

C. TEBANO, F. PASANISI

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali
Centro Ricerche Portici, Napoli

S. GRAUSO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**QMORPHOSTREAM: STRUMENTI PER L'ANALISI
GEOMORFICA QUANTITATIVA IN AMBIENTE QGIS**
Esempi applicativi su due bacini fluviali
dell'Italia meridionale

RT/2016/33/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

C. TEBANO, F. PASANISI

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali
Centro Ricerche Portici, Napoli

S. GRAUSO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali
Centro Ricerche Casaccia, Roma

QMORPHOSTREAM: STRUMENTI PER L'ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA IN AMBIENTE QGIS

Esempi applicativi su due bacini fluviali dell'Italia meridionale

RT/2016/33/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

QMORPHOSTREAM: STRUMENTI PER L'ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA IN AMBIENTE QGIS

Esempi applicativi su due bacini fluviali dell'Italia meridionale

C. Tebano, F. Pasanisi, S. Grauso

Riassunto

L'analisi geomorfica quantitativa è uno strumento efficace e molto utilizzato per lo studio dei bacini e delle reti idrografiche. In particolare, studi precedenti hanno dimostrato l'esistenza di correlazioni tra i valori dei parametri geomorfici ed il trasporto solido a scala di bacino idrografico. Le tecnologie GIS sono ampiamente utilizzate nel campo dell'analisi geomorfica, per la quale sono stati proposti in passato strumenti di calcolo e applicazioni, nella maggior parte dei casi basati su software commerciale. Nel presente documento, viene presentata l'applicazione originale QMorphoStream, sviluppata in ambiente QGIS, tra i più diffusi Sistemi Informativi Geografici open source attualmente disponibili. QMorphoStream è un pacchetto di strumenti di calcolo che, utilizzati in modo sequenziale, consentono di eseguire tutti i passi dell'analisi geomorfica di un bacino e di una rete idrografica. I risultati sono presentati sotto forma di layer e tabelle che vengono aggiunte alla mappa in QGIS. Gli strumenti di calcolo sono stati sviluppati nel linguaggio di programmazione Python. Le principali caratteristiche degli algoritmi e le soluzioni adottate per le diverse procedure sono presentate e discusse nel documento. Vengono, inoltre, presentati esempi applicativi a due bacini idrografici dell'Italia meridionale. Lo sviluppo di QMorphoStream è parte di un progetto finalizzato allo sviluppo di metodi per la stima degli apporti solidi dai bacini alle unità fisiografiche, nel quadro più ampio della valutazione degli effetti sul territorio dei cambiamenti climatici.

Parole chiave: Analisi Geomorfica Quantitativa, Bacino, Rete Idrografica, QGIS, Python

Abstract

The quantitative geomorphic analysis is an effective and widely used tool for the study of watersheds and hydrographic networks. In particular, previous studies showed the existence of correlations between geomorphic parameters and sediment transport at watershed scale. GIS techniques are widely used in geomorphic analysis and at this aim processing tools and applications were proposed in the past, mainly based on commercial software. In the present paper, the original application QMorphoStream is presented. The application was developed in QGIS environment, that is currently one of the most widely used free open source Geographic Information System. QMorphoStream is composed of several processing tools which are sequentially executed to perform all the steps of quantitative geomorphic analysis of a watershed and hydrographic network. Results are given as layers and tables that are added to the QGIS map. The processing tools were developed using the Python programming language. The main properties of the algorithms and implemented solutions for the different procedures are hereby presented and discussed. Example applications on two watersheds in southern Italy are also presented. The development of QMorphoStream is part of a research project aiming at developing methods to estimate the sediment supply from river basins to physiographic unities, in the wider frame of evaluating the effects of climate changes on territory.

Keