestione delle acque (drenaggio, irrigazione) e lo scopo (diminuire il ristagno, la siccità, la salinità, limitare l'erosione).

4.3 Composizione dei suoli

L'individuazione e la classificazione degli strati di un profilo (organici, organotecnici o minerali) è il primo passo per descrivere in modo completo le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del suolo, poiché ogni orizzonte racchiude informazioni fondamentali sul grado di decomposizione, sulla presenza di materiali antropici e sull'influenza della roccia madre.

CRITERIO	CODICE
Organico idromorfo	OH
Organico terroso	OT
Organotechnic idromorfo	TH
Organotechnic terroso	TT
Minerale	MI

Gli strati organici derivano principalmente da residui vegetali e animali in decomposizione e si distinguono in organico idromorfo (OH), che presenta elevata umidità e ristagno idrico, e organico terroso (OT), caratterizzato da un drenaggio più efficace. Gli strati organotecnici, indicati con le sigle TH (organotechnic idromorfo) e TT (organotechnic terroso), nascono dalla commistione di materiale organico e apporti antropici e si differenziano tra loro sulla base delle condizioni di umidità e della tipologia dei residui tecnologici o industriali presenti. Gli strati minerali (MI), invece, sono costituiti prevalentemente da particelle derivanti dall'alterazione della roccia madre, con un contenuto di sostanza organica trascurabile rispetto alle altre categorie.

La semplice osservazione in campo consente di proporre una classificazione provvisoria degli strati, mentre successive analisi di laboratorio possono perfezionare la descrizione, chiarendo il contenuto di carbonio organico, la tessitura, le proprietà chimiche e altri parametri di interesse.

Dopo aver riconosciuto la natura dello strato e averlo classificato, è necessario definire i limiti che separano un orizzonte dall'altro. Ogni passaggio netto o graduale fornisce indicazioni sui processi che hanno dato luogo alla formazione dello strato stesso o che ne hanno influenzato l'evoluzione. I criteri da osservare riguardano il colore, la tessitura, la struttura, la consistenza, l'abbondanza di scheletro, la presenza di figure di ossido-riduzione, di eventuali concentrazioni specifiche e di tracce di attività biologica, oltre alla densità apparente.

STRATI MINERALI, ORGANOTECHNIC E ORGANICI IDROMORFI: IL PASSAGGIO AVVIENE ENTRO (CM)	STRATI ORGANICI TERROSI: IL PASSAGGIO AVVIENE ENTRO (CM)	TIPO	CODICE
≤ 0.5	≤ 0.1	Molto Abrupto	V
> 0.5 – 2	> 0.1 – 0.2	Abrupto	A
> 2 – 5	> 0.2 – 0.5	Chiaro	C
> 5 – 15	> 0.5 – 1	Graduale	G
> 15	> 1	Diffuso	D

La classificazione del limite inferiore si basa in primo luogo sulla rapidità con cui avviene il passaggio tra gli strati. Nei suoli minerali (MI), organotecnici (TH, TT) e organici idromorfi (OH), quando il cambiamento è percepibile entro 0,5 cm si parla di limite molto abrupto (codice V), tra 0,5 e 2 cm di limite abrupto (A), tra 2 e 5 cm di limite chiaro (C), tra 5 e 15 cm di limite graduale (G) e oltre 15 cm di limite diffuso (D). Negli strati organici terrosi (OT) le soglie di riferimento per attribuire la stessa classificazione sono diverse e prevedono, rispettivamente, 0,1 cm per il limite molto abrupto, tra 0,1 e 0,2 cm per l'abrupto, tra 0,2 e 0,5 cm per il chiaro, tra 0,5 e 1 cm per il graduale e oltre 1 cm per il diffuso.

Oltre alla profondità entro cui il cambiamento è osservabile, l'andamento del limite inferiore può essere lineare (Smooth, S) se il passaggio risulta pressoché piano, ondulato (Wavy, W) se l'ampiezza delle ondulazioni è maggiore della loro profondità, irregolare (Irregular, I) se la profondità supera l'ampiezza, oppure frammentato (Broken, B) nel caso in cui il passaggio risulti discontinuo e si presenti come un insieme di tasche o lenti separate.

CRITERIO	ANDAMENTO	CODICE
Superficie pressoché piana	Lineare (Smooth)	S

CRITERIO	ANDAMENTO	CODICE
Ampiezza delle ondulazioni maggiore della profondità	Ondulato (Wavy)	W
Profondità delle ondulazioni maggiore dell'ampiezza	Irregolare (Irregular)	I
Discontinuo (composto da tasche o lenti separate)	Frammentato (Broken)	B

La valutazione complessiva di questi fattori, che comprende la distinzione tra strati organici, organotecnici e minerali e la definizione precisa dei relativi limiti inferiori, consente di definire in modo dettagliato la composizione dei suoli.

4.4 Frammenti, Cementati e Artefatti

Questa sezione fornisce una descrizione integrata dei materiali frammentari e degli artefatti presenti nel contesto geologico, evidenziando sia le componenti naturali (frammenti grossolani e resti di strati cementati fratturati) sia gli elementi di origine antropica (artefatti), al fine di garantire una valutazione complessiva e comparabile del deposito.

I frammenti grossolani, definiti come particelle minerali di origine naturale aventi un diametro equivalente superiore a 2 mm, includono anche i resti di strati cementati fratturati se, a seguito della fratturazione, la loro dimensione risulta maggiore di 2 mm, indipendentemente dalla loro dimensione originaria.

Per i frammenti con dimensioni comprese tra 0,6 cm e 60 cm, la classificazione si fonda sulla misura della dimensione massima, che viene considerata indicatore della granulometria e viene ulteriormente suddivisa in categorie quali Ghiaia Fine, Ghiaia Media, Ghiaia Grossolana, Ciottoli e Massi..

DIMENSIONE (CM)	CLASSE	FORMA	CODICE
> 0.2 - 0.6	Ghiaia Fine	Arrotondata	FR
		Angolare	FA
		Arrotondata e angolare	FB
> 0.6 - 2	Ghiaia Media	Arrotondata	MR
		Angolare	MA
		Arrotondata e angolare	MB

DIMENSIONE (CM)	CLASSE	FORMA	CODICE
> 2 - 6	Ghiaia Grossolana	Arrotondata	CR
		Angolare	CA
		Arrotondata e angolare	CB
> 6 - 20	Ciottoli	Arrotondata	SR
		Angolare	SA
		Arrotondata e angolare	SB
> 60	Massi	Arrotondata	LR
		Angolare	LA
		Arrotondata e angolare	LB
Nessun frammento grossolano			NO

Durante il rilevamento, è fondamentale quantificare simultaneamente sia lo stato di alterazione sia la percentuale del volume totale occupato dai frammenti grossolani appartenenti a ciascuna classe granulometrica, procedendo a partire dalla classe predominante.

L'analisi dello stato di alterazione dei frammenti grossolani deve essere condotta con estrema accuratezza e i risultati devono essere documentati in modo dettagliato, facendo riferimento alle specifiche classi di alterazione.

CRITERIO	STATO DI ALTERAZIONE	CODICE
Non o pochi segni di alterazione	Fresco	F
Perdita del colore originale della roccia e della forma dei cristalli nella parte esterna; le parti centrali rimangono relativamente fresche; la coesione originale è quasi del tutto conservata	Moderatamente alterato	M
Alterazione di tutti i minerali, tranne quelli più resistenti; perdita diffusa del colore originale della roccia; tende a disfarsi sotto una pressione moderata	Molto (Strongly) alterato	S

Nel corso del rilevamento, è necessario riportare la percentuale del volume totale occupato dai frammenti grossolani, specificando almeno una o due classi di forma e dimensione. Inoltre, è

fondamentale indicare la percentuale del volume occupato dai frammenti grossolani appartenenti alle diverse classi granulometriche, procedendo dalla classe dominante alle meno rappresentate.

Analogamente, deve essere documentata la percentuale totale del volume occupato dai resti di strati cementati fratturati, fornendo un quadro completo della distribuzione volumetrica di questi materiali all'interno del deposito o del contesto geologico analizzato

CLASSE	ANDAMENTO	CODICE
0%	Assente	A
0,1 – 5,0%	Scarso	S
5,1 – 15,0%	Comune	C
15,1 -35,0%	Frequente	F
35,1 – 70,0%	Abbondante	AB
>70,0%	Molto abbondante	MAB

È inoltre necessario identificare l'agente o gli agenti responsabili della cementazione (fino a un massimo di due), specificando la percentuale del volume occupato dai resti di ciascun tipo di cementazione, con priorità all'agente dominante. Tutte le stime volumetriche devono essere calcolate in riferimento al volume totale del suolo analizzato, garantendo un'analisi coerente e comparabile dei dati raccolti.

Parallelamente all'analisi dei materiali naturali, si procede ad una dettagliata documentazione degli artefatti, che rappresentano elementi di origine antropica e sono classificati in base alla tipologia.

