



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE**

**DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE**

**CORSO DI LAUREA IN**

**SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE**

**Valutazione della suscettibilità di frana della  
regione Friuli-Venezia Giulia**

**Relatore:** Prof. Ascanio Rosi

**Laureando:** Riccardo Patuzzo

**Nr. Matricola:** 2023017

Anno Accademico 2022/2023

# Indice

<i>Abstract</i> .....	2
<i>Introduzione</i> .....	3
<i>Area di studio</i> .....	5
<i>Inquadramento geologico</i> .....	6
<i>Materiali e metodi</i> .....	8
Mappe in input.....	8
Preparazione dati .....	15
Random Forest.....	16
<i>Risultati</i> .....	17
Mappa della suscettibilità .....	17
Validazione del modello .....	18
<i>Discussione</i> .....	23
<i>Bibliografia</i> .....	25

# Abstract

Lo scopo di questo lavoro di tesi è la creazione di una mappa per la valutazione della suscettibilità di frana per la regione Friuli-Venezia Giulia tramite analisi integrata di dati geologici e morfologici della zona. L'analisi è gestita ed elaborata tramite l'utilizzo del software QGIS, un software di tipo GIS (Geographic Information System) open-source, che permette l'analisi spaziale di dati e la creazione di mappe tematiche per temi spazialmente distribuiti.

I dati ottenuti tramite analisi GIS sono stati analizzati tramite il modello di Machine Learning "Random Forest" e suddivisi in un set di training per l'addestramento del modello e un set di test per validare il modello stesso. Tramite questo modello matematico è possibile avere un algoritmo preciso e addestrabile che riesce a gestire una mole importante di dati mantenendo una buona efficienza statistica, previa attenta selezione dei parametri variabili.

Infine, il risultato sarà una mappa tematica in cui saranno rappresentate aree con una maggiore o una minore suscettibilità di frana della zona considerata.

# Introduzione

Quando si parla dell'Italia e dei disastri naturali, non si pensa che essa sia tra le cinque nazioni dell'Europa con il rischio di disastri da eventi naturali più alto (Azzimonti et al, 2019). In particolare, risalta il rischio geo-idrologico riguardante le frane, eventi responsabili di quasi il 37% delle vite perse a causa di tutti i disastri naturali che sono avvenuti nel territorio italiano (Aleotti e Chowdhury, 1999). Questo ha portato ad un interesse crescente negli anni nel cercare di prevedere e stimare quando un evento franoso possa verificarsi, in che condizioni, dove, con quale frequenza e con che intensità, per cercare di salvaguardare i beni fisici, sociali, economici ed ambientali da eventuali danni. Un occhio particolare è stato dato alla creazione di mappe della pericolosità per ogni zona per un evento franoso, così da poterne valutare il rischio di frana in base alle caratteristiche del territorio.

Si deve andare così a definire il significato di pericolosità, vulnerabilità ed elementi a rischio: per pericolosità si intende la probabilità di accadimento di un dato evento in un dato intervallo di tempo in una data area. La vulnerabilità è il grado di perdita su un determinato elemento esposto ad un evento naturale e gli elementi a rischio sono intese tutte quelle entità del territorio, come popolazione, edifici, infrastrutture, aree agricole, che subiscono interferenza da un evento naturale, anche senza subire danno. Può essere inteso anche come il valore degli elementi esposti al rischio. Questi tre parametri vengono poi messi in correlazione tra di loro fornendo il rischio totale, che è definito come le perdite attese, ossia una misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo (Frigerio et al, 2019). Dal prodotto di pericolosità e vulnerabilità, si ottiene invece il rischio specifico.

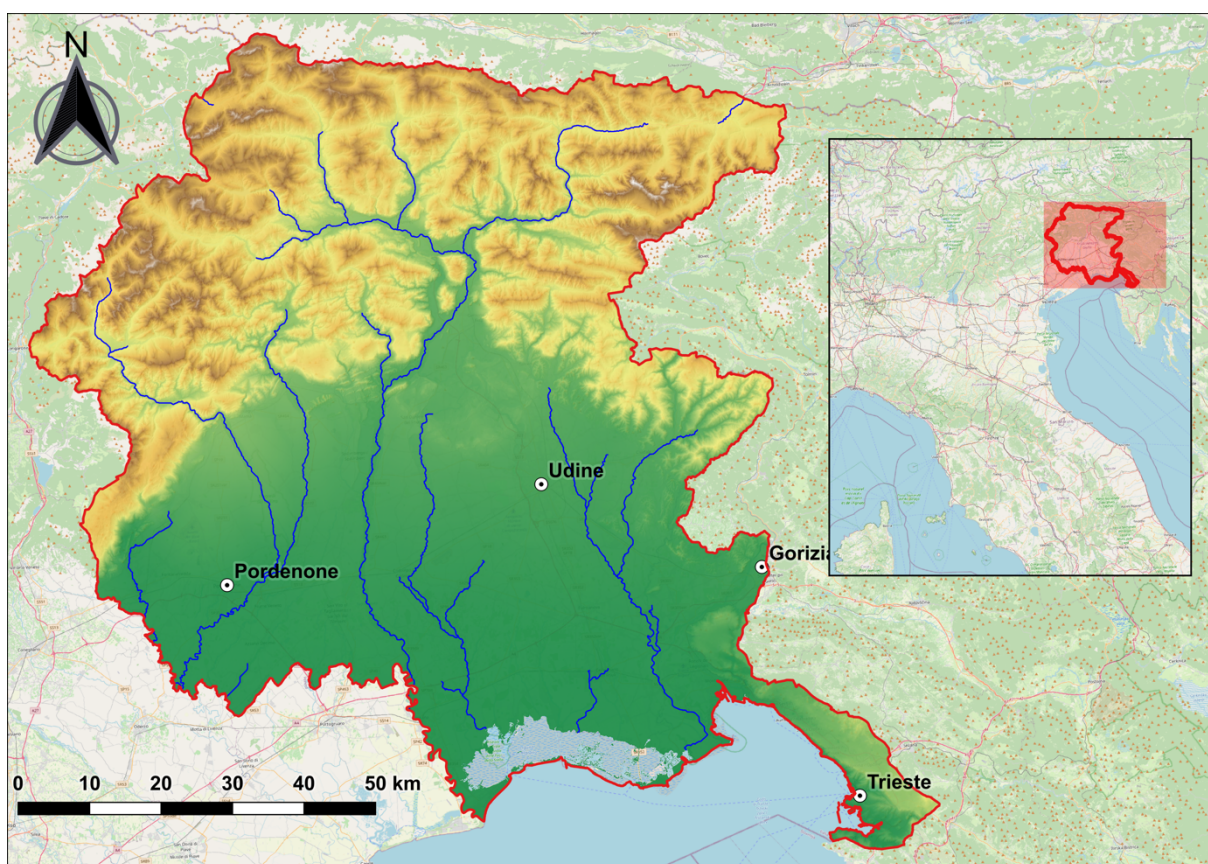
Il rischio ambientale può essere descritto attraverso la seguente formula:

$$R = H \times V \times E$$

Dove  $H$  rappresenta *hazard*, ovvero la pericolosità,  $V$  rappresenta la vulnerabilità e  $E$  rappresente gli elementi a rischio (Azzimonti et al, 2019; Van Westen et al, 2006). Questa equazione permette di utilizzare la definizione di rischio per la valutazione della probabilità spaziale e temporale per un dato fenomeno con una determinata intensità. Però, quello che si è osservato è che la determinazione della probabilità di accadimento per eventi eccezionali è molto complessa e dipende dalla precisione e dall'accuratezza dei dati forniti all'inizio dell'indagine (Floris et al, 2011). Questo dà molta importanza all'analisi della pericolosità, in particolare per le frane, la quale cerca di fornire indicazioni circa lo spazio, l'intensità e il tempo di avvenimento di un determinato evento franoso. La mappatura della suscettibilità, ovvero la predisposizione di un territorio ad essere soggetto al fenomeno preso in esame, permette di definire la pericolosità spaziale di un fenomeno. Quest'ultimo concetto è importante per lo svolgimento del seguente lavoro di tesi dato dal fatto che si propone nel creare la mappa della suscettibilità di frana della regione Friuli-Venezia Giulia utilizzando dati geologici, geomorfologici e idrologici per mappare le aree in cui c'è più possibilità che un evento franoso possa avvenire.

