

CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA QUANTITATIVA DEL TERRITORIO ITALIANO TRAMITE WAVELET

M. De Agostino^a, P. Claps^b

^a Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell' Ambiente e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino – mattia.deagostino@polito.it

^b Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino – pierluigi.claps@polito.it

KEY WORDS: DEM, Trasformata Wavelet Multirisoluzione, Classificazione, Morfologia, Idrologia

RIASSUNTO

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di fornire una rappresentazione quantitativa della morfologia dell'intero territorio italiano, al fine di consentirne la suddivisione in classi morfologiche, da usare ad esempio per caratterizzare le forme dominanti di un insieme di bacini idrografici di rilevanza nazionale. Tale classificazione in termini quantitativi delle forme del territorio è stata resa possibile mediante l'utilizzo di strumenti di analisi dei segnali, ed in particolar modo della Trasformata Wavelet Multirisoluzione, applicati al modello digitale del terreno. Il risultato finale della procedura è costituito dalla divisione del territorio italiano in dieci regioni morfologiche distinte, ottenute mediante l'impiego di un DEM con risoluzione spaziale di 250 metri. Tale risultato è stato confrontato con alcuni precedenti lavori di classificazione del territorio italiano, oltre che con le tradizionali caratterizzazioni geomorfologiche, ottenendo interessanti riscontri tra i prodotti finali.

ABSTRACT

The objective of this study is to produce an unsupervised quantitative characterization of terrain morphology for large areas, based only on the use of Digital Elevation Models (DEM), without prior information or subjective terms of classification. The technique for classification makes use of signal processing tools applied to the DEMs. In particular we use the wavelets multi-resolution analysis, with which, at first, we filter out from the DEM all the small-scale "noise" composed by isolated picks or small-sized tablelands. The outcome of the procedure is a division into ten morphologic regions, that completely map the study area, which is a 250 meters resolution digital terrain model of Italy. The resulting ten landform classes were be generally consistent with the visual perception of the morphology, and the resulting map compares well to the map obtained by previous semi-quantitative approaches for classification of Italy in topographic divisions.

1. INTRODUZIONE

Nella moderna concezione ingegneristica, la caratterizzazione di un territorio, più o meno esteso, in regioni omogenee rappresenta la base di partenza di ogni studio legato al comportamento fisico e climatologico dello stesso. Il concetto di regioni "omogenee", in effetti, è puramente teorico; le divisioni topografiche sono grandezze di tipo qualitativo, al più dei costrutti puramente statistici: caratterizzare il terreno in modo da riconoscere le divisioni che massimizzano l'omogeneità interna e conseguentemente l'eterogeneità con le zone esterne alla regione è un processo assai complesso. La grande varietà della topografia osservabile, tuttavia, può essere espressa abbastanza bene in termini quantitativi ed analitici, in quanto diversi territori, generati da processi contrastanti, possono essere distinti ed analizzati individualmente: tale operazione è finalizzata, oltre che alla descrizione della topografia nel senso letterale del termine, alla derivazione delle mappe per i trasferimenti militari, alla creazione di mappe ombreggiate a scopi cartografici, alla valutazione del rischio geomorfologico ed all'analisi delle morfologie e delle strutture locali, ed alle modellazioni idrogeologiche per la pianificazione territoriale su scala più o meno estesa.

Prima del presente lavoro, era stata proposta solamente una suddivisione topografica per il territorio italiano, effettuata alla metà degli anni Novanta da due ricercatori del CNR-IRPI di Perugia (Guzzetti e Reichenbach, 1994). Tale studio effettua una classificazione semi-quantitativa, derivata da una *cluster-analysis* non supervisionata a tre categorie, effettuata sulle quattro derivate dell'altezza e con il confronto visivo di mappe geologiche e digitali dei parametri morfometrici, calcolati a partire da un DEM con risoluzione spaziale di 230 metri. Il risultato ottenuto da tale studio è stata la divisione del territorio italiano in 8 macro-regioni ed in 30 province, ordinate secondo la numerazione di Fenneman, un sistema di classificazione molto diffuso negli Stati Uniti. Una classificazione di questo tipo risulta essere di particolare interesse dal punto di vista quantitativo, in quanto si propone come fonte di confronto per il presente lavoro; dal punto di vista realizzativo, però, tale risultato risulta essere solo semi-quantitativo, in quanto, seppur basato non soltanto sull'analisi visiva del territorio ma anche sul trattamento di dati numerici, rimane ancora parzialmente legato ai metodi di classificazione della geomorfologia tradizionale, e quindi risulta essere ripetibile con difficoltà.

Obiettivo del presente lavoro è, invece, quello di ottenere una classificazione completamente quantitativa del territorio, ovvero di creare una procedura del tutto automatizzabile che fornisca, a partire da un modello digitale del terreno, una divisione automatica delle regioni morfologiche più significative.

Tale divisione quantitativa è resa possibile mediante l'applicazione dell'analisi wavelet multirisoluzione, che consente di separare le componenti ad alta frequenza dalle componenti a bassa frequenza, in modo tale da estrarre, partendo da un DEM con qualsiasi risoluzione spaziale, l'andamento principale del terreno. L'utilizzo, in ambito geomorfologico, della trasformata wavelet non è

nuovo: in ambito scientifico, una delle applicazioni morfologiche di maggior interesse della trasformata wavelet è rappresentata senza dubbio dagli studi compiuti verso la fine del XX secolo da due ricercatori australiani: John C. Gallant e Michael F. Hutchinson. Mediante l'utilizzo della trasformata wavelet, e partendo da un modello digitale del terreno qualsiasi, gli Autori avevano sviluppato una procedura in grado di ricostruire il modello di partenza, filtrando però le informazioni alle scale (ovvero alle lunghezze d'onda) più basse, in modo da ottenere un DEM a scala realmente inferiore, che però non perdesse informazioni "dominanti" legate all'andamento generale del terreno sia a scala monodimensionale (Gallant e Hutchinson, 1997a) che bidimensionale (Gallant e Hutchinson, 1997b); tale approccio rappresenta un metodo interessante per ridurre la risoluzione del DEM, dato che, al posto di far variare semplicisticamente il passo della griglia di discretizzazione, con il rischio di perdere punti importanti per la caratterizzazione morfometrica del territorio, in questo caso si introduce nell'ambito dei Modelli Digitali del Terreno un'idea maggiormente "cartografica" di scala di rappresentazione, cercando di ottenere un modello risultante le cui informazioni siano proporzionali alla minima lunghezza d'onda delle componenti wavelet, piuttosto che alla risoluzione spaziale del dato. Gli Autori basarono i loro studi sull'utilizzo delle cosiddette "wavelet positive", motivando tale scelta come il tentativo di introdurre funzioni matematiche non oscillatorie (come sono invece le funzioni base della trasformata di Fourier e della trasformata wavelet tradizionale), in modo da ottenere una migliore rappresentazione del terreno. Tali funzioni, però, se da un lato consentivano una migliore rappresentazione del territorio dal punto di vista fisico, avevano il problema che, eliminando la caratteristica della media nulla, che è quella che causa il moto oscillatorio delle wavelet "tradizionali", viene meno l'invertibilità della trasformata, con il problema che per partire dallo spettro di frequenza e ritornare ad un dato spaziale (di fatto, quindi, trovare quei parametri di traslazione e di scala caratteristici delle wavelet) è necessario seguire una strada diversa dall'applicazione della semplice anti-trasformata. Gli stessi Autori proponevano l'utilizzo di un algoritmo di autocorrelazione da eseguire sull'intera superficie di analisi e per ogni componente della trasformata. L'utilizzo di tali algoritmi di correlazione risulta essere, per stessa ammissione degli Autori, computazionalmente complesso soprattutto in termini di tempo macchina, non appena la regione si allarga a qualche centinaio di chilometri quadrati, oppure per risoluzioni spaziali elevate (i.e. griglie con lato di 10 metri o inferiori). L'impiego dei tradizionali algoritmi di filtraggio wavelet, al contrario, consente l'invertibilità della funzione, risolvendo di fatto il "collo di bottiglia" che emergeva da tale lavoro.