TIPO	CODICE
Bitume (asfalto), continuo	BT
Bitume (asfalto), frammenti	BF
Black Carbon (carbone, frammenti carbonizzati, fuliggine)	BC
Scorie di caldaia (Boiler Slag)	BS
Ceneri di fondo (Bottom Ash)	BA
Mattoni e frammenti di cotto (Bricks)	BR
Ceramiche (Ceramics)	CE
Stoffa, tappeti (Cloth, Carpets)	CL

TIPO	CODICE
Sottoprodotti della combustione di carbone	CU
Cemento, continuo	CR
Cemento, frammenti	CF
Olio greggio (Crude Oil)	CO
Scheggiature (Debitage)	DE
Pietre lavorate o frantumate	DS
Ceneri volanti (Fly Ash)	FA
Geomembrane, continue	GM
Geomembrane, frammenti	GF
Vetro (Glass)	GL
Monete d'oro (Gold Coins)	GC
Rifiuti casalinghi indifferenziati	HW
Rifiuti industriali	IW
Pezzi di calce (Lumps of Lime)	LL
Metalli	ME
Scarichi di miniera	MS
Rifiuti organici	OW
Carta e cartone (Paper, Cardboard)	PA
Cartongesso (Plasterboard)	PB
Plastica	PT
Prodotti petroliferi lavorati (Processed Oil products)	PO
Gomma (Rubber)	RU
Legno trattato (Treated Wood)	TW
Altro	OT
Nessuno	NO

La classificazione degli artefatti si integra con la determinazione della dimensione media, basata sulla lunghezza maggiore, che consente di raggrupparli in classi che spaziano dalla "Terra fine" (dimensioni $\leq 0,2$ cm) ai "Massi" (dimensioni $\leq 0,2$ cm).

DIMENSIONE (CM)	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
≤ 0.2	Terra fine	E
$> 0.2 - 0.6$	Ghiaia fine	F
$> 0.6 - 2$	Ghiaia media	M
$> 2 - 6$	Ghiaia grossolana	C
$> 6 - 20$	Ciottoli (Stones)	S
$> 20 - 60$	Blocchi (Boulders)	B
> 60	Massi (Large Boulders)	L

4.5 Tessitura e struttura

La tessitura e la struttura rappresentano due proprietà fondamentali del suolo, determinanti per il suo comportamento fisico, chimico e biologico.

La tessitura è definita dalla proporzione relativa delle particelle minerali fini che compongono il suolo, ovvero sabbia, limo e argilla. Questa caratteristica influisce direttamente su parametri essenziali, quali la porosità, la capacità di ritenzione idrica, la permeabilità e l'aerazione, con conseguenze significative sulla disponibilità di acqua e nutrienti per le piante, nonché sull'attività microbica.

Per classificare i suoli in base alla tessitura, vengono utilizzate le classi tessiturali, che suddividono i suoli in categorie in funzione delle percentuali relative delle tre frazioni granulometriche. Questa classificazione consente di prevedere il comportamento del suolo in vari contesti agronomici, ambientali e ingegneristici, fornendo un quadro essenziale per la gestione delle risorse naturali e l'ottimizzazione delle pratiche colturali.

CLASSE TESSITURALE	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	CRITERI AGGIUNTIVI
Sand (S) [Sabbiosa]	> 85	< 15	< 10	$(\% \text{ limo} + 1.5 \times \% \text{ argilla}) < 15$
Loamy sand (LS) [Sabbioso franca]	$> 70 - \leq 90$	< 30	< 15	$(\% \text{ limo} + 1.5 \times \% \text{ argilla}) \geq$ $(\% \text{ limo} + 2 \times \% \text{ argilla}) < 30$
Silt (Si) [Limosa]	≤ 20	≥ 80	< 12	
Silt loam (SiL) [Franco limosa]	≤ 50	$\geq 50 - < 80$	< 27	$\leq 8, \% \text{ limo} \geq 80 - \leq 88; \% \text{ argilla} \geq 12 - \leq 20$

CLASSE TESSITURALE	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	CRITERI AGGIUNTIVI
Sandy loam (SL) [Franco sabbiosa]	> 52 – ≤ 85	≤ 48	< 20	(% limo + 2 × % argilla) ≥ 30
Loam (L) [Franca]	> 23 – ≤ 52	≥ 28 – < 50	≥ 7 – < 27	
Sandy clay loam (SCL) [Franco argilloso sabbiosa]	> 45 – ≤ 80	< 28	≥ 20 – < 35	
Silty clay loam (SiCL) [Franco argilloso limosa]	≤ 20	> 40 – ≤ 73	≥ 27 – < 40	
Clay loam (CL) [Franco argillosa]	> 20 – ≤ 45	> 15 – < 53	≥ 27 – < 40	
Sandy clay (SC) [Argilloso sabbiosa]	> 45 – ≤ 65	< 20	≥ 35 – < 55	
Silty clay (SiC) [Argilloso limosa]	≤ 20	≥ 40 – ≤ 60	≥ 40 – ≤ 60	
Clay (C) [Argillosa]	≤ 45	< 40	≥ 40	

La struttura del suolo è determinata dall'organizzazione spaziale delle particelle minerali e organiche e dalla disposizione dei pori, influenzando direttamente il movimento dell'acqua e dell'aria all'interno del profilo. La formazione della struttura avviene attraverso processi pedogenetici naturali, che portano alla formazione di aggregati con specifiche forme e caratteristiche, o attraverso l'azione di forze esterne, che possono modificarne la disposizione o generare condizioni di stratificazione.

Le strutture granulari, a blocchi angolari e subangolari, lenticolari, cuneiformi, prismatiche, colonnari e poliedriche derivano da processi di aggregazione naturale e conferiscono al suolo una maggiore stabilità e capacità di resistere agli agenti erosivi. Altre tipologie strutturali, come quella laminare, possono essere generate sia da processi naturali che da pressioni artificiali, mentre alcune condizioni, come la disposizione a grani singoli o l'assenza di struttura dovuta a perdita di sostanza organica o stratificazione sedimentaria, sono indicative di suoli con scarsa coesione o soggetti a trasformazioni fisiche dovute a processi erosivi o deposizionali.

In alcuni casi, la struttura del suolo riflette direttamente la natura del substrato geologico originario, come nei suoli con struttura ereditata, che può risultare chimicamente alterata o meno a seconda dell'interazione con i processi pedogenetici. In determinate condizioni, il suolo può presentare una struttura che si manifesta solo in stato secco, mentre risulta assente in condizioni di umidità elevata, o può mostrare una stratificazione evidente dovuta a sedimentazione differenziata. Esistono infine

situazioni in cui la struttura è determinata da interventi antropici, con la formazione di elementi artificiali di aggregazione.

TIPO DI STRUTTURA	FORMAZIONE	CODICE
Granulare	Aggregati strutturati, naturale	GR
A blocchi subangolari	Aggregati strutturati, naturale	BS
A blocchi angolari	Aggregati strutturati, naturale	BA
Lenticolare	Aggregati strutturati, naturale	LC
Cuneiforme	Aggregati strutturati, naturale	WE
Prismatica	Aggregati strutturati, naturale	PR
Colonnare	Aggregati strutturati, naturale	CO
Poliedrica	Aggregati strutturati, naturale	PH
A filo piatto (Flat-edged)	Aggregati strutturati, naturale	FE
Pseudosabbia/Pseudolimo	Aggregati strutturati, naturale	PS
Laminare	Naturale o risultato di pressioni artificiali	PL
A grani singoli (Single-grain)	Nessuna struttura, materiali sciolti	SR
Senza struttura (per perdita di sostanza organica o stratificazione)	Nessuna struttura, processi pedogenetici	SS
Struttura ereditata (non alterata chimicamente)	Struttura della roccia, non variabile con l'umidità	MR
Struttura ereditata (alterata chimicamente)	Struttura della roccia, variabile con l'umidità	MW
Struttura assente da umido, presente da secco	Nessuna struttura da umido, aggregati da secco	MS
Stratificata	Nessuna struttura, evidente stratificazione sedimentaria	ST
Zollosa	Elementi strutturali artificiali	CL

L'evidenza con cui le unità strutturali si manifestano rappresenta un ulteriore elemento discriminante nella caratterizzazione della struttura del suolo. Gli aggregati possono presentare un grado di coesione variabile, distinguendosi in unità scarsamente riconoscibili, moderatamente evidenti o

chiaramente definite. Quando l'evidenza è debole, gli aggregati risultano poco distinguibili e tendono a frantumarsi senza mostrare superfici nette di separazione; in condizioni di evidenza moderata, gli aggregati sono ben formati e distinguibili in posto, separandosi con facce integre e riconoscibili; un'evidenza forte si manifesta quando gli aggregati risultano chiaramente distinti e, se il suolo viene smosso, si separano nettamente in unità integre con superfici ben definite e facilmente riconoscibili.