# Area di studio

L'area di studio è il territorio della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia (Figura 1), collocata nella porzione più occidentale del nord Italia. Si presenta confinata a nord dall'Austria, ad ovest dalla Regione Veneto, a sud è bagnata dal Mare Adriatico e a est è in convivenza con la Slovenia. È una regione piuttosto piccola se confrontata con le altre regioni dell'Italia, vantando di una superficie territoriale di soli 7856,48 km<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Regione Friuli-Venezia Giulia.

Andando ad osservare il territorio per fasce altimetriche, esso è occupato per un 42,5% da una fascia montana, il 19,3% da una fascia collinare e il rimanente 38,2% da pianura (Carulli, 2006).

# Inquadramento geologico

Sulla porzione di territorio friulano sono state identificate diverse unità orografiche, aventi ciascuna le proprie caratteristiche geografiche e geologiche che le contraddistinguono le une dalle altre (Carulli, 2006):

- 1) La Catena Carnica, che con uno sviluppo che va da Est verso Ovest, collega la zona friulana del Cadore, condivisa in parte con il Veneto, con la zona del Tarvisiano. Questa unità è prevalentemente e maggiormente composta da roccia paleozoici.
- 2) Le Alpi carniche Meridionali, toccano la Catena Carnica in posizione basale e unendosi con la porzione dell'alto corso del Tagliamento. Essa è costituita da formazioni mesozoiche, con composizione predominante di unità medio-triassiche.
- 3) Le Alpi Giulie, in posizione mediale rispetto alla precedente, presentano una caratteristica estensione delle piattaforme carbonatiche ladino-carniche e nordiche, facente parti di un dominio di rocce triassiche.
- 4) Le Prealpi Giulie, facciata del sistema di Alpi omonimo, presenta successioni mesozoiche con proprietà non costanti nello spazio, con un grado superiore di espansione delle unità silicoclastiche eoceniche e mancanza di depositi di molassa neogenica.
- 5) L'Anfiteatro Glaciale, fa da cornice alla zona di uscita dalla valle del Tagliamento, è ripartito superficialmente da depositi discendenti dalla regressione e successione del ghiacciaio würmiano.
- 6) La Pianura Friulana, prolungamento della Pianura Padana e bagnata alla base dal Mare Adriatico, presenta una zona di risorgiva nella porzione mediale. Essa pone una marcata

divisione tra i depositi alluvionali a granulometria grossolana presenti nell'alta pianura, i depositi sabbiosi-limosi e limoso-argillosi della bassa pianura.

- 7) Il Carso, con la propria porzione italiana limitata rispetto a quello che è il vero altopiano roccioso costituito da calcari di piattaforma cretacici e paleocenici con un sottile strato di rivestimento costituito da flysch eocenico.

Nel territorio si vanno ad elevare tre massicci: la Catena Paleocarnica, le Alpi Meridionali e quello delle Dinaridi Esterne, ciascuno con propri peculiari processi di orogenesi che ne descrivono intervalli temporali di formazione diversi.

Nella descrizione dei rilievi regionali, la forza dominante sono una successione di terreni rappresentativi di 450 milioni di anni, supportati da strati longitudinali sempre più giovani verso la porzione meridionale che evidenziano preponderanza di rocce sedimentarie, principalmente di natura carbonatica, ed episodi vulcanici che creano sporadiche comparse di rocce magmatiche (Carulli, 2006).



# Materiali e metodi

## Mappe in input

La creazione della mappa di suscettibilità ha previsto una prima fase di ricerca dei dati in *input* e una fase successiva di manipolazione degli stessi in software QGIS, nella versione 3.28 LTR (*Long Term Release*).

I dati utilizzati sono stati selezionati perché visti come i fattori che più influenzano la formazione degli eventi franosi nell'area. Tali dati sono delle mappe tematiche che formano i livelli informativi di *input* nelle procedure di analisi (Rago et al, 2016). In ambiente GIS, esse sono costituite da dei dati georiferiti di tipo raster, ovvero rappresentati come una matrice dove ciascuna coordinata x, y della matrice rappresenta un dato.

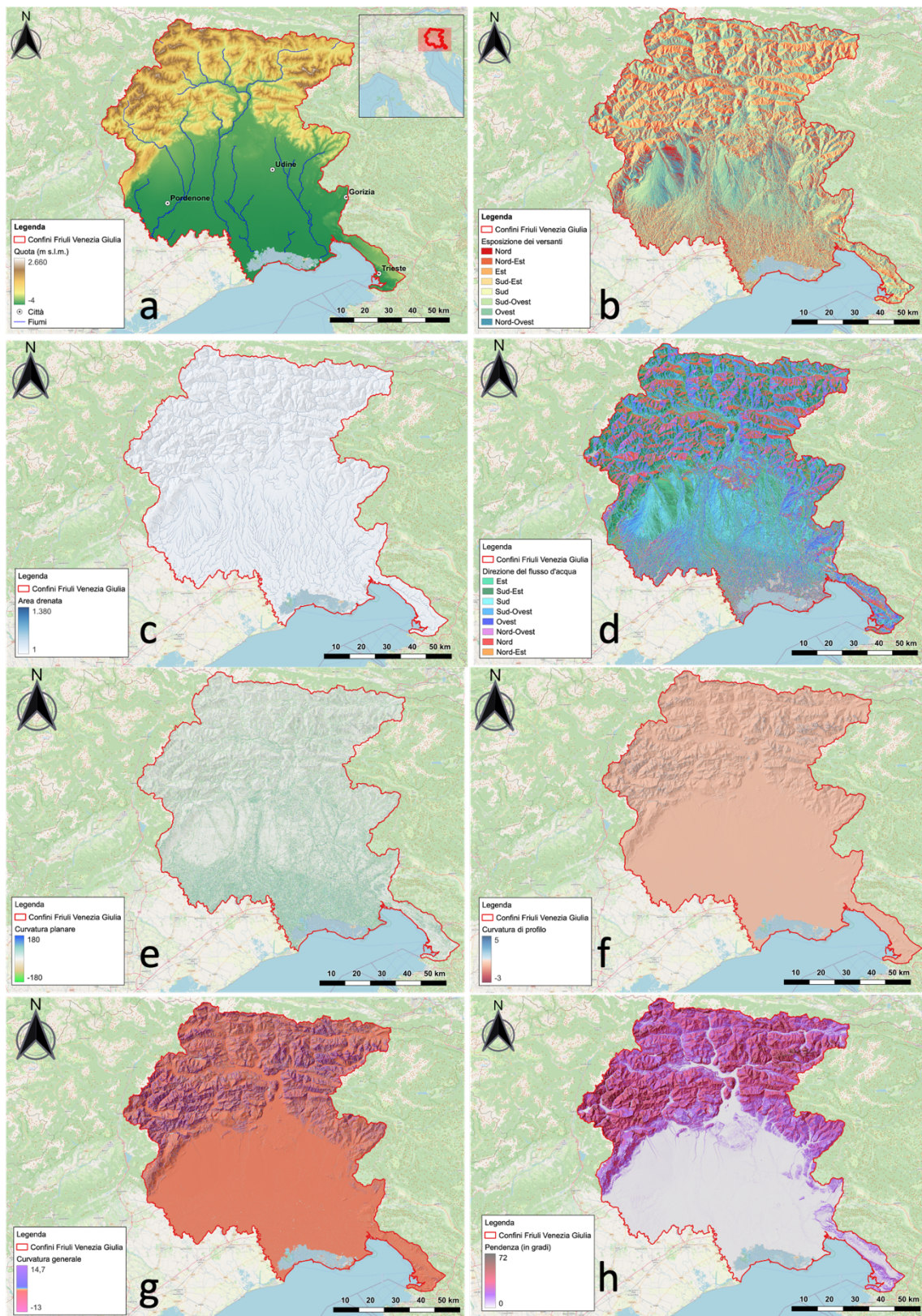
Le mappe utilizzate sono:

- Modello digitale di elevazione del terreno (Figura 2a), in inglese *Digital Elevation Model* (DEM), è una matrice ordinata di numeri che rappresenta la distribuzione spaziale di elevazione campionate in punti discreti del paesaggio. In particolare, si è utilizzato il modello di elevazione digitale denominato TINITALY (Tarquini et al, 2023), nella sua versione più recente, con una risoluzione spaziale di 10 m.
- Esposizione dei versanti (Figura 2b), rappresenta l'orientazione dei versanti rispetto nord geografico. Versanti orientati in direzione diversa, acquisiscono differenti quantità di energia solare, alterando le proprie condizioni chimico-fisiche e di copertura vegetale, influenzando l'instabilità del versante.
- Area drenata (Figura 2c), indica quanta acqua viene ad essere convogliata all'interno di ogni cella (ovvero di ogni unità di terreno). Maggiore è la quantità di acqua, maggiore è