2. SCELTA DELLA RISOLUZIONE SPAZIALE DEL DEM

Come detto, l'impiego di modelli digitali del terreno all'interno di analisi idrologiche e geomorfologiche non è nuovo: a partire dai primi anni Novanta, numerosi autori hanno studiato strumenti di analisi che tenessero conto di tali modelli, come ad esempio Hutchinson (1989) oppure Tarboton, Bras e Rodriguez-Iturbe (1989), e parallelamente, sono sorti studi sul rapporto tra i parametri così estratti e la risoluzione spaziale del DEM stesso, come Zhang e Montgomery (1994) e Walker e Willgoose (1999).

Tali Autori, tuttavia, focalizzano la loro analisi sulla stima locale di questi parametri, generalmente su territori di pochi chilometri quadrati di superficie, per i quali è consigliata una risoluzione spaziale pari al massimo a qualche decina di metri (generalmente, griglie di non più di 25 m di lato, spesso ottenute per via fotogrammetrica o a partire da dati LIDAR).

Il presente lavoro, al contrario, si prefigge di estendere l'analisi ad un territorio decisamente vasto, quale ad esempio una regione od uno Stato, e pertanto risulta evidente come risoluzioni come quelle suggerite in letteratura risultino di difficile impiego, sia per problemi computazionali, sia soprattutto per problemi legati alla reperibilità del dato stesso.

Per tale motivo, durante l'intera analisi si è fatto uso di modelli digitali delle altezze aventi risoluzione spaziale ben superiore rispetto a quelle suggerite in letteratura, ed in particolare l'analisi morfologica del territorio italiano è stata compiuta utilizzando un modello digitale delle altezze con risoluzione di 250 metri ricavato a partire dalla cartografia dell'Istituto Geografico Militare in scala

1:100 000, e proiettato nel sistema di coordinate UTM-WGS84.

3. L'ANALISI WAVELET MULTIRISOLUZIONE

Fin dalla sua comparsa, avvenuta nei primi anni Ottanta come strumento per le applicazioni sismologiche (Goupilland, Grossman e Morlet 1984), l'analisi wavelet rappresenta un metodo di analisi dei segnali che ha riscosso l'interesse di un gran numero di ricercatori di tutto il mondo. Il largo successo che ha immediatamente avuto in numerosi settori della fisica e della matematica applicata è dovuto al fatto che la trasformata wavelet fornisce una rappresentazione tempo-frequenza, al contrario di quella di Fourier, oltre alla possibilità di adattare la risoluzione nello spazio in funzione della frequenza che si sta analizzando; tale proprietà risulta essere di fondamentale importanza durante l'analisi di un segnale multi-frequenza come è quello del modello digitale del terreno. Nella Figura 1 viene mostrata la capacità di adattamento della funzione wavelet rispetto alla variabilità del terreno: in un terreno montuoso (e quindi caratterizzato da una elevata variabilità nel breve spazio) l'onda wavelet si adatterà aumentando anch'essa la frequenza di analisi mentre, in un terreno pianeggiante, la stessa funzione tenderà a ridurre il tempo delle sue oscillazioni, vista la minore variabilità del territorio.

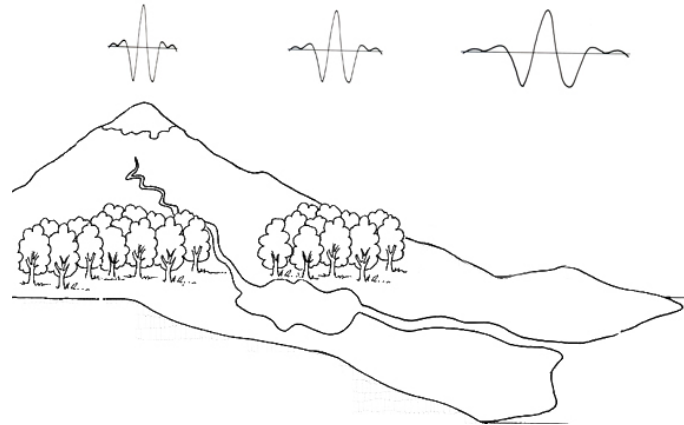


Figura 1: Capacità di adattamento delle wavelet

Le wavelet, inoltre, consentono di mostrare alcuni aspetti dei segnali che non sono individuabili con gli altri strumenti comunemente utilizzati, ovvero il trend di un segnale, i punti di interruzione e di discontinuità; inoltre, consentono di comprimere e di filtrare un segnale senza che questo comporti una sensibile perdita di informazioni rispetto al segnale di partenza.

3.1 La scomposizione wavelet

L'idea alla base dell'analisi multirisoluzione è quella di individuare e separare, utilizzando la trasformata wavelet discreta, il contenuto di informazione a bassa frequenza da quello ad alta frequenza di un segnale monodimensionale o bidimensionale, mantenendo sempre l'informazione spaziale di ciascuna componente. Alla base di tale struttura di scomposizione vi è un importante fondamento: la gran parte dei segnali contiene le informazioni più importanti nelle frequenze più basse, che sono quelle che ne caratterizzano macroscopicamente la forma e l'andamento. Viceversa, le alte frequenze impongono al segnale solamente piccole variazioni, o "sfumature".

In un dominio discreto, quale è quello rappresentato dai modelli digitali del terreno, l'implementazione dell'analisi multirisoluzione è basata sull'applicazione di un filtro "passa-basso" e di un filtro "passa-alto", in cui la frequenza di taglio è posizionata a metà dello spettro dell'immagine originale; il modello del terreno viene in questo modo suddiviso in due parti, chiamate rispettivamente *approssimazione* (l'output del filtro passa-basso) e *dettaglio* (l'output del filtro passa-alto), che a sua volta può essere diviso in tre parti (verticale, orizzontale e diagonale) a seconda della direzione prevalente delle componenti.

Tale procedura può essere ripetuta in successione a partire dalla componente di approssimazione del livello precedente, come mostrato in Figura 2.

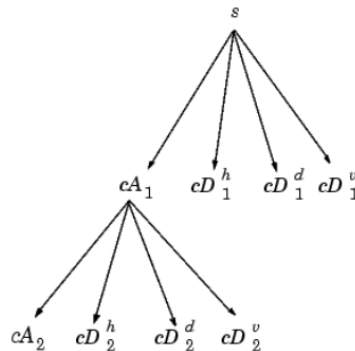


Figura 2: Il Wavelet Decomposition Tree

La ricorsività di tale operazione consente al *rumore* presente nel segnale originale (schematizzato come *rumore bianco*, a media nulla) di essere man-mano filtrato, consentendo di evidenziare l'andamento caratteristico del terreno ed eliminando pertanto i disturbi provocati da errori di misura e dal sovra-campionamento del modello. Il processo di analisi, teoricamente infinito, nella pratica si interrompe allorché la risoluzione del segnale (ovvero, nel caso dei DEM, l'ampiezza della cella) scende al di sotto dell'intervallo di campionamento (la risoluzione minima della cella).

4. DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA DI CLASSIFICAZIONE

4.1 L'impiego delle wavelet al modello digitale del terreno

L'analisi oggetto di tale lavoro è stata applicata all'area italiana del modello digitale del terreno ricavato dalle tavolette I.G.M. in scala 1:100 000, ovvero un DEM GRID avente una risoluzione spaziale di 250 metri.

L'applicazione della trasformata wavelet multirisoluzione al modello del terreno a disposizione è stata preceduta dalla scelta del livello a cui interrompere l'analisi. Tale scelta è assistita da un'analisi di tipo visivo che consente all'operatore di valutare la risoluzione delle informazioni che ritroverà nel prodotto finale, ovvero nel DEM "filtrato" in cui è possibile osservare l'andamento caratteristico del territorio senza i disturbi dovuti al campionamento puntuale del modello.

Dalla Figura 3 si può notare come le caratteristiche principali del territorio (le Alpi, l'Appennino o, la Pianura Padana) tendano a delineararsi maggiormente con il procedere dell'analisi: l'immagine ottenuta fermando l'analisi al quarto livello consente già, solo mediante l'osservazione visiva, di distinguere le macroregioni che formano il territorio italiano.

Per fornire un'idea significativa di cosa accade al modello digitale del terreno dopo l'applicazione della trasformata wavelet, di seguito vengono riportati i risultati dell'analisi multirisoluzione compiuta su un territorio più ridotto (l'Italia Nord-Occidentale). Per tale territorio si può osservare in particolare come il modello di partenza (Figura 4) fosse caratterizzato da frequenti oscillazioni del valore di elevazione, e come tali oscillazioni, dovute alla bassa risoluzione di campionamento del modello, vengano completamente filtrate dall'analisi multirisoluzione (Figura 5): il DEM ottenuto rappresenta allora un'approssimazione del territorio in cui le componenti di dettaglio (quali picchi isolati, leggeri avvallamenti, ecc.) vengono filtrate via mentre viene accentuato l'andamento geomorfologico dominante dello stesso, consentendo la classificazione macroscopica delle regioni.

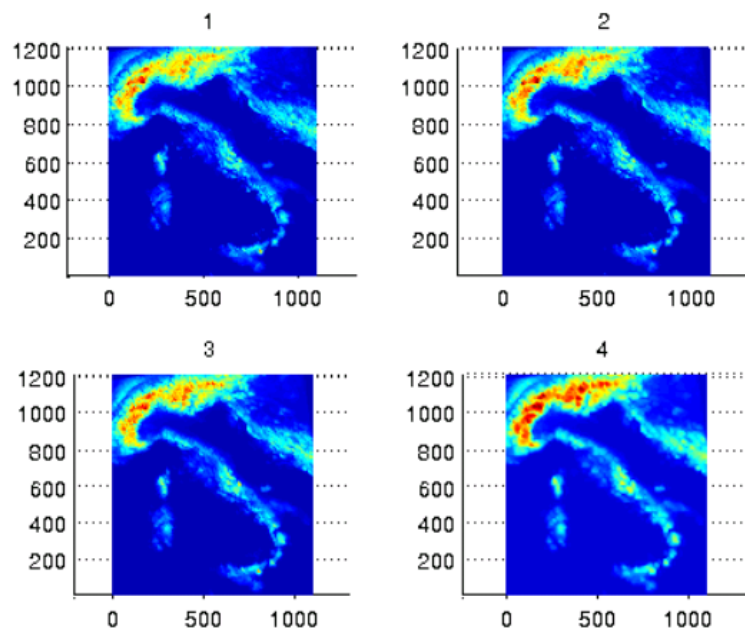


Figura 3: Scelta del Livello di Analisi per il DEM

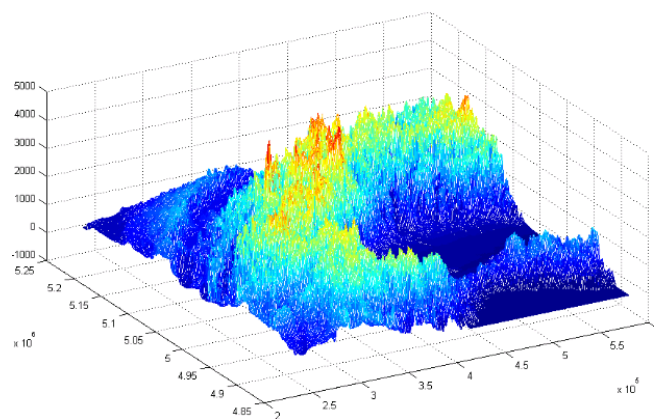


Figura 4: DEM Relativo all'Italia Nord-Occidentale

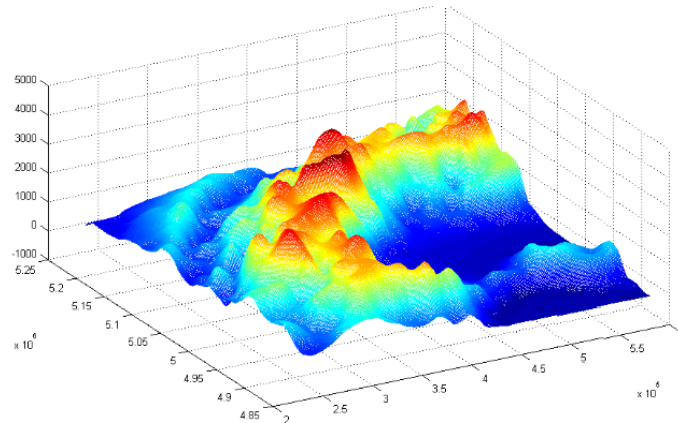


Figura 5: DEM in seguito all'applicazione della trasformata wavelet con le funzioni Daubechies 4 interrotta al quarto livello di analisi (matrice di approssimazione)