CRITERIO	EVIDENZA	CODICE
Le unità sono scarsamente distinguibili in posto. Quando il materiale del suolo viene delicatamente smosso, si divide in un insieme di unità intere e frantumate, la maggior parte delle quali non presenta superfici di debolezza. È possibile distinguere solo in parte la parte interna da quella esterna.	Debole (Weak)	W
Le unità sono ben formate e distinguibili in posto. Quando si smuove il materiale del suolo, si formano unità intere e alcune frantumate, frammiste a materiale non aggregato. Gli aggregati si separano tra loro mostrando facce intatte con proprietà diverse da quelle delle superfici di frantumazione.	Moderata (Moderate)	M
Le unità sono chiaramente distinguibili in posto. Quando smosse, si separano nettamente principalmente in unità integre. Gli aggregati presentano superfici con proprietà ben definite ed evidenti.	Forte (Strong)	S

Le dimensioni degli aggregati strutturali rappresentano un ulteriore parametro di classificazione, fornendo indicazioni sulla distribuzione spaziale delle particelle e sulle proprietà meccaniche del suolo. Gli aggregati possono variare da molto fini a estremamente grossolani, con un diametro che va da meno di un millimetro a oltre venti millimetri, influenzando la circolazione dell'aria e dell'acqua, la resistenza alla compattazione e la reattività del suolo alle sollecitazioni meccaniche. Aggregati di piccole dimensioni tendono a garantire una maggiore porosità e capacità di trattenere l'acqua, mentre aggregati più grossolani favoriscono il drenaggio e riducono il rischio di ristagno idrico.

CRITERIO: DIMENSIONE DELL'UNITÀ STRUTTURALE (MM) GRANULARE, A FILO PIATTO (FLAT-EDGED), LAMINARE	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
≤ 1	Molto fine (Very Fine)	VF
> 1 - 2	Fine (Fine)	FI
> 2 - 5	Media (Medium)	ME

CRITERIO: DIMENSIONE DELL'UNITÀ STRUTTURALE (MM) GRANULARE, A FILO PIATTO (FLAT-EDGED), LAMINARE	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
> 5 - 10	Grossolana (Coarse)	CO
> 10 - 20	Molto grossolana (Very Coarse)	VC
> 20	Estremamente grossolana (Extremely Coarse)	EC

L'interazione tra tessitura e struttura determina il comportamento fisico complessivo del suolo, regolando la sua risposta alle condizioni ambientali e alle pratiche di gestione. La valutazione congiunta della tessitura e della struttura consente di comprendere in maniera più approfondita il comportamento del suolo nei diversi contesti pedologici e di definire strategie di gestione adeguate a preservarne la funzionalità e la stabilità nel tempo.

4.6 Porosità e permeabilità

L'analisi congiunta della porosità e della permeabilità permette di determinare in modo più accurato il comportamento del suolo nei confronti dell'infiltrazione e della ritenzione idrica, fornendo indicazioni utili per la gestione agronomica, la valutazione della suscettibilità all'erosione e la previsione dei processi di consolidazione e compattazione. L'interazione tra dimensione e quantità dei pori, presenza di crepacciature e variazioni della conducibilità idraulica consente di delineare il regime idrico del suolo e la sua risposta alle condizioni ambientali e climatiche, fornendo un quadro dettagliato delle sue proprietà fisiche e della sua funzionalità idrodinamica.

La porosità del suolo rappresenta la frazione di spazio vuoto all'interno della massa solida ed è un parametro determinante per la circolazione di acqua e aria, influenzando direttamente la permeabilità e la capacità di ritenzione idrica. I pori possono essere distinti in matriciali e non matriciali, in base alla loro origine e funzione. I pori non matriciali non appartengono alla struttura primaria del suolo, ma si formano attraverso processi specifici legati a fenomeni biologici o fisici, come l'attività degli organismi viventi o il ritiro e il rigonfiamento del suolo.

CRITERIO	TIPO	CODICE
Vuoti cilindrici e allungati; e.g., gallerie di vermi	Tubolari	TU
Vuoti cilindrici, allungati e ramificati; e.g., canali radicali vuoti	Tubolari dendritici (Dendritic Tubular)	DT

CRITERIO	TIPO	CODICE
Vuoti da ovoidali a sferici; e.g., pseudomorfi solidificati dovuti a bolle di gas intrappolate sotto una crosta; comuni in ambienti aridi, semiaridi e suoli con permafrost	Vescicolari	VE
Cavità non connesse, camere di forma irregolare (e.g., vughs)	Irregolari (Irregular)	IG
Nessun poro non matriciale presente	Nessuno	NO

La presenza e l'abbondanza di pori non matriciali varia in funzione delle condizioni ambientali e dei processi pedogenetici in atto. Le dimensioni dei pori incidono significativamente sulla dinamica dei fluidi nel suolo e vengono classificate sulla base del diametro osservato nell'area valutata.

DIAMETRO	AREA DEL SUOLO DA VALUTARE	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
≤ 1 mm	1 cm ²	Molto fini (Very Fine)	VF
> 1 - 2 mm	1 cm ²	Fini (Fine)	FI
> 2 - 5 mm	1 dm ²	Medi (Medium)	ME
> 5 - 10 mm	1 dm ²	Grossolani (Coarse)	CO
> 10 mm	1 m ²	Molto grossolani (Very Coarse)	VC

Parallelamente, la quantità di pori viene determinata contando il numero di aperture presenti nell'area di riferimento, suddividendo la loro abbondanza in quattro classi. Questa classificazione consente di stimare l'effettiva connettività dei vuoti nel suolo e la loro incidenza sulla permeabilità.

NUMERO DI PORI	CLASSE DI ABBONDANZA	CODICE
≤ 1	Molto pochi (Very Few)	V
> 1 - 3	Pochi (Few)	F
> 3 - 5	Comuni (Common)	C
> 5	Molti (Many)	M

Un altro elemento significativo nella valutazione della porosità del suolo è rappresentato dalle crepacciature, che possono incidere sulla dinamica dell'acqua e sulla resistenza meccanica del suolo. L'ampiezza media di queste fratture viene espressa in millimetri e la loro quantità è determinata contando il numero di crepacciature presenti su una lunghezza orizzontale di 1 m,

misurata al centro dello spessore dello strato considerato. Le crepacciature, in funzione della loro dimensione e distribuzione, possono influenzare significativamente la permeabilità del suolo, specialmente nei terreni argillosi soggetti a fenomeni di ritiro e rigonfiamento.

La permeabilità è definita come la capacità del suolo di trasmettere l'acqua attraverso il proprio volume ed è strettamente legata alla struttura e alla connettività dei pori. In ambito pedologico, la permeabilità viene stimata in campagna come conducibilità idraulica satura, mentre la misurazione dettagliata avviene attraverso test specifici in laboratorio. Questa proprietà è essenziale per valutare il comportamento idrologico del suolo, permettendo di prevedere il drenaggio, la possibilità di ristagni e la velocità di infiltrazione dell'acqua nei diversi orizzonti del profilo.

PERMEABILITÀ	CODICE	KSAT ($\mu\text{M}/\text{s}$)	PROPRIETÀ DELL'ORIZZONTE
Elevata	1	>100	Classe granulometrica frammentale, cineritica o pomicea. Molti pori verticali, medio e più grandi, che si estendono attraverso lo strato.
	2	100 - 10	Classe granulometrica mediale pomicea, scheletrico mediale, scheletrico cespitosa, scheletrico cavernoso, idropomicea, che sia molto friabile, friabile, soffice e sciolta. Con selle idromorfiche umide o bagnate, struttura granulare moderatamente o fortemente sviluppata, poliedrale fortemente sviluppata di ogni dimensione o prismatica più pellicola dal molto grossolana, scarse facce di pressione o slickensides. Con vuoti di coanni, medio e più grandi, che si estendono attraverso lo strato.
Media	3	10 - 1	Struttura poliedrica o prismatica molto grossolana e nessuna faccia di pressione o slickensides. Analisi uanale o maggiore del 35%, consistenza soffice, debolmente cementato, sia molto friabile, senza facce di pressione o slickensides.
	4	1 - 0.1	Struttura moderatamente o debolmente sviluppata e moderatamente o non molto resistente, o debolmente cementato. Moderatamente cementato.

PERMEABILITÀ	CODICE	KSAT ($\mu\text{M/s}$)	PROPRIETÀ DELL'ORIZZONTE
Bassa	5	0.1 - 0.01	Facce di pressione o slickensides molto e comuni.
	6	<0.01	Indurito o molto fortemente cementato.

Le forme da stress forniscono ulteriori informazioni sulla stabilità meccanica del suolo e sulla sua risposta alle sollecitazioni fisiche. Questi indicatori comprendono la percentuale di facce di pressione e di facce di scivolamento presenti sulla superficie degli aggregati del suolo. Le facce di pressione si formano in seguito alla compressione e alla ridistribuzione dei materiali del suolo sotto il peso degli strati sovrastanti o per effetto di variazioni nella saturazione idrica, mentre le facce di scivolamento, note anche come slickensides, si originano nei suoli con elevata plasticità, caratterizzati da movimenti differenziali interni che creano superfici lisce e inclinate.

4.7 Colore e forme redoximorfiche

Il colore del suolo è una proprietà fondamentale per la sua descrizione e classificazione, poiché fornisce informazioni sulle sue caratteristiche chimiche, mineralogiche e sulle condizioni ambientali in cui si è formato. La determinazione del colore viene effettuata utilizzando le tavole Munsell, che esprimono quantitativamente tre componenti: hue (tinta), value (luminosità) e chroma (intensità del colore). Il hue rappresenta la componente dominante dello spettro visibile, il value indica la quantità di luce riflessa e il chroma esprime la purezza del colore. La misurazione deve essere effettuata su campioni umidi per garantire una maggiore uniformità dei risultati, evitando l'esposizione diretta alla luce solare in momenti particolari della giornata come l'alba e il tramonto.

Il colore del suolo può variare significativamente in funzione del contenuto di sostanza organica, della presenza di ossidi di ferro e manganese e delle condizioni di ossidazione-riduzione. In condizioni ben drenate, la presenza di ossidi di ferro conferisce al suolo tonalità rosse, gialle o brune, mentre in ambienti con ristagno idrico si possono osservare alterazioni cromatiche dovute a fenomeni di idromorfia.

Nei suoli idromorfi, la presenza di forme redoximorfiche è il risultato di processi di ossidoriduzione legati alla variabilità del regime idrico e all'alternanza tra condizioni aerobiche e anaerobiche. Queste forme si manifestano sotto forma di variazioni cromatiche nella matrice del suolo e possono essere classificate in oximorfiche e reductimorfiche in base al processo prevalente.

Le forme oximorfiche derivano dalla precipitazione di ossidi e idrossidi di ferro e manganese in seguito all'ossidazione di elementi mobili e sono tipicamente osservabili come macchie, concrezioni o noduli di colore bruno-rossastro o nero.

COMPOSIZIONE	CODICE
Ossidi di Fe	FE
Ossidi di Mn	MN
Ossidi di Fe e Mn	FM
Jarosite	JA
Schwertmannite	SM
Solfati di Fe e Al (non specificati)	AS

Le forme reductimorfiche, al contrario, sono il risultato della dissoluzione selettiva di ossidi di ferro in condizioni riducenti, dando origine a zone impoverite di colore grigio chiaro o verdastro.

COMPOSIZIONE	CODICE
Solfuri di Fe	FS
Nessun accumulo visibile	NV

La distribuzione spaziale delle forme redoximorfiche all'interno del profilo del suolo è determinante per l'interpretazione dei processi pedogenetici e delle condizioni idrologiche.

LOCALIZZAZIONE	CODICE
Parti più interne	
Negli aggregati del suolo: masse	OIM
Negli aggregati del suolo: concrezioni	OIC
Negli aggregati del suolo: noduli	OIN
Negli aggregati del suolo: concrezioni e/o noduli (non distinguibili)	OIB
Parti più esterne	
Sulle superfici degli aggregati del suolo	OOA
In prossimità delle superfici degli aggregati, intrise nella matrice (hypocoats)	OOH
Sulle pareti dei biopori, rivestono tutta la superficie	OOE
Sulle pareti dei biopori, non rivestono tutta la superficie	OON
In prossimità dei biopori, intrise nella matrice (hypocoats)	OOI

LOCALIZZAZIONE	CODICE
Casuali (non associate con aggregati o pori)	
Distribuite nello strato senza un ordine visibile	ORN
Distribuite nello strato attorno alle aree con forme reductimorfiche	ORS
Distribuite ovunque	ORT

Anche le forme reductimorfiche possono presentare una distribuzione spaziale variabile.

LOCALIZZAZIONE	CODICE
Parti più interne	
Dentro gli aggregati del suolo	RIA
Parti più esterne	
Al di fuori degli aggregati del suolo	ROA
Attorno ai biopori completamente circondati	ROE
Attorno ai biopori non completamente circondati	RON
Casuali (non associate con aggregati o pori)	
Distribuite nello strato senza un ordine visibile	RRN
Distribuite nello strato attorno alle forme oximorfiche	RRS
Distribuite ovunque	RRT

La dimensione delle forme oximorfiche rappresenta un ulteriore criterio descrittivo ed è classificata in base al diametro osservato.

DIMENSIONE (MM)	CLASSE DIMENSIONALE	CODICE
≤ 2	Molto piccole (Very Fine)	VF
> 2 - 6	Piccole (Fine)	FI
> 6 - 20	Medie (Medium)	ME
> 20 - 60	Grossolane (Coarse)	CO
> 60	Molto grossolane (Very Coarse)	VC

4.8 Pellicole e aggregati

Le pellicole rappresentano figure pedogenetiche che derivano dalla deposizione di materiali negli orizzonti profondi del suolo a seguito di processi di eluviazione e illuviazione. Esse possono manifestarsi in diverse forme, tra cui pellicole di argilla (cutans), pellicole ferromanganesifere, pellicole di sostanza organica e pellicole biancastre di sabbia o limo (skeletans), originate dall'asportazione selettiva di argilla e ossidi di ferro. Un tipo particolare di pellicole, gli agricutans, è costituito da accumuli di materiale grossolano arricchito in sostanza organica, tipicamente presenti al di sotto degli orizzonti lavorati.

La classificazione delle pellicole si basa sulla loro composizione e localizzazione.

Le pellicole di argilla rivestono le superfici degli aggregati del suolo, i frammenti grossolani o le pareti dei biopori, e la loro abbondanza viene espressa come percentuale rispetto alla superficie totale di osservazione, suddividendosi in assente (0%), scarsa (0-10%), comune (10,1-50%) e abbondante (>50%).

Un'altra tipologia sono i ponti di argilla, che si formano tra i granuli di sabbia e la cui presenza è quantificata in base alla percentuale di granuli interessati.

Le pellicole di sostanza organica e ossidi si sviluppano sulla superficie dei granuli di sabbia e/o limo grossolano e si classificano in base al grado di copertura.

CRITERIO	CODICE
Pellicole con crepe su granuli di sabbia	C
Granuli di sabbia e/o limo grossolano non ricoperti	U
Tutti i granuli di sabbia e limo grossolano coperti senza crepe	A

4.9 Contenuti in carbonati e gesso

I carbonati e il gesso sono componenti chimici che influenzano significativamente le proprietà fisiche e chimiche del suolo, contribuendo alla regolazione del pH, alla capacità di scambio cationico e ai processi di cementazione e stabilizzazione della struttura.

I carbonati possono essere presenti nel suolo sia in forma dispersa nella matrice, dove la loro presenza può essere rilevata attraverso il test dell'effervescenza con acido cloridrico (HCl) 1 M, sia in forma secondaria, con accumuli visibili. Il grado di effervescenza varia da assente a estremamente calcareo in base all'intensità della reazione, che può essere udibile e/o visibile, e alla quantità stimata di carbonati totali.

CRITERIO	CONTENUTO % (IN MASSA)	CODICE
Nessuna effervescenza visibile o udibile	Non-Calcareo (0)	NC
Effervescenza udibile e non visibile	Debolmente calcareo (> 0 - 2)	SL
Effervescenza visibile	Moderatamente calcareo (> 2 - 10)	MO
Effervescenza molto visibile, bollicine formano una debole schiuma	Fortemente calcareo (> 10 - 25)	ST
Reazione violenta, formazione rapida di una spessa schiuma	Estremamente calcareo (> 25)	EX

I carbonati secondari, ossia i prodotti di redistribuzione dei carbonati primari all'interno del profilo pedologico, si manifestano sotto forma di masse, noduli e concrezioni, filamenti (come pseudomiceli), rivestimenti sulle superfici degli aggregati o sulle pareti dei biopori e accumuli sulla parte inferiore dei frammenti grossolani o di strati cementati fratturati. L'abbondanza e la localizzazione di questi accumuli forniscono indicazioni utili sulla dinamica dei processi di dissoluzione e precipitazione dei carbonati all'interno del profilo pedologico, particolarmente in suoli con oscillazioni del regime idrico.

TIPI	CODICE
Masse (comprese le aggregazioni sferoidali simili a occhi bianchi - byeloglaska)	MA
Noduli e/o concrezioni	NC
Filamenti (compresi i filamenti continui come gli pseudomiceli)	FI
Rivestimenti sulle superfici degli aggregati del suolo o sulle pareti dei biopori	AS
Rivestimenti sulle parti inferiori dei frammenti grossolani e dei resti di strati cementati fratturati	UR
Nessun carbonato secondario	NO

La localizzazione dell'effervescenza fornisce ulteriori informazioni sulla distribuzione dei carbonati nel profilo pedologico e si distingue in quattro categorie.