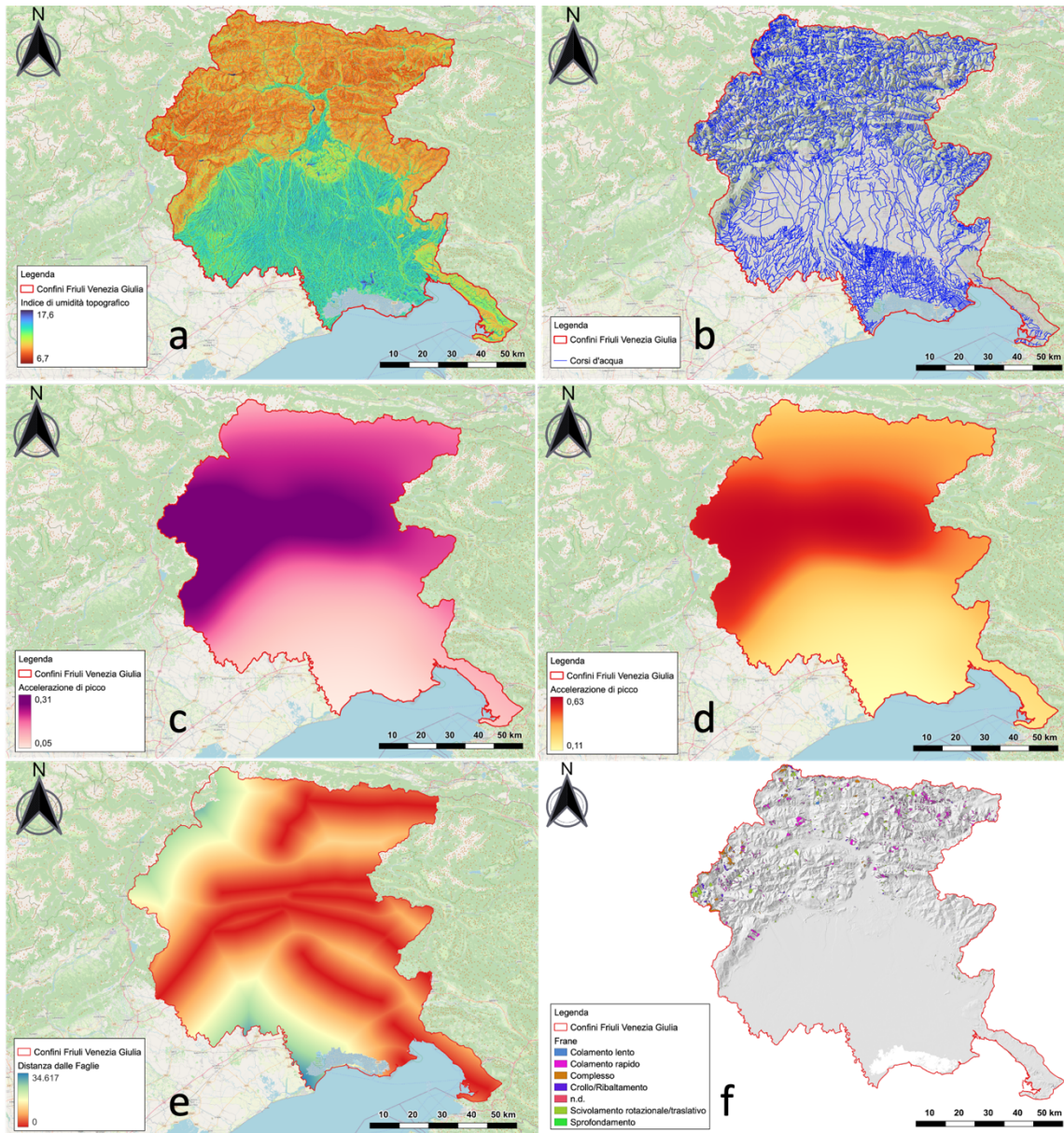
il grado di saturazione del materiale e minori sono le resistenze che il materiale stesso offre agli sforzi esterni.

- Direzione del flusso d'acqua (Figura 2d), rappresenta in che direzione si muove l'acqua ruscellante sulla superficie topografica. Essa, in base alla quota della cella considerata, si muoverà sempre in direzione del massimo dislivello.
- Curvatura planare (Figura 2e), indica l'intersezione della superficie topografica con un piano verticale tangente alle curve di livello. Essa interessa il flusso dell'acqua che, in base alla forma del versante, può portare o alla convergenza o divergenza del flusso.
- Curvatura di profilo (Figura 2f), indica l'intersezione della superficie topografica con un piano verticale perpendicolare alle curve di livello. Un versante può avere o un profilo convesso o concavo, con differenti distribuzioni delle pendenze.
- Curvatura generale (Figura 2g), è la sommatoria delle informazioni ottenute dalla curvatura planare e di profilo.
- Pendenza (Figura 2h), indica l'acclività del versante in gradi. L'acclività di un versante tende a condizionare la formazione di eventi franosi.
- Indice di umidità topografico (Figura 3a), indica la distribuzione spaziale del contenuto di acqua nel suolo e la presenza di zone di saturazione superficiali considerando l'estensione della porzione di versante drenata e l'acclività (Tarquini et al, 2023).
- Reticolo idrografico (Figura 3b), rappresentante di tutti i corsi d'acqua presenti nella zona di studio. Maggiore è la vicinanza ad un corpo idrico, maggiore è il grado di saturazione del terreno limitrofo e quindi minori resistenze agli sforzi.
- L'accelerazione di picco del terreno (Figura 3c, d), ovvero l'accelerazione massima del terreno, in particolare quella orizzontale che si verifica in caso di terremoto, espressa come multipli dell'accelerazione di gravità (Leyendecker et al, 1995). Nel caso preso in esame, viene valutata considerando un tempo di ritorno di 2475 anni e 475 anni.

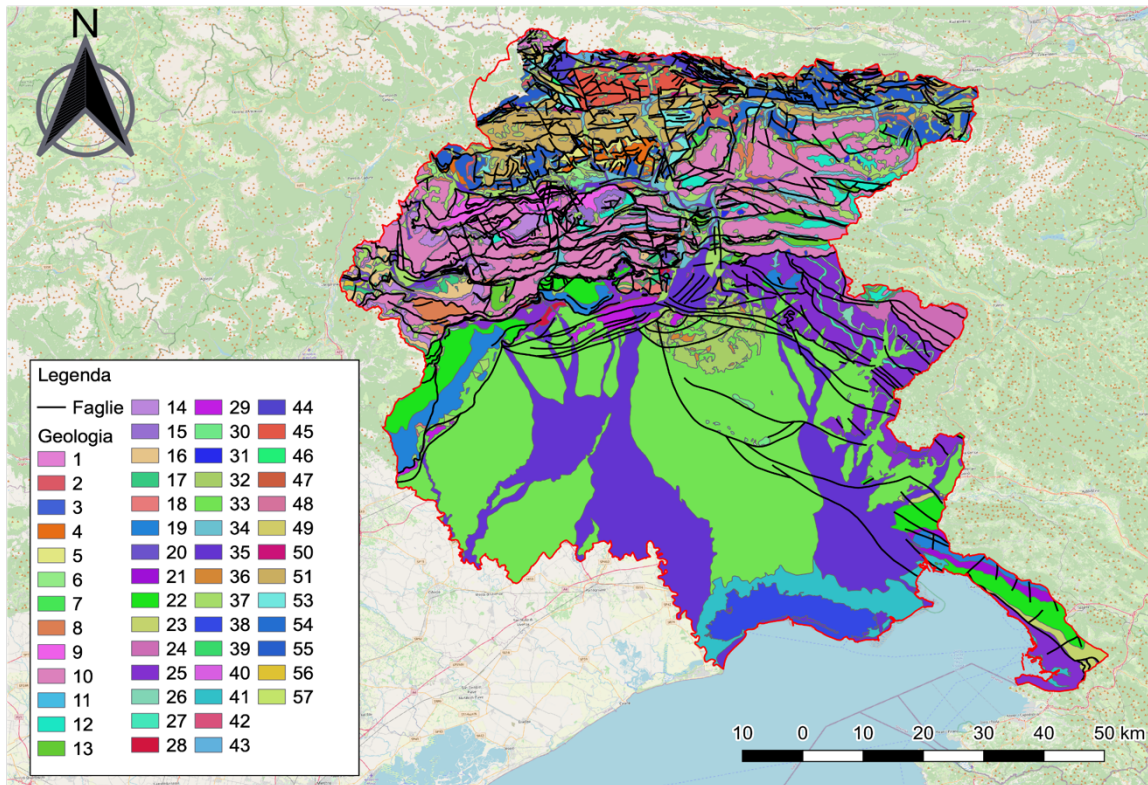
- Distanza delle faglie (Figura 3e), definita per ogni punto del territorio. Le faglie sono delle superfici di discontinuità che derivano da movimenti di tettonica; il loro movimento può generare scosse sismiche in grado di dare origine a movimenti di massa sui versanti.
- Mappa inventario delle frane (Figura 3f), la quale descrive la distribuzione delle frane nell'area di studio.
- Geologia (Figura 4), rappresentante le diverse unità geologiche presenti nell'area. Diversi materiali presentano caratteristiche meccaniche differenti, che influenzano la resistenza all'evento franoso in modo diverso.
- Uso del suolo (Figura 5), rappresenta come il territorio dell'area di studio viene utilizzato e il tipo di copertura presente.



**Figura 2.** a) Modello digitale di elevazione del terreno; b) Esposizione; c) Area drenata; d) Direzione del flusso d'acqua; e) Curvatura planare; f) Curvatura di profilo; g) Curvatura generale; h) Inclinazione.

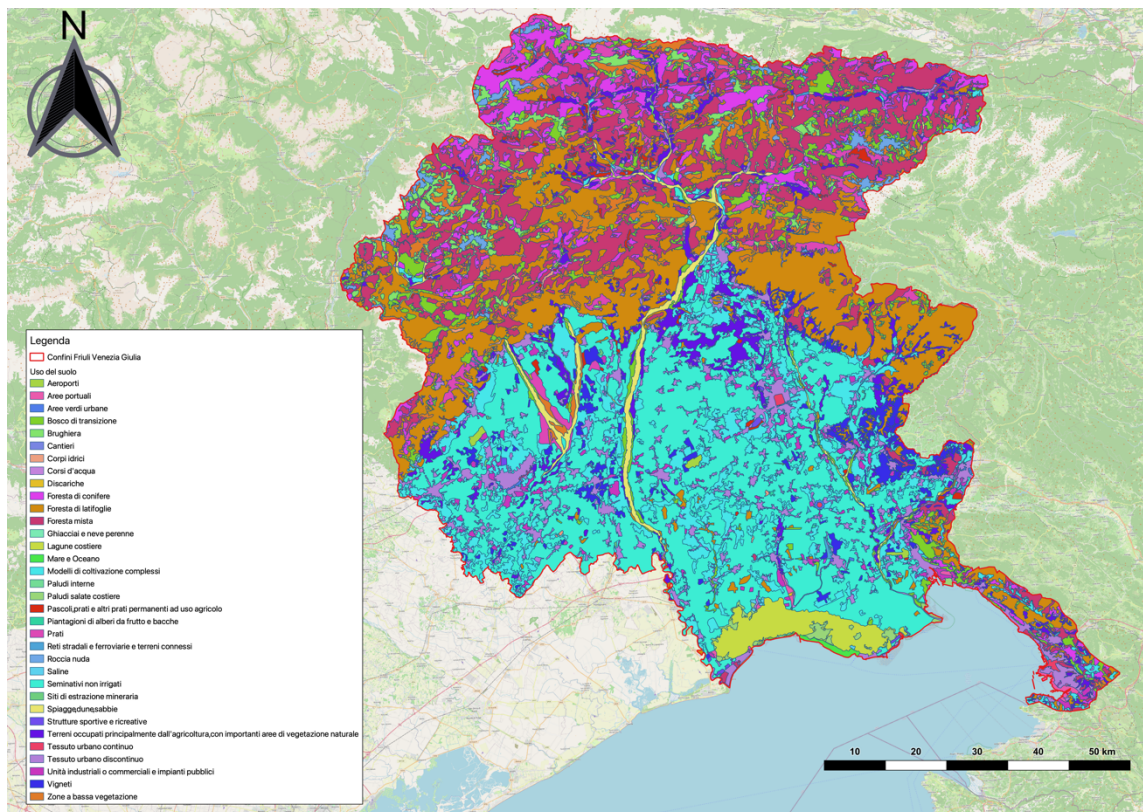


**Figura 3.** a) Indice di umidità topografico; b) Corsi d'acqua; c) Accelerazione di picco 475; d) Accelerazione di picco 2475; e) Distanza dalle faglie; f) Inventario delle frane.