4.2 Determinazione delle regioni geomorfologiche

Il modello del terreno trattato con l'analisi wavelet può a questo punto essere sottoposto ad una procedura di delimitazione quantitativa di regioni omogenee, similmente a quanto viene compiuto in altri studi di analisi e di caratterizzazione del territorio (Goupilland, Grossman e Morlet, 1984) e (Tucker et al., 2001).

In particolare, la procedura qui applicata ha interessato principalmente due parametri, ovvero l'altezza e la pendenza media del punto. Di seguito si riporta una breve descrizione della procedura di calcolo effettuata per questi due parametri.

Altezza. Nel calcolo dell'altezza relativa ad ogni punto ci si è riferiti non al valore puntuale di altezza (ovvero all'informazione grezza del DEM) ma alla media delle altezze del punto e degli otto punti intorno. L'utilizzo di questo accorgimento ha il compito di "correggere" il dato grezzo delle altezze mediante il passaggio di una finestra quadrata lungo tutto il DEM.

Pendenza. La pendenza del terreno (detta anche gradiente topografico) controlla la forza di gravità disponibile per il lavoro geomorfologico ed è probabilmente la quantità primaria in un'analisi topografica. Teoricamente si tratta di un valore puntuale, in quanto misura il grado di variazione di altezza rispetto ad una lunghezza finita, ed è fortemente dipendente dalla risoluzione spaziale: DEM a risoluzione maggiore presenteranno valori di pendenza inferiori in media rispetto agli analoghi punti su DEM con risoluzione più bassa. Nel presente lavoro la pendenza è stata calcolata considerando una finestra "a croce greca" di 3 x 3 pixel in movimento lungo l'intero DEM. Al pixel centrale della finestra è stato assegnato il valore massimo tra le due seguenti grandezze:

$$p_r = \arctan \frac{|H_{r-1,c} - H_{r+1,c}|}{2 \times \Delta} \quad (1)$$

$$p_c = \arctan \frac{|H_{r,c-1} - H_{r,c+1}|}{2 \times \Delta} \quad (2)$$

Dove, con i pedici r e c vengono indicate rispettivamente le direzioni lungo le righe e le colonne del modello digitale del terreno.

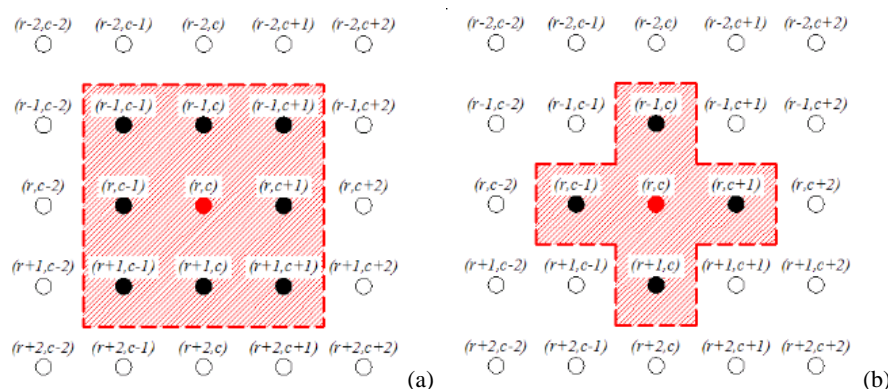


Figura 6: a) Finestra di analisi per il calcolo dell'altezza nel punto di coordinate (r,c) ; b) Finestra di analisi per il calcolo della pendenza nel punto di coordinate (r,c)

Una volta calcolati tali parametri per l'intero territorio si è proceduto ad una classificazione dello stesso seguendo criteri descrittivi di classico impiego in ambito geomorfologico (Castiglioni 1995). Tali regole sono riassunte nella Tabella 1.

Il risultato della procedura di classificazione del territorio è riportato nella Figura 7.