CODICE	DESCRIZIONE
1	Generalizzata (matrice e frammenti)

CODICE	DESCRIZIONE
2	Localizzata alla terra fine
3	Localizzata nei frammenti grossolani
4	Localizzata nei frammenti grossolani

Il gesso, altro composto comune nei suoli aridi e semiaridi, è rilevabile attraverso la misura della conducibilità elettrica (EC) in sospensione acquosa, che consente di stimarne il contenuto nei suoli con pochi sali facilmente solubili.

CONDUCIBILITÀ ELETTRICA (EC)	CONTENUTO % (IN MASSA)	CODICE
$\leq 1.8 \text{ dS m}^{-1}$ in 10 g suolo / 25 ml H ₂ O o $\leq 0.18 \text{ dS m}^{-1}$ in 10 g suolo / 250 ml H ₂ O	Non-gessoso (0)	NG
$> 0.18 - \leq 1.8 \text{ dS m}^{-1}$ in 10 g suolo / 250 ml H ₂ O	Poco gessoso ($> 0 - 5$)	SL
$> 1.8 \text{ dS m}^{-1}$ in 10 g suolo / 250 ml H ₂ O	Moderatamente gessoso ($> 5 - 15$)	MO
Molto gessoso	$> 15 - 60$	ST
Estremamente gessoso	> 60	EX

4.10 Parametri chimici

Il pH del suolo rappresenta un parametro fondamentale per la valutazione della reazione chimica del suolo e della sua influenza sulla disponibilità degli elementi nutritivi e sulla stabilità dei minerali. In campo, il pH può essere determinato mediante misurazioni potenziometriche utilizzando diverse soluzioni di estrazione.

SOLUZIONE	RAPPORTO DI MISCELAZIONE (VOLUME : VOLUME)	CODICE
Acqua distillata (H ₂ O)	1:1	W11
Acqua distillata (H ₂ O)	1:5	W15
Soluzione di CaCl ₂ 0,01 M	1:5	C15
Soluzione di KCl 1 M	1:5	K15

4.11 Consistenza

La consistenza del suolo riflette l'intensità delle forze di coesione e adesione tra le particelle e la resistenza alla deformazione o alla frattura. Essa viene descritta in base a diversi parametri, tra cui la resistenza alla rottura, il grado di cementazione, l'adesività e la plasticità. Nei suoli cementati, è necessario indicare la percentuale volumetrica dello strato interessato e identificare gli agenti responsabili della cementazione.

AGENTE CEMENTANTE	CODICE
Carbonati	CA
Gesso	GY
Sali facilmente solubili	RS
Silice	SI
Sostanza organica	OM
Ossidi di Fe	FE
Ossidi di Mn	MN
Al	AL
Ghiaccio, < 75% (in volume)	IA
Ghiaccio, ≥ 75% (in volume)	IM

La resistenza alla rottura è un parametro che fornisce informazioni sulla coesione delle particelle ed è valutata sia in condizioni di umidità che a secco. Nei suoli non cementati, si distinguono diverse classi. La misurazione di questi parametri è fondamentale per comprendere la lavorabilità del suolo e la sua risposta ai cicli di umidità e disseccamento, specialmente in contesti agricoli e ingegneristici.

CRITERIO	RESISTENZA ALLA ROTTURA DA UMIDO	CODICE	RESISTENZA ALLA ROTTURA DA SECCO	CODICE
Non si ottiene un campione intatto	Sciolto	LO	Sciolto	LO
La forza esercitata tra le dita è molto debole, < 8 N	Molto friabile	VF	Soffice	SO

CRITERIO	RESISTENZA ALLA ROTTURA DA UMIDO	CODICE	RESISTENZA ALLA ROTTURA DA SECCO	CODICE
La forza esercitata tra le dita è debole, 8 - < 20 N	Friabile	FR	Poco duro	SH
La forza esercitata tra le dita è moderata, 20 - < 40 N	Resistente	FI	Moderatamente duro	MH
La forza esercitata tra le dita è forte, 40 - < 80 N	Molto resistente	VI	Duro	HA
La forza esercitata con le mani è moderata, 80 - < 160 N	Estremamente resistente	EI	Molto duro	VH
Si deve premere con il piede e tutto il peso del corpo, 160 - < 800 N	Poco rigido	SR	Estremamente duro	EH
Se non cede alla pressione del piede (800 N) si deve colpire con < 3 J	Rigido	RI	Rigido	RI
Il colpo è ≥ 3 J	Molto rigido	VR	Molto rigido	VR

La suscettibilità alla cementazione esprime la capacità del suolo di formare aggregati cementati in seguito a cicli ripetuti di essiccazione e reidratazione. Questo fenomeno è rilevante nei suoli con elevato contenuto di carbonati, gesso o ossidi di ferro, in cui i processi di precipitazione e dissoluzione alterano progressivamente la struttura del terreno.

CRITERIO	CODICE
Si cementa dopo ripetuti cicli di disseccamento e inumidimento	CW
Non si cementa dopo ripetuti cicli di disseccamento e inumidimento	NO

Un altro aspetto rilevante è la fragilità del suolo, determinata dalla composizione e dalla disposizione degli aggregati. Questa proprietà condiziona il comportamento del terreno sotto carico e influisce sul rischio di compattazione o fessurazione in condizioni di disseccamento prolungato.

CRITERIO	TIPO	CODICE
Si rompe bruscamente (scoppia o va in frantumi)	Fragile	BR

CRITERIO	TIPO	CODICE
Si rompe prima di comprimersi a circa la metà dello spessore originario	Semi deformabile	SD
Può essere compresso oltre la metà dello spessore originario	Deformabile	DF

Infine, il grado di plasticità rappresenta un ulteriore parametro essenziale per la caratterizzazione della consistenza. Determinato attraverso il test di formazione di un rotolo di suolo, è particolarmente significativo nei suoli argillosi, dove un'elevata plasticità indica una maggiore capacità di ritenzione idrica, ma anche una potenziale suscettibilità alla compattazione e alla riduzione della permeabilità.

CRITERIO	GRADO	CODICE
Non si forma un rotolo di 6 mm di diametro, o se si riesce a formarlo non è in grado di reggersi se tenuto ad una estremità.	Non-plastico	NP
Il rotolo di 6 mm di diametro si regge ma non se il diametro è di 4 mm.	Poco plastico	SP
Il rotolo di 4 mm di diametro si regge ma non se il diametro è di 2 mm.	Moderatamente plastico	MP
Il rotolo di 2 mm di diametro si regge.	Molto plastico	VP

Questi aspetti, interconnessi tra loro, contribuiscono a definire le proprietà fisiche del suolo e il suo comportamento in risposta alle variazioni ambientali e alle sollecitazioni meccaniche.

4.12 Croste e fenomeni di sigillatura

Le croste superficiali del suolo rappresentano strati consolidati che si formano sulla superficie del terreno a seguito di processi fisici, chimici o biologici, influenzando significativamente l'infiltrazione dell'acqua, l'erosione e la dinamica della superficie pedologica. La loro formazione è determinata da diversi fattori, tra cui la composizione granulometrica, la presenza di cementanti e l'attività biologica superficiale. Le croste possono essere classificate in base agli agenti responsabili del loro sigillo, distinguendo tra croste fisiche, chimiche e biologiche.

La presenza o assenza di croste superficiali ha implicazioni rilevanti per la gestione del suolo, specialmente in ambienti aridi e semiaridi, dove le croste fisiche e chimiche possono limitare l'infiltrazione dell'acqua e aumentare il rischio di ruscellamento ed erosione, mentre le croste biologiche possono favorire la stabilità del suolo e il mantenimento dell'umidità.

TIPO	CODICE
Fisico permanente	PP
Fisico solo quando secco	PD
Chimico da carbonati	CC
Chimico da gesso	CG
Chimico da sali facilmente solubili	CR
Chimico da silice	CS
Biologico da cianobatteri	BC
Biologico da alghe	BA
Biologico da funghi	BF
Biologico da licheni	BL
Biologico da muschi	BM
Crosta non presente	NO

4.13 Vetri vulcanici e caratteristiche andic

I vetri vulcanici e le proprietà andic rappresentano elementi distintivi dei suoli sviluppati su materiali piroclastici e contribuiscono alla definizione delle loro caratteristiche fisiche, chimiche e mineralogiche. I vetri vulcanici sono frammenti amorfi derivati dal raffreddamento rapido della lava e si trovano principalmente nella frazione sabbiosa e del limo grossolano del suolo. La loro abbondanza è un indicatore dell'intensità dei processi di alterazione e della stabilità minerale del profilo pedologico. Le proprietà andic derivano dall'alterazione moderata dei materiali piroclastici e sono caratterizzate dalla presenza di minerali a breve ordine strutturale come allofane, imogolite e complessi organo-metallici.

% DI PARTICELLE	CLASSE DI ABBONDANZA	CODICE
0	Nessuna	N
> 0 - 5	Poche	F
> 5 - 30	Comuni	C
> 30	Molte	M

La diagnosi in campo delle proprietà andic può essere effettuata attraverso il test del fluoruro di sodio (NaF), che evidenzia la presenza di minerali andici mediante un aumento del pH superiore a 9,5. Un altro indicatore delle proprietà andic è la tissotropia, ovvero la capacità del materiale di passare da uno stato plastico solido a uno liquefatto sotto pressione e tornare alla condizione iniziale una volta rilasciata la forza applicata.

CRITERIO	CODICE
Test NaF positivo	NF
Tissotropia	TH
Test NaF positivo e tissotropia	NT
Nessuno dei precedenti	NO

4.14 Forme di permafrost

Le forme di permafrost rappresentano caratteristiche pedogenetiche e geomorfologiche associate ai processi di congelamento e disgelo del suolo, tipiche delle regioni con temperature costantemente inferiori a 0°C per periodi prolungati. L'alterazione criogenica del suolo è il risultato delle dinamiche termiche che determinano la formazione di strutture specifiche come cunei e lenti di ghiaccio, interruzioni dello strato inferiore del suolo e fenomeni di involuzione, in cui materiali organici e minerali si mescolano per effetto della crioturbazione. La separazione del materiale grossolano da quello fine è un'altra manifestazione di questi processi, dovuta alla differente risposta delle frazioni granulometriche agli stress termici e ai movimenti del ghiaccio. La classificazione delle forme di permafrost si basa sulla tipologia di alterazione criogenica osservata nel profilo pedologico e sulla stima della percentuale di suolo interessata, consentendo di identificare le caratteristiche dominanti e secondarie all'interno di un'area esposta.

FORMA	CODICE
Cunei di ghiaccio	IW
Lenti di ghiaccio	IL
Limiti inferiori dello strato interrotti	DB
Involuzioni di materia organica in uno strato minerale	OI
Involuzioni minerali in uno strato organico	MI
Separazione del materiale grossolano da quello fine	CF
Altra	OT

FORMA	CODICE
Nessuna	NO

La presenza di strati con permafrost è determinata dalle condizioni termiche e dalla quantità di acqua disponibile per la formazione di ghiaccio. Il suolo può presentare ghiaccio solido con cementazione evidente o cristalli facilmente visibili, indicando una condizione di permafrost consolidato. In altri casi, pur avendo una temperatura inferiore a 0°C, il suolo non contiene abbastanza acqua da formare cristalli visibili, risultando in una condizione di permafrost secco. L'assenza di permafrost è invece caratterizzata da temperature superiori allo zero o da un regime termico che non consente il mantenimento del ghiaccio nel tempo. L'analisi della distribuzione e dello stato del permafrost è essenziale per comprendere l'evoluzione del paesaggio in ambienti freddi, i processi di stabilità del suolo e gli impatti sulle dinamiche ecologiche e geotecniche.

CRITERIO	CODICE
Ghiaccio solido, cementazione da ghiaccio o cristalli facilmente visibili	I
Temperatura del suolo < 0°C e acqua insufficiente a formare cristalli facilmente visibili	T
Assenza di permafrost	N

4.15 Densità e compattazione

La densità apparente rappresenta il rapporto tra la massa solida e il volume del suolo, esprimendosi generalmente in g/cm³, e può essere stimata direttamente in campo o determinata con metodologie di laboratorio. La classificazione è correlata alla tessitura del suolo, poiché i suoli con maggiore contenuto di argilla tendono ad avere densità inferiori rispetto ai suoli sabbiosi, che presentano una struttura più compatta e minore porosità. Un metodo pratico per stimare la densità d'impaccamento è basato sulla resistenza del suolo alla penetrazione di un coltello.

CRITERIO	CLASSE	CODICE
Il coltello penetra completamente facilmente con un debole sforzo	Molto sciolto (Very Loose)	VL
Il coltello penetra completamente applicando della forza	Sciolto (Loose)	LO
Il coltello penetra a metà applicando della forza	Intermedio (Intermediate)	IN
Solo la punta del coltello riesce a penetrare applicando una forza	Resistente (Firm)	FR

CRITERIO	CLASSE	CODICE
Il coltello non riesce (o solo un poco) a penetrare applicando una forza	Molto Resistente (Very Firm)	VR

La densità apparente è influenzata da vari fattori, tra cui il contenuto di sostanza organica e la presenza di alluminio attivo. L'analisi della densità e della compattazione è essenziale per la gestione agronomica e ambientale del suolo. Suoli con densità eccessiva possono presentare problemi di limitata infiltrazione dell'acqua e scarsa ossigenazione, compromettendo lo sviluppo radicale e aumentando il rischio di ristagno idrico. Al contrario, suoli troppo sciolti possono favorire la lisciviazione dei nutrienti e ridurre la stabilità della struttura.

4.16 Contenuto di carbonio

Il contenuto di carbonio organico è un parametro chiave per valutare la fertilità e la qualità del suolo, influenzando ritenzione idrica, stabilità strutturale e disponibilità di nutrienti. La sua stima avviene tramite analisi dirette o valutazioni indirette basate su proprietà visive e chimiche. Un metodo diffuso, derivato da Blume et al. (2011), correla il colore del suolo secondo la scala Munsell alla percentuale di carbonio organico in funzione della tessitura.

VALUE MUNSELL	S	LS, SL, L	SIL, SI, SICL, CL, SCL, SC, SIC, C
≥ 6	< 0.2	< 0.2	< 0.2
5.5	< 0.2	< 0.2	0.2 - < 0.5
5	0.2 - < 0.5	0.2 - < 0.5	0.2 - < 0.5
4.5	0.2 - < 0.5	0.2 - < 0.5	0.2 - < 0.5
4	0.2 - < 0.5	0.2 - < 0.5	0.2 - < 1.0
3.5	0.2 - < 1.0	0.5 - < 1.0	0.5 - < 2.5
3	0.5 - < 2.5	1.0 - < 2.5	1.0 - < 5.0
2.5	1.0 - < 5.0	≥ 2.5	≥ 2.5
≤ 2	≥ 2.5		

La relazione tra colore del suolo e contenuto di carbonio è influenzata da diversi fattori, tra cui la mineralogia, la presenza di ossidi di ferro e le condizioni di umidità. I suoli ricchi di sostanza organica tendono ad avere una colorazione più scura a causa della capacità della materia organica di assorbire la luce, mentre nei suoli con elevata presenza di ossidi di ferro il colore può essere

influenzato da tonalità rossastre, indipendentemente dal contenuto organico. Per questo motivo, la stima del carbonio organico basata sul colore deve essere utilizzata con cautela, in particolare nei suoli con forte alterazione chimica o con una significativa componente minerale secondaria.

4.17 Presenza e distribuzione delle radici

La distribuzione delle radici nel suolo indica la capacità del profilo pedologico di sostenere la vegetazione. La loro abbondanza dipende da tessitura, struttura, caratteristiche chimico-fisiche del suolo e profondità esplorabile.

NUMERO \leq 2 MM	NUMERO $>$ 2 MM	CLASSE DI ABBONDANZA	CODICE
0	0	Assenti	N
1 - 5	1 - 2	Molto poche	V
6 - 10	3 - 5	Poche	F
11 - 20	6 - 10	Comuni	C
21 - 50	11 - 20	Molte	M
$>$ 50	$>$ 20	Abbondanti	A

Suoli con elevata densità radicale presentano generalmente maggiore porosità e capacità di assorbimento idrico e nutritivo, mentre una scarsa presenza di radici può indicare limitazioni strutturali o chimiche.

L'approfondimento radicale può essere ostacolato da fattori fisici, chimici e idrologici. La compattazione e la ridotta macroporosità limitano la penetrazione radicale, mentre la scarsità di ossigeno dovuta a saturazione idrica ne compromette lo sviluppo e l'assorbimento dei nutrienti. Ostacoli fisici, come orizzonti cementati o contatti litici, e squilibri chimici, tra cui eccesso di sodio o carenza di elementi essenziali, riducono la biomassa radicale.

4.18 Bioturbazione e attività biologiche

La bioturbazione è il processo di alterazione del suolo da parte degli organismi, che ne modificano struttura, porosità e dinamica dei nutrienti. L'attività biologica deriva da diverse classi faunistiche, tra cui mammiferi, uccelli, lombrichi e insetti, ciascuna con tracce specifiche identificabili in base a forma e funzione.

TIPO	CODICE
Attività di mammiferi	
Grandi gallerie aperte	MO
Grandi gallerie riempite (krotovinas)	MI
Attività degli uccelli	
Ossa, piume, ghiaia selezionata di dimensione simile	BA
Attività dei vermi	
Canali di lombrichi	WE
Escrementi di vermi	WC
Attività di insetti	
Canali e nidi di termiti	IT
Canali e nidi di formiche	IA
Attività di altri tipi di insetti	IO
Gallerie (non specifiche)	BU
Nessuna attività visibile di animali	NO

L'intensità della bioturbazione varia in funzione della densità e diversità della fauna, delle condizioni ambientali e delle proprietà fisico-chimiche del suolo. La quantità di tracce biologiche è classificata in base al volume occupato, da assente a abbondante. Una bioturbazione intensa è indicativa di suoli ben strutturati e fertili, sebbene alcune forme, come le gallerie profonde o i nidi di termiti, possano alterarne la stabilità meccanica, aumentando la permeabilità e favorendo l'infiltrazione idrica, ma anche il rischio di erosione.

4.19 Impatti antropici

L'attività umana altera la morfologia e le proprietà del suolo attraverso modificazioni dirette e indirette, che includono l'aggiunta di materiali, trasformazioni strutturali e variazioni chimico-fisiche. L'introduzione artificiale di materiali naturali, organici o minerali, con particelle superiori o inferiori a 2 mm, può migliorare la fertilità e la capacità di ritenzione idrica, ma anche alterare il bilancio idrico e la dinamica della sostanza organica, influenzando la qualità del suolo.

MATERIALE	CODICE
Organico	OR
Minerale > 2 mm	ML
Minerale ≤ 2 mm	MS
Nessuna aggiunta	NO

Le alterazioni in situ comprendono lavorazioni agricole, compattazione e rimodellamento del profilo pedologico. L'aratura modifica la struttura e la porosità, condizionando la circolazione dell'acqua e l'attività biologica. I suoli arati in passato ma non più disturbati da oltre cinque anni tendono a recuperare la struttura originaria, mentre quelli sottoposti a rimodellamenti intensivi mostrano variazioni significative nella distribuzione dei materiali e nella permeabilità. Il compattamento, derivante da azioni meccaniche o eccessivo calpestio, riduce la capacità del suolo di ospitare radici e organismi edafici, compromettendone fertilità e resistenza all'erosione.

TIPO	CODICE
Aratura annuale	PA
Aratura almeno una ogni 5 anni	PO
Arato in passato, non arato da >5 anni	PP
Arato genericamente	PU
Rimodellato (ad es. una singola aratura)	RM
Rastrellatura	LO
Compattamento non dovuto alla suola d'aratura	CP
Deterioramento della struttura non dovuta alla aratura o al rimodellamento	SD
Altro	OT
Nessuna alterazione in-situ	NO

L'analisi delle modificazioni antropiche è fondamentale per valutare l'impatto delle attività umane sul suolo e sviluppare strategie di gestione sostenibile. L'uso intensivo di macchinari pesanti compromette nel tempo la struttura e la funzionalità del suolo, mentre pratiche conservative ne favoriscono la rigenerazione.

4.20 Natura del substrato

La natura del substrato è un fattore determinante nella caratterizzazione pedologica, influenzando la formazione del suolo, la disponibilità di nutrienti e le proprietà fisiche che ne regolano la capacità di sostenere la vegetazione. L'osservazione diretta avviene nel profilo pedologico o in aree adiacenti, mentre in alcuni casi si ricorre a dati cartografici e geologici per una descrizione più dettagliata.

La **classificazione del substrato** distingue tra materiali consolidati e non consolidati, adottando codifiche specifiche per i diversi litotipi.

CLASSE PRINCIPALE	GRUPPO	CODICE	TIPO	CODICE
Rocce Ignee	Ignee Felsiche	IF	Granito	IF1
			Quarzodiorite	IF2
			Granodiorite	IF3
			Diorite	IF4
			Riolite	IF5
	Ignee Intermedie	II	Andesite, trachite, fonolite	II1
			Diorite-sienite	II2
	Ignee Mafiche	IM	Gabbro	IM1
			Basalto	IM2
			Diabase (Dolerite)	IM3
	Ignee Ultramafiche	IU	Peridotite	IU1
			Pirosenite	IU2
			Serpentinite	IU3
	Piroclastiche	IP	Tufo, tufite	IP1
			Scorie o brecce vulcaniche	IP2
			Ceneri vulcaniche	IP3
			Ignimbrite	IP4
Rocce Metamorfiche	Metamorfiche Felsiche	MF	Quarzite	MF1
			Gneiss, migmatite	MF2

CLASSE PRINCIPALE	GRUPPO	CODICE	TIPO	CODICE
			Ardesie, filladi (rocce pelitiche)	MF3
			Scisti	MF4
	Metamorfiche Mafiche	MM	Ardesie, filladi (rocce pelitiche)	MM1
			Scisti Verdi	MM2
			Gneiss ricchi in minerali Fe-Mg	MM3
			Calcari metamorfici (marmi)	MM4
			Anfibolite	MM5
			Eclogite	MM6
	Metamorfiche Ultramafiche	MU	Serpentine, pietre verdi	MU1
Rocce sedimentarie	Sedimenti Clastici	SC	Conglomerati, breccia	SC1
			Arenarie, grovacche, arcose	SC2
			Siltiti, argilliti, mudstone	SC3
			Shale, Argilloscisti	SC4
			Ironstone	SC5
	Carbonatiche, organiche	SO	Calcari e altre rocce carbonatiche	SO1
			Marne e altre varie mescolanze	SO2
			Carboni, bitumi e relative rocce	SO3
	Evaporiti	SE	Anidrite, gesso	SE1
			Alite (salgemma)	SE2

Oltre alla classificazione del materiale parentale, è essenziale valutare il grado di **decomposizione degli strati organici** nei suoli con orizzonti Oa, caratterizzati da un accumulo significativo di sostanza

organica. La decomposizione è determinata in base alla frammentazione del materiale: gli strati che si rompono in pezzi longitudinali con spigoli vivi sono poco decomposti, quelli con spigoli smussati indicano una trasformazione più avanzata, mentre i materiali friabili o polverosi rappresentano il massimo livello di decomposizione.

CRITERIO	TIPO	CODICE
Si rompe in pezzi longitudinali a spigoli vivi	A spigoli vivi	SE
Si rompe in pezzi longitudinali a spigoli smussati	Compatto	CO
Si rompe in pezzi friabili o in forma polverosa	Friabile	CR

La presenza di **residui vegetali morti**, tra cui legno e fibre di muschi o altre piante, fornisce ulteriori indicazioni sullo stato evolutivo del substrato organico, fino all'assenza totale di resti visibili.

TIPO DI RESTO VEGETALE	CODICE
Legno	W
Fibre di muschi	S
Altre piante	O
Nessun resto di piante morte	N

Il substrato può contenere **concentrazioni minerali e chimiche** di varia natura, la cui analisi è essenziale per comprendere i processi di accumulo e alterazione del suolo. Tali concentrazioni vengono valutate in termini di abbondanza, composizione e stato fisico, distinguendo tra formazioni primarie e secondarie.

Le tipologie di accumulo includono: cristalli, singoli o in gruppi, riconoscibili per la loro forma ben definita; noduli, aggregati separabili con contorni distinti ma privi di organizzazione interna; concrezioni, strutture simmetriche che si sviluppano attorno a un punto, una linea o un piano.

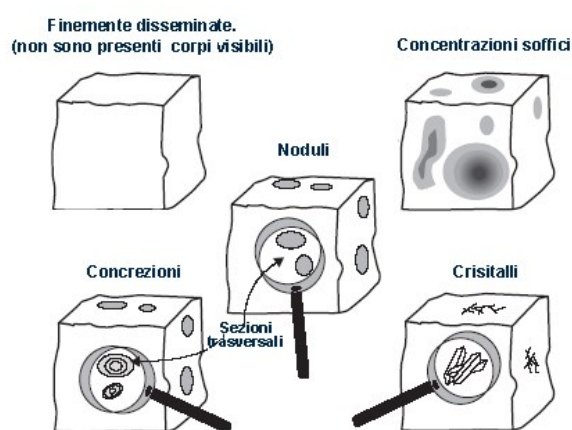


Figura 4 - Concentrazioni nel suolo (Shoeneberger et al., 2002, modificata).

Ulteriori categorie comprendono: concentrazioni soffici, prive di bordi definiti e non separabili dal suolo; formazioni pendenti, tipicamente costituite da carbonato di calcio in strutture allungate sulla superficie inferiore dei frammenti scheletrici. Tra le strutture di particolare interesse vi sono i geoidi, noti come "occhi di civetta", e le croste superficiali,

strati induriti derivanti dall'accumulo di sali attraverso il movimento ascensionale delle soluzioni circolanti. La composizione delle concentrazioni varia in funzione dei processi chimici e fisici che hanno interessato il suolo, con accumuli di carbonato di calcio, gesso, ferro, ferro-manganese, cloruro di sodio, ossidi e idrossidi di varia natura, sostanza organica combinata con ferro e alluminio, e silice. L'identificazione e la classificazione di queste concentrazioni forniscono informazioni fondamentali sui processi di mobilizzazione e deposizione dei minerali nel profilo pedologico e sul grado di evoluzione del substrato.