- Legenda**
- |                 |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|
| — Faglie        | 14 | 29 | 44 |
| <b>Geologia</b> | 15 | 30 | 45 |
| 1               | 16 | 31 | 46 |
| 2               | 17 | 32 | 47 |
| 3               | 18 | 33 | 48 |
| 4               | 19 | 34 | 49 |
| 5               | 20 | 35 | 50 |
| 6               | 21 | 36 | 51 |
| 7               | 22 | 37 | 53 |
| 8               | 23 | 38 | 54 |
| 9               | 24 | 39 | 55 |
| 10              | 25 | 40 | 56 |
| 11              | 26 | 41 | 57 |
| 12              | 27 | 42 |    |
| 13              | 28 | 43 |    |
- Accumulo di frana recente
  - Accumulo di paleofrana
  - Alternanze pelitico-arenacee ben stratificate con calciruditi e calcareniti talora in potenti banchi carbonatici (Flysch del Griva; Flysch di Claut); alternanze di areniti e/o siltiti con marne calcareo-silicee a clasti di quarzo e selce (Flysch di Cor)
  - Alternanze pelitico-arenacee ben stratificate con calciruditi e calcareniti talora in potenti banchi carbonatici (Flysch del Griva; Megastrato del M. Ioanaz)
  - Alternanze pelitico-arenacee ben stratificate con calciruditi e calcareniti talora in potenti banchi carbonatici (Flysch del Griva; Megastrato di Vernasso)
  - Aree di bonifica e di riporto artificiale
  - Arenarie violente e argille silose varicolori; dolomie e calcari dolomitici ben stratificati (Fm. di Darrenstein)
  - Areniti feldspatiche in strati cm-dm, alternate a peliti grigie e verdi (arenarie di M. Terzo); argilliti rosse e verdi anchimetamorfiche inglobanti le vulcaniti 4c (Fm. del Diman)
  - Areniti quarzose e peliti grigio scure torbidiache in strati cm-dm, localmente in facies anchimetamorfica e, specie alla base, breccie e conglomerati a clasti radioliaritici o calcare, con inglobati livelli di keratofiti e rari grossi olistoliti carbonati
  - Argilliti a graptoliti e rare radioliariti di grigio scure a nere, marne calcaree, calcari micritici nodulari e ferruginosi rossastri ad Orthoceratidi alternati a rare biospittiti (Fm. del Cocco)
  - Biocalcarenti e biomicrititi algali a foraminiferi alternate a peliti marnose in strati dm (Fm. a Pseudoschwagerina inf., Fm. a Pseudoschwagerina sup.); peliti grigie e rosse alternate ad areniti quarzoso-miacciee in banchi e sporadici conglomerati quarzosi
  - Breccie calcaree, megabreccie e conglomerati (Breccia di Peonis); calcareniti grossolane, siltiti e arenarie grigie con resti vegetali, pettiniti, ostreidi, gasteropodi; locali livelli conglomeratici a ciottoli carbonatici, selciferi e metamorfici (Arenaria)
  - Breccie con clasti dolomitici, massicci, di colore grigio; dolomie grigio chiare e grigio scure, compatte con laminazioni nerastre (scisti di Comeno), dolomie nere saccaroidi; lenti e orizzonti di breccie e calcari dal rosso mattono al giallastro; calcari
  - Calcari bioclastici biancastri, massicci con abbondanti rudiste, talora con intercalazioni di calcari micritici (Calcari di M. Cavallo, Calcareniti del Molassa, Calcari di Aurisina, Fm. dei Calcari del Carso triestino p.p., Calcari di Monte San Michele)
  - Calcari e dolomie grigio scuri, con selce e livelli marnosi cm; breccie dolomitiche alla base o in corpi irregolari all'interno (Fm. di Sovrezene); encrinite rossastre (encrinite di Fanes); calcari micritici e marnosi varicolori, nodulari, in strati dm co
  - Calcari grigi e nocciola a stratificazione metrica o indistinta molto fossiliferi (Calcari a Miliolidi, Calcari a Nummuliti ed Alveoline, Mb. di M.te Grisa e Opicina, Liburnico: Vrems e Cosina); breccie carbonatiche e marne debolmente arenacee con numm
  - Calcari massicci di scogliera ricchi di faune. Talora, alla sommità, tasche bauxitiche (Calcari di Polcenigo, Calcari ad Ellipsactinie)
  - Calcari micritici grigio chiari in banchi metrici, calcari algali (calcare massiccio del M. Coglians, calcari a Pentamerus, Stribogcephalus, Amphipora) con crinoidi, stromatopodi, tetracoraliti e tabulati
  - Calcari massicci e calcareniti in strati dm, con abbondante selce policroma (Fm. di Fonzaaso); calcari nodulari da grigio-verdastri a rossastri, con selce rossa e ammoniti (Rosso Ammonitico); calcari micritici nocciola e grigio chiari, a frattura conoid
  - Calcari micritici grigi alternati a calcari stromatolitici spesso dolomitizzati, in strati dm e banchi organizzati in cicli peritidali; calcari oolitici biancastri e calcari a oncoidi (Calcari Grigi del Friuli, Calcare di Stolaz, Calcari a Crinoidi)
  - Calcari micritici grigio chiari a megadolomiti in strati m alternati a calcari stromatolitici in strati dm, organizzati in cicli peritidali (Calcari del Dachstein)
  - Calcari micritici nerastri in strati dm, rari livelli marnosi cm, frequenti slumps (Calcare di Chiampomano)
  - Calcari oolitici (Orizz. di Tesoro); calcari grigi talora marnosi, in strati cm-dm, intercalati a marne (Mb. di Mazzin); dolomie e calcari dolomitici giallo-ocraee sottilmente stratificati (Orizz. di Andraz); micriti grigie e nocciola, spesso laminata,
  - Calcari oolitico-bioclastici in strati da dm a m, alternati a calcari micritici a lamellibranchi pelagici con rari noduli di selce alla base (Calcare del Vajont)
  - Calcari rossi ad Ammoniti (Calcari del Clapsavon), calcari marnosi, argilliti e tuffi (Fm. dell'Acquatona), calcari nodulari selciferi, arenarie e siltiti tufacee (Fm. di Buchenstein o di Livinalongo), depositi terrigeno-tuffitici e proclastici (Fm. di
  - Calcari scuri ben stratificati alternati a marne in strati sottili con rare areniti tufacee verdi; alla base sporadiche lenti di carbone (Fm. della Val Degano)
  - Calcari scuri con frequenti bioclasti dati da foraminiferi, gasteropodi, lamellibranchi e alghe, in strati netti dm talora intercalati a sottili livelli marnosi (Fm. a Bellerophon)
  - Calcari stratificati dm-m, biancastri, grigi e nocciola, di aspetto porcellanaceo, con frequenti strutture di emersione, talora con breccie, argille residuali e stromatoliti (Calcare del Cellina, Mb. di M.te Coste, Calcari di S. Dona)
  - Calcisiltiti grigio-nerastre con banchi di breccia ed areniti più frequenti nella parte superiore (Membro di Drenchia, Flysch di Uccia); calcareniti con breccie e calcilutiti (Flysch di Clodig, Flysch di M. Brieka); alternanze arenaceo-pelittiche, con sp
  - Calcisiltiti, calcareniti e micriti da grigio scure a nere in strati dm parzialmente dolomitizzati, biomicriti nodulari in strati sottili con interstrati marnosi rosso cupo o gialli e grigi (Rosso Goniatico), calcareniti e calcisiltiti grigie e grigio-
  - Conglomerati alluvionali poligenici ed eterometrici ad abbondante matrice e cemento carbonatico (Conglomerato del Tagliamento ed altri depositi del Supersistema del Friuli)
  - Conglomerati polimictici in strati dm-m alternati ad areniti litiche e peliti grigio scure e giallastre (Fm. del Bombaso); areniti quarzoso-miacciee e peliti grigio scure alternate a biocalcarenti ad alghe e fusuline in strati dm e a conglomerati quarzosi
  - Depositi morenici del settore montano e dell'anfiteatro morenico del Tagliamento
  - Detriti di falda antichi
  - Detriti di falda recenti ed attuali
  - Dolomirriti e doloreniti grigio scure fittamente stratificate e laminata, selcifere alla base, con livelli pelitici bituminosi (Dolomia di Forni)
  - Dolomie chiare, cristalline, in strati m e dolomie stromatolitiche in strati dm organizzate in cicli peritidali (Dolomia Principale); localmente, al tetto dell'unità breccie dolomitiche
  - Dolomie e calcari dolomitici biancastri, compatti, in banchi mal stratificati (dolomia, del Serla sup., Dolomia del Popera); dolomie e calcari dolomitici nettamente stratificati, sovente vucoalari o brecciatati, (dolomia del Serla inf., Membro dell'Arven)
  - Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta (Fm. del Contrin, Calcari dolomitici del M. Tiarfin, Dolomia dello Sciliar o Schlern, Dolomia ladino-carnica, Dolomia Cassiana)
  - Dolomie e calcari scuri ricchi di fossili (Calcare del Predil); calcari e marne (Fm. di Rio del Lago), calcari dolomitici (Calcare di Rio Conzen) e dolomie grigie (Fm. di Tor; globalmente Fm. di Raibl)
  - Dolomie grigie da massicce a stratificate dm, con intercalazioni marnose (Fm. del Monticello)
  - Dolomie marnose grigie, dolomie chiare vacuolari e livelli marnosi cm; breccie dolomitiche, in alternanze dm-m; gessi saccaroidi, da bianchi a grigi e rossati, ricchi di impurità argillose, spesso in lamine mm-ritmiche
  - Gessi saccaroidi biancastri e laminati, alternati a dolomie nere spesso brecciate (Fm. a Bellerophon)
  - Ialoclastiti, diabasi e lave basaltiche, talora a pillow lava, tuffi (Fm. del Diman)
  - Intercalazioni di dolomie laminata scure, ricche in sostanza organica, in strati dm (Laminita di rio Resartico)
  - Marne e calcari marnosi rossastri e grigi a frattura scagliosa, debolmente nodulari, a stratificazione cm-dm; locale presenza di breccie e di olistoliti carbonatici (Scaglia rossa, selcifera e variegata). Talora, alla base, breccie calcaree in bancate mass
  - Marne siliose grigie a bivalvi (Marna di Tarzo, Marne di S. Dona); alternanze di areniti e siltiti grigie a gasteropodi (Arenaria di Vittorio Veneto); conglomerati poligenici ed eterometrici prevalenti, siltiti ed arenarie (Conglomerato del Montello)
  - Metarenite e metapeliti grigio verdastre (Fm. di Fleams e Fm. della Val Visdende) con intercalazioni di metaruditi (Conglomerato di Cima Vallona); metacalcari massicci e metacalcari dolomitici listati, rossi, giallastri, bruni o verdastri; marni massic
  - Ruditi rossastre con clasti in prevalenza carbonatici (Breccia di Tarvisio) o quarzoso-litici (Conglomerato di Sesto) in strati dm e banchi m; areniti fini in strati dm alternate a peliti rosse con caliche (Arenaria di Val Gardena)
  - Ruditi terrigene (Conglomerato di Piz da Peres, di Voltago, del Rio Senata, di Richthofen, Breccia di Ugovizza s.l.), calcari grigio scuri nodulari, alternati a marne (Calcare di Morbiate); biomicriti, marne e siltiti (Fm. di Dont); calcari marnosi nodula
  - Sedimenti alluvionali del settore montano e dell'anfiteatro morenico del Tagliamento
  - Sedimenti alluvionali del settore montano, della pianura e litoranei
  - Sedimenti del settore marino e lagunare
  - Sedimenti fluvioglaciali ed alluvionali dell'alta pianura friulana
  - Sedimenti palustri e lacustri, talora torbosi
  - Siltiti ed arenarie quarzose grigio-verdastre prevalenti in strati cm-dm, talora con intercalazioni di conglomerati e calcareniti e limitati spessori di calcari micritici nodulari con rilegature argillitiche ocracee e calcareniti molto fossilifere (Fm. d
  - Vulcaniti basiche nerastre e grigio-verdastre (Ialoclastiti del M. Femazza) e acide perlopiù rossastre (Vulcaniti di Riofreddo)

Figura 4. Geologia dell'area di studio.



**Figura 5.** Uso del suolo dell'area di studio.

## Preparazione dati

Come indicato in precedenza, il DEM di partenza aveva una risoluzione di 10 m, tuttavia, secondo il lavoro di Catani et al (2013), i migliori risultati nella mappatura della suscettibilità si ottengono con una risoluzione di 50 m. Il DEM iniziale è stato quindi ricampionato a 50 m e tutte le mappe derivate sono state estratte con la medesima risoluzione.

Successivamente, è stata vettorializzata la mappa del modello digitale di elevazione del terreno, ovvero si è passati da un file di tipo raster ad un file di tipo vettoriale, dove i singoli dati spazialmente distribuiti all'interno di una matrice, vengono ad essere rappresentati da dei punti con associati degli attributi, sotto forma di tabella, i quali possono essere più di uno.

La rappresentazione dell'area di studio è passata da molteplici *files* dove ogni pixel ha soltanto un attributo, ad un singolo *file* contenete un insieme di punti, dove ogni punto ha attributi che rappresentano i dati di ogni mappa descritta precedentemente.

Questo processo è importante perché la valutazione di suscettibilità richiede l'estrazione della tabella degli attributi ed elaborazione dei dati presenti, sotto forma numerica, in MATLAB attraverso il modello di *Machine Learning* denominato "*Random Forest*".



## Random Forest

Il modello di *machine learning* utilizzato è l'algoritmo "*Random Forest*" (RF, Breiman, 2001), uno dei metodi più validi e utilizzati per l'analisi della suscettibilità (Goetz et al, 2015). Esso si basa sulla tecnica del *Bagging* (abbreviazione di *bootstrap-aggregating*) che genera alberi decisionali da un set di dati training per poi validarne il migliore su un altro set di dati. La sua notorietà è dovuta alla sua efficienza come metodo di classificazione e regressione generale, seguita da una elevata precisione e potenzialità di trattare sia campioni di dati di piccole dimensioni sia una popolazione di dati elevata, con conseguente capacità applicativa negli eventi pratici (Biau e Scornet, 2016). I risultati possono essere verificati tramite l'uso della curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) e determinazione dell'area corrispondente sotto la curva (Area Under the Curve - AUC). Inoltre, la veridicità dei risultati può essere valutata anche tramite matrice di confusione.

I dati che si sono utilizzati per l'algoritmo sono i punti che all'interno del *file* vettoriale risultavano nelle aree di frane e altrettanti punti che non risultavano all'interno di esse. Non sono stati considerati i punti presenti in un areale di estensione 100 m intorno all'area di frana, per tenere in considerazione la possibile presenza di incertezze nella perimetrazione della frana, anche collegata alla media risoluzione spaziale utilizzata.

La totalità dei dati è stata successivamente divisa in due set, uno contenente il 70 % dei dati per l'addestramento del RF, l'altro, contenente il 30% dei dati, per la sua validazione. Ciascun set conteneva lo stesso numero di punti associati e non associati a frane.

# Risultati

## Mappa della suscettibilità

Osservando la mappa (Figura 6) è facile notare come le zone di pianura abbiano, giustamente, bassi valori di suscettibilità (indicata dal colore verde). Nelle zone collinari e montuose si nota un aumento della suscettibilità, passando dal giallo al rosso, con i valori più alti in corrispondenza delle frane preesistenti e delle aree dei versanti maggiormente acclivi.

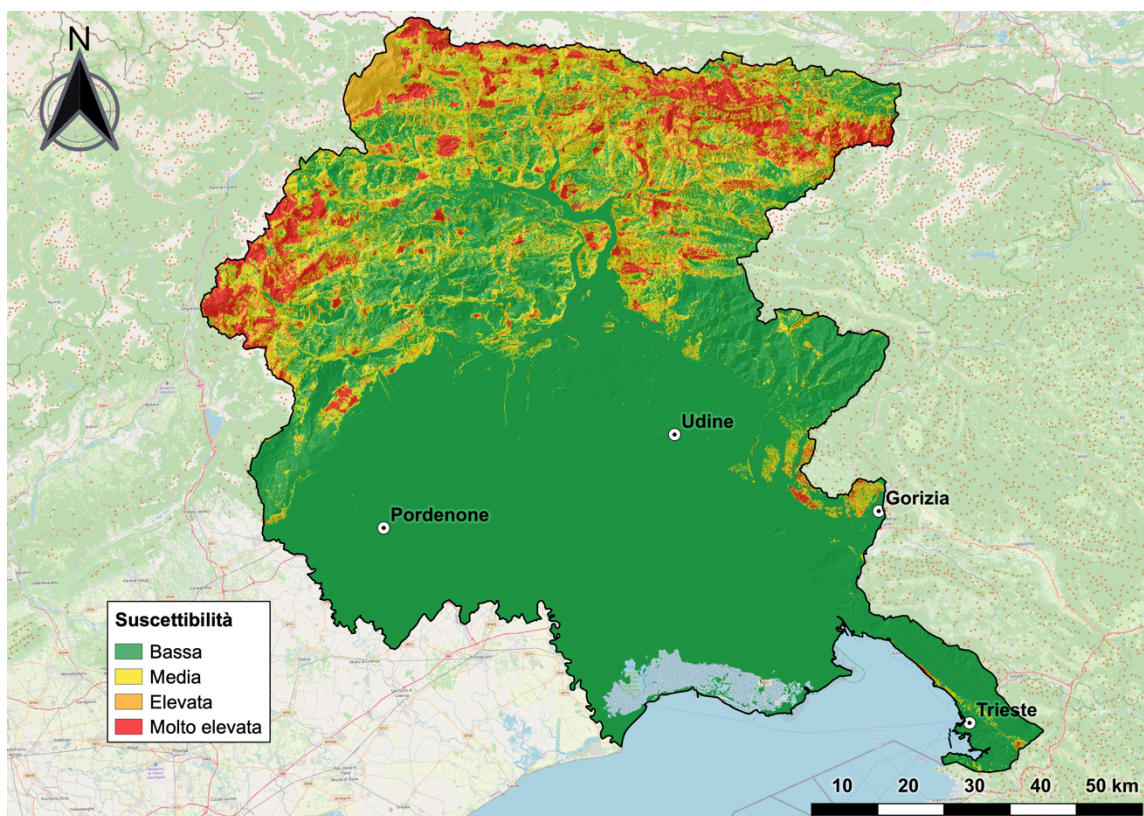
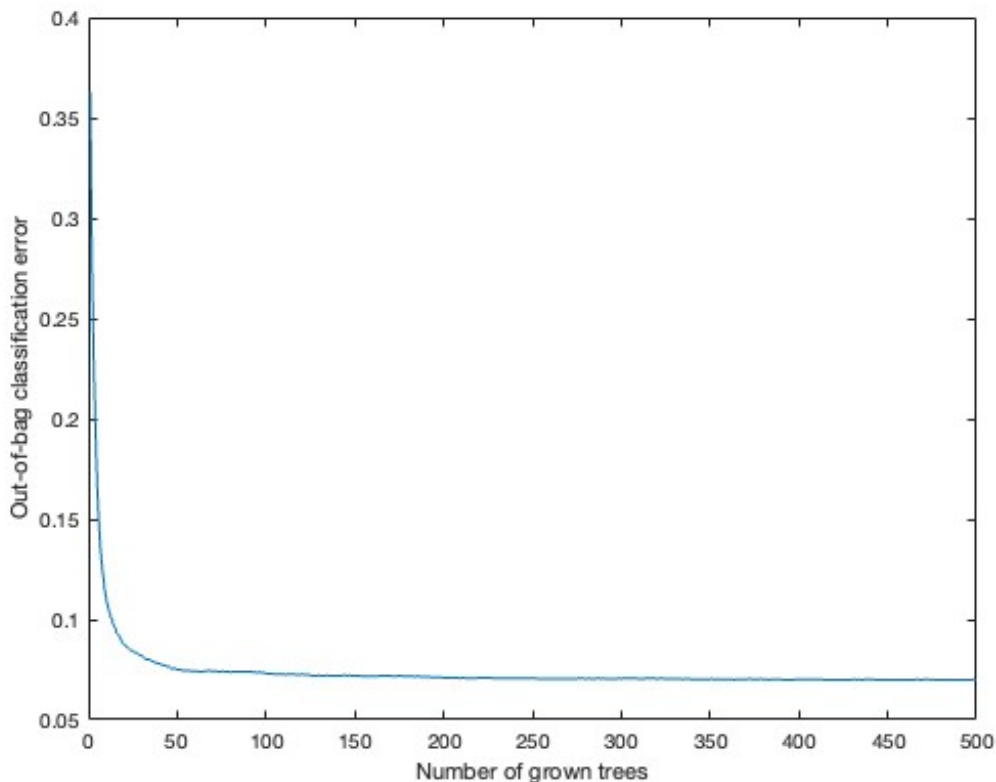


Figure 6 Mappa della suscettibilità.

## Validazione del modello

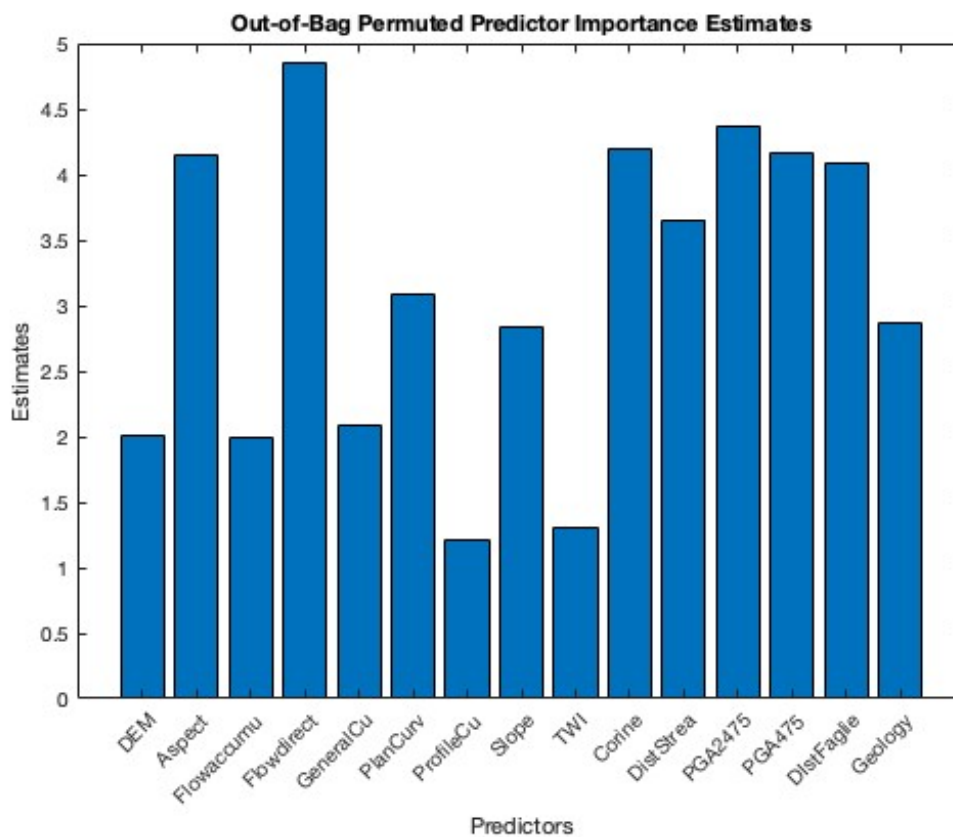
Attraverso il codice impiegato, il modello è in grado di restituire dei grafici che permettono la auto-validazione del modello.

Nel seguente grafico (Figura 7) si osserva la relazione tra l'errore di classificazione che commette il modello rispetto al numero di alberi creati, quindi la differenza tra il risultato ottenuto e il risultato atteso. Utilizzando pochi alberi, il risultato ottenuto si discosta molto dal risultato atteso e l'errore è alto. Aumentando il numero di alberi, e quindi la complessità del modello, l'errore cala perché il modello impara come i dati sono correlati, trovando la migliore relazione tra di loro, minimizzando l'errore. Per questo lavoro è stato utilizzato un modello con 500 alberi.



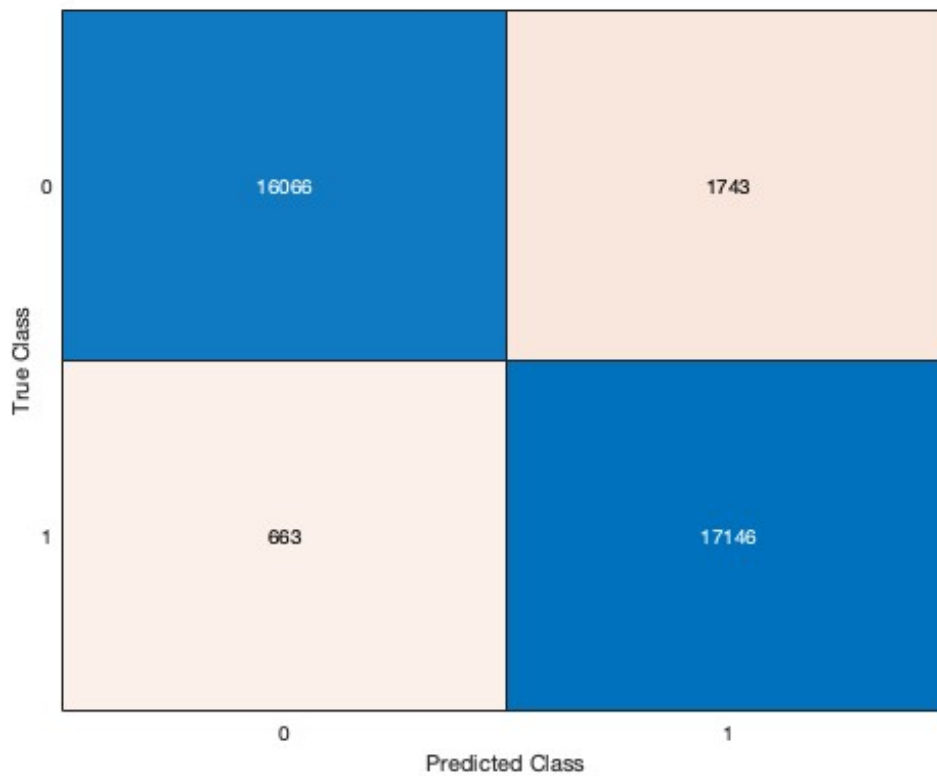
**Figure 7.** Grafico dell'errore degli alberi.

Il grafico riportato in figura 8 è utile per visualizzare l'influenza delle variabili considerati nella predisposizione a frana del territorio. Quello che si osserva è che la direzione del flusso è una componente molto importante nel determinare la suscettibilità, seguita dall'esposizione dei versanti insieme alla curvatura di profilo. Inoltre, si osserva che l'uso del suolo e l'accelerazione di picco del terreno hanno una buona influenza nella determinazione della suscettibilità. La curvatura di profilo e l'indice di umidità topografica sono stati poco influenti nel processo.



**Figure 8.** Grafico dell'importanza delle variabili.

La matrice di confusione (Figura 9) permette di avere una indicazione dell'accuratezza del modello applicato a campione indipendente (di test) per dimostrare se la regola imparata sui dati per addestrare il modello possa essere generalizzabile ad altri campioni di dati. Osservando questo, ci consente di definire se il modello è in grado di prevedere correttamente l'assenza e presenza di frane. In particolare, il modello ha permesso di identificare 17146 veri positivi, 16066 veri negativi, 663 falsi negativi e 1743 falsi positivi.



**Figure 9.** Matrice di confusione.

Successivamente sono stati calcolati i seguenti tre indici statistici per verificare i risultati della matrice di confusione (Figura 9):

- La sensibilità ( $Se$ ) è la capacità del modello di classificare i veri positivi. È il rapporto tra i veri positivi e la totalità dei positivi. Il modello ha una sensibilità del 0,96, quindi significa che ha correttamente identificato il 96% delle frane del campione di test.

$$Se = \frac{TP}{(TP + FN)}$$

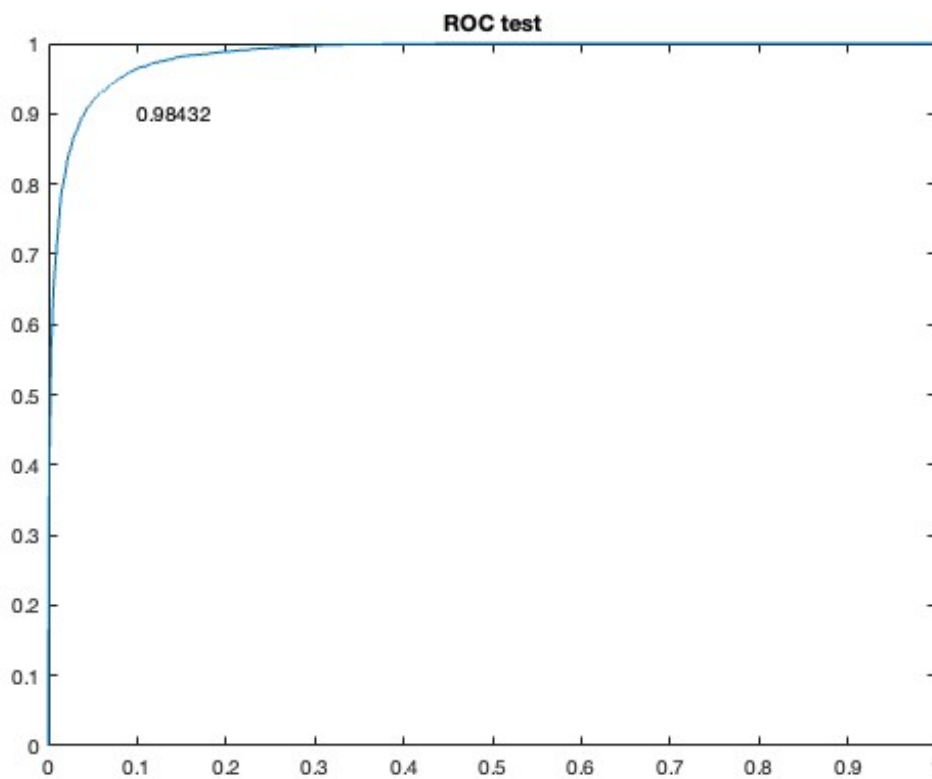
- La specificità ( $Sp$ ) la capacità del modello di classificare i punti di non di frana. È il rapporto tra i veri negativi e la totalità dei negativi. Il modello ha specificità pari a 0,9, quindi significa che il 90% dei punti di non frana sono stati correttamente classificati.

$$Sp = \frac{TN}{(TN + FP)}$$

- L'efficienza ( $E$ ) rappresenta il numero di classificazioni giuste sul numero totale. Il modello ha una efficienza del 0,93, quindi il modello ha classificato in modo corretto il 93% delle frane del campione indipendente.

$$E = \frac{(TP + TN)}{(TP + FP + TN + FN)}$$

Attraverso il ROC test (Figura 10) si permette di valutare l'accuratezza del modello, osservando il valore di AUC. Il valore di 0,98 indica che il modello è molto performante.



**Figure 10.** Curva del ROC test

# Discussione

La creazione della mappa della suscettibilità di frana si presta bene per andare a definire quelle zone che richiedono una particolare attenzione dal punto di vista organizzativo per la regione. Il modello è stato efficiente, riuscendo a definire bene le zone a suscettibilità elevata rispetto a quelle a bassa suscettibilità.

Il modello presenta comunque dei limiti, dove la propria efficienza dipende molto dalla numerosità e dalla qualità dei dati in input. Fornire un numero limitato di dati può compromettere la qualità del modello e dei risultati. Nel caso preso in esame, il metodo si è applicato considerando tutte le frane presenti, senza distinzione

Un lavoro più approfondito si sarebbe potuto fare classificando le frane in base al tipo di movimento e al tipo di materiale costituente. Nel momento in cui si fosse effettuato una distinzione nella tipologia delle frane, si sarebbero potute produrre più mappe specifiche per ogni classe, andando a creare una migliore valutazione della suscettibilità.

Un fattore che non si è considerato all'interno di questo studio e che potrebbe portare ad una migliore valutazione della suscettibilità sono le precipitazioni, che rappresentano il fattore scatenante più comune riguardo gli eventi franosi. L'integrazione di una mappa della distribuzione delle piogge gioverebbe ad una migliore valutazione della suscettibilità, dato dal fatto che zone più soggette a precipitazione avranno una maggiore suscettibilità al crearsi di fenomeni franosi rispetto a zone meno soggette. Inoltre, nelle zone più soggette a precipitazioni, necessitano di una maggiore intensità delle piogge per portare alla formazione di un evento franoso, rispetto a zone dove la piovosità è scarsa, dove basta una precipitazione minore per scatenare una frana.



Alla base dell'accuratezza del modello e quindi la valutazione della suscettibilità, è presente l'accuratezza e la precisione dei dati in input, in particolare la precisione della mappa inventario delle frane. Essendo le frane degli eventi naturali pericolosi di meso scala, il lavoro di generazione della mappa inventario può essere difficile e tedioso, dato dal fatto che esse necessitano di essere mappate una ad una. Generalmente il lavoro è affidato a degli enti pubblici, i quali effettuano i lavori di mappatura solamente nelle aree di interesse, portando alla realizzazione di mappe inventario incomplete in parte (Van Westen et al, 2006). Questo influenza molto il lavoro della valutazione della suscettibilità perché mancanza di dati porta a una errata valutazione della suscettibilità della zona, con conseguenze a scala regionale.

## Bibliografia

- Aleotti P., Chowdhury R. 1999. «Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives.» *Bull Eng Geol Env*, 58 21-44.
- Azzimonti O. L., Colleoni M., De Amicis M., Frigerio I. 2019. «Vulnerabilità sociale e rischi ambientali. I risultati di una ricerca nella regione Lombardia.» *L'apporto della Geografia tra rivoluzioni e riforme. Atti del XXXII Congresso Geografico Italiano* 1215-1223.
- Biau G., Scornet E. 2016. «A random forest guided tour. TEST 25.» 19 Aprile.  
<https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>.
- Breiman, L. 2001. «Random Forests.» In *Machine Learning*, di Robert E. Schapire, 5–32. Statistics Department, University of California, Berkeley: Kluwer Academic Publishers.
- Carulli G. 2006. «Note illustrative della carta geologica del Friuli Venezia Giulia.»
- Catani F., Lagomarsino D., Segoni S. e Tofani V. 2013. «Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues.» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11) 2815-2831.
- Floris M., Iafelice M., Squarzoni C., Zorzi L., De Agostini A., Genevois R. 2011. «Using online databases for landslide susceptibility assessment: an example from the Veneto Region (northeastern Italy).» *Natural Hazards and Earth System Science* 1915-1925.
- Frigerio I., Mugnano S., Mattavelli M., De Amicis M. 2019. «Interazione spaziale tra vulnerabilità sociale e pericolosità sismica per la valutazione di scenari di rischio integrato .» *Atti del XXXII Congresso Geografico Italiano* 1207-1213.
- Goetz J. N., Brenning A., Petschkoc H. e Leopold P. 2015. «Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling.» *Computers & Geosciences, Volume 81* 1-11.
- Leyendecker E. V., Perkins D. M., Algermissen S. T., Thenhaus P. C., Hanson S.L. 1995. «USGS spectral response maps and their relationship with seismic design forces in building codes.» *United States Geological Survey*. 1 Gennaio .  
<https://doi.org/10.3133/ofr95596>.
- Rago V., Conforti M., Caloiero P., Iovine G., Terranova O., Muto F., Pascale S., 2016. «Problematiche di valutazione della suscettibilità da frana. L'esempio del bacino del torrente Turbolo (Calabria settentrionale).» *Geologi Marche*, 57 4-44.
- Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A., Dotta G. 2023. *TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.1)*.  
<https://doi.org/10.13127/tinality/1.1>.
- Van Westen C.J., Asch Th.W.J., Soeters, R. 2006. «Landslide hazard and risk zonation-why is it so difficult? Bull Eng Geol Environ.» *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 65. 167-184.