	0° ÷ 1°	1° ÷ 3°	> 3°
0 ÷ 200 m	Pianura alluvionale	Pianura pedemontana	-
200 ÷ 600 m	Zona collinare poco acclive	Zona collinare	-
600 ÷ 1700 m	Pianoro	Catena montuosa secondaria	Catena montuosa secondaria acclive
> 1700 m	Pianoro montano	Catena montuosa principale	Picco isolato

Tabella 1: Nomenclatura utilizzata nella classificazione

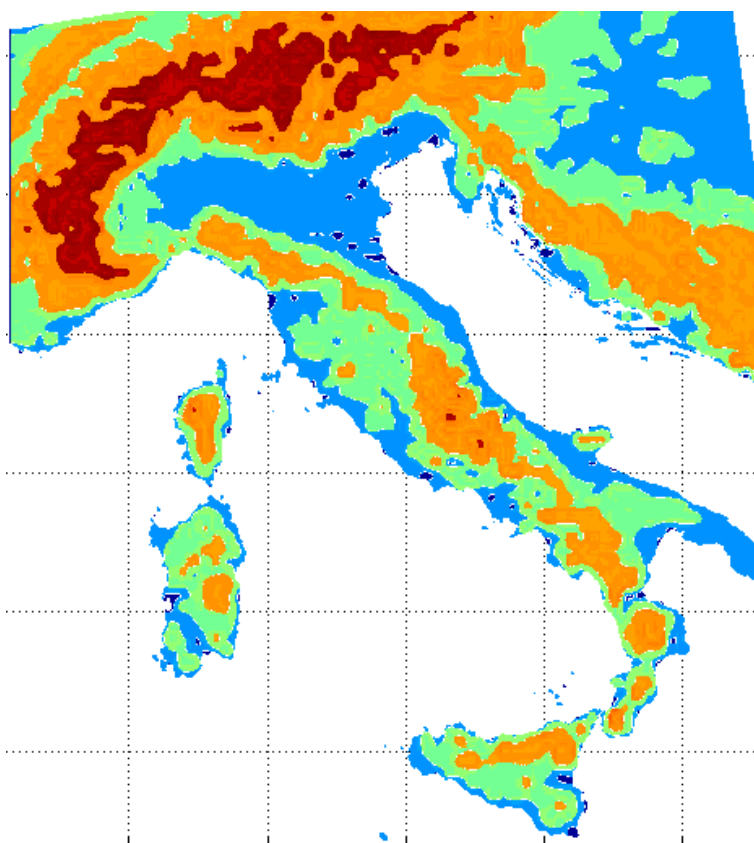


Figura 7: Classificazione del territorio italiano in regioni omogenee (visione di insieme). In particolare, vengono distinte le regioni pianeggianti (in azzurro), le regioni collinari (in verde), le catene montuose secondarie (in arancione) e le catene montuose principali (in magenta)

La classificazione ottenuta evidenzia nitidamente la situazione geomorfologica del territorio italiano: vi sono fondamentalmente quattro grandi caratterizzazioni geomorfologiche, che risultano ben distinte tra loro anche geograficamente.

Una prima regione è rappresentata dai terreni pianeggianti, quasi sempre di natura alluvionale, caratterizzata da terreni in prevalenza argillosi o sabbiosi: esempio classico di tali morfotipi sono la Pianura Padana, l'intera piana costiera Adriatica e la Penisola Salentina (le Terre d'Otranto). Un'analisi approfondita di questa topologia mette in evidenza, oltre alle suddette regioni, anche quelle formate per accumulo detritico del fiume Arno (presso Firenze), del fiume Tevere (il cosiddetto Agro Romano, nei pressi di Roma) e del fiume Volturno (presso Napoli). Sono morfologicamente assimilabili alla macroregione delle pianure anche le pianure pedemontane (le cosiddette piane), ovvero quei terreni caratterizzati da una leggera ondulazione e che si protraggono sino alla costa. Sono esempi tipici del territorio italiano la Sabina (Lazio), la Ciociaria, la Piana del Sele (Campania), la Piana di Gela (Sicilia), oltre ai territori costieri degli Appennini Liguri e della Sardegna.