COMPOSIZIONE	CRISTALLI	NODULI	CONCREZ IONI	CONC. SOFFICI	PENDENTI	CROSTE	GEOIDI
Non identificata	1	2	3	4	5	6	
Carbonato di calcio	11	12	13	14	15	16	17
Gessosa	21	22	23	24			
Ferrosa		32	33	34		36	37
Ferro- manganesifera		42	43	44		46	
Cloruro di sodio	51	52	53	54			
Altri ossidi e idrossidi		62	63	64		66	
Sostanza organica, ferro e alluminio				74			
Silice		82	83				87



Figura 5 - Concrezione di carbonato di calcio



Figura 6 - Concrezioni ferro manganesifere

L'abbondanza delle concentrazioni nel suolo è espressa in percentuale volumetrica e suddivisa in cinque categorie. La loro distribuzione nel profilo fornisce informazioni sulla storia pedogenetica, sulle condizioni di drenaggio e sui processi di ossidazione-riduzione che ne influenzano lo sviluppo.

CLASSE (%)	DESCRIZIONE
0	Assenti
0,1-2,0	Poche
2,1-20,0	Comuni
20,1-40,0	Abbondanti
>40,0	Molto abbondanti

Le dimensioni delle concentrazioni variano da estremamente piccole (<2 mm) a molto grandi (>76 mm) e sono indicative dell'intensità dei processi di accumulo e delle condizioni geochimiche che ne hanno determinato la formazione.

CLASSE (MM)	DESCRIZIONE
<2,0	Estremamente piccole
2,1-5,0	Molto piccole
5,1-20,0	Piccole
20,1-76,0	Media
>76,0	Grandi

La **tessitura**, parametro chiave nella caratterizzazione del suolo, è definita dalla percentuale in peso delle particelle con diametro inferiore a 2 mm e segue la classificazione della tassonomia americana (Soil Survey Staff, 2006), che distingue il suolo in classi granulometriche basate sulla distribuzione di argilla, limo e sabbia. Specifiche categorie sono previste per suoli con proprietà andiche o ricchi di vetri vulcanici, pomici e ceneri, caratterizzati da peculiari proprietà fisiche e chimiche.

PARTICELLA	CLASSE (MM)
Argilla	<0,002
Limo	0,002-0,050
Sabbia molto fine	0,050-0,100

PARTICELLA	CLASSE (MM)
Sabbia fine	0,100-0,250
Sabbia media	0,250-0,500
Sabbia grossolana	0,500-1,0
Sabbia molto grossolana	1,0-2,0

La stima della tessitura in campo, basata sul test tattile, consente al pedologo di identificare la distribuzione granulometrica con una precisione inferiore al 5% rispetto alle analisi di laboratorio. Tuttavia, la percezione della tessitura può essere influenzata dalla composizione minerale: minerali argillosi espandibili conferiscono maggiore plasticità, mentre ossidi di ferro aumentano la coesione anche con basse percentuali di argilla. Oltre alla granulometria, l'analisi del substrato include la valutazione della composizione mineralogica e chimica, della stabilità strutturale e delle condizioni di drenaggio.

La **profondità effettivamente esplorabile dalle radici** è determinata dallo spessore degli orizzonti fino a un livello con radicabilità inferiore al 30%. Essa varia in funzione della presenza di strati impenetrabili, quali rocce consolidate, sedimenti compattati, densipan, fragipan, duripan, orizzonti petrocalcici, petrogipsici, petroferrici, placici e zone con falda permanente. La classificazione distingue cinque classi di profondità; questa suddivisione consente di valutare le limitazioni del substrato alla crescita radicale e alla produttività vegetale.

DESCRIZIONE	CLASSE (CM)
Molto scarsa	<25
Scarsa	25-50
Moderatamente elevata	50-100
Elevata	100-150
Molto elevata	>150

L'impedenza idraulica del suolo è correlata alla qualità del drenaggio, influenzando la durata dei periodi di saturazione. La conducibilità idraulica degli orizzonti, la profondità della falda e la morfologia del terreno determinano il comportamento idrologico del suolo, classificabile in sette categorie. I suoli eccessivamente drenati presentano conducibilità idraulica molto elevata e scarsa capacità di ritenzione idrica, mentre quelli ben drenati e moderatamente ben drenati offrono un equilibrio tra infiltrazione e ritenzione. I suoli imperfettamente drenati mostrano segni di saturazione temporanea, mentre quelli scarsamente o molto mal drenati subiscono ristagni prolungati che ostacolano lo sviluppo radicale e la funzionalità biologica. La valutazione del drenaggio interno si

basa sull'osservazione della profondità degli orizzonti idromorfi e delle caratteristiche redoximorfiche, indicatori della saturazione idrica. L'interazione tra profondità radicale e impedenza idraulica determina le condizioni di crescita della vegetazione e le funzioni ecologiche del suolo.

CODICE	DRENAGGIO INTERNO	DISPONIBILITÀ DI OSSIGENO	DESCRIZIONE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO
1	Eccessivamente drenato	Buona	Questi suoli hanno una conducibilità idraulica alta (da 10 a 100 $\mu\text{m s}^{-1}$) e molto alta ($>100 \mu\text{m s}^{-1}$) e un basso valore d'acqua utilizzabile (AWC bassa o molto bassa, $<100 \text{ mm}$). Non sono adatti alle colture a meno che non vengano irrigati. Sono suoli privi di screziature redox.
2	Piuttosto eccessivamente drenato	Buona	Questi suoli hanno un'alta conducibilità idraulica (da 10 a 100 $\mu\text{m s}^{-1}$) ed un più alto valore d'acqua utilizzabile (AWC bassa o moderata, $>50 \text{ mm}$, ma $<150 \text{ mm}$). Senza irrigazione possono essere coltivate solo un ristretto numero di piante e con basse produzioni. Sono suoli privi di screziature.
3	Ben drenato	Buona	Questi suoli trattengono una quantità ottimale di acqua (AWC elevata o molto elevata, $>150 \text{ mm}$), l'acqua è rimossa dal suolo prontamente, e non vi sono limitazioni di umidità alla germinazione e crescita delle piante eccetto su umidità limitanti per il loro sviluppo. Sono suoli di solito privi di screziature nella zona radicale.
4	Moderatamente ben drenato	Moderata	Questi suoli sono abbastanza umidi durante il periodo di crescita delle piante e possono presentare limitazioni alla crescita e alle operazioni d'impianto e raccolta delle colture mesofile, a meno che non venga realizzato un drenaggio artificiale. Presentano talvolta screziature nei primi orizzonti del profilo in conseguenza alla presenza temporanea di acqua nel primo metro, con apporti d'acqua per infiltrazione e non per risalita della falda freatica. Hanno un'ossidazione o desodorizzazione di suoli (da 4-5%) nelle zone naturalmente ossidate.

CODICE	DRENAGGIO INTERNO	DISPONIBILITÀ DI OSSIGENO	DESCRIZIONE DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO
5	Piuttosto mal drenato	Imperfetta	Questi suoli sono abbastanza umidi durante il periodo di crescita delle piante e possono presentare limitazioni alle operazioni d'impianto, di raccolta o di crescita delle colture mesofile, a meno che non venga realizzato un drenaggio artificiale. Presentano screziature nei primi orizzonti del profilo in conseguenza alla presenza temporanea di acqua nel profilo, un apporto d'acqua nel profilo per infiltrazione o anche dalla risalita della falda freatica. Hanno un'ossidazione o desodorizzazione di suoli (da 6-10%) nelle zone naturalmente ossidate.
6	Mal drenato	Scarsa	Questi suoli sono saturi d'acqua per un lungo periodo nel corso dell'anno, eccetto che in estate quando la falda può abbassarsi a causa della forte evapotraspirazione. Presentano un orizzonte in cui vi è il ristagno di acqua che può essere sempre saturo, ad un orizzonte con segni di accumulo di sostanza organica o di riduzione ferro-manganese, e possono avere gleyzzazione permanente.
7	Molto mal drenato	Molto scarsa	Questi suoli sono umidi o vicini in superficie per la maggior parte del tempo. Sono abbastanza umidi da impedire la crescita d'importanti colture (ad eccezione del riso), a meno che non venga realizzato un drenaggio artificiale. Generalmente hanno screziature con frequenza ≥ 2 abbondanti fin dalla superficie del suolo.

La **designazione degli orizzonti e degli strati del suolo** è essenziale per classificare e descrivere i profili pedologici, indicando la genesi e l'evoluzione dei materiali. I simboli sono assegnati secondo le linee guida FAO, basandosi su osservazioni di campo e analisi di laboratorio per distinguere orizzonti con caratteristiche diagnostiche. Anche se i processi di formazione possono essersi arrestati, la loro identificazione resta fondamentale per comprendere la stratigrafia del suolo.

La designazione si articola in tre livelli: simboli principali, suffissi e numero primo FAO. I simboli principali descrivono la natura dominante dell'orizzonte, distinguendo orizzonti organici, eluviali, illuviali e di alterazione primaria. I suffissi aggiungono dettagli sui processi pedogenetici, come accumuli di argilla, sostanza organica, carbonati o gesso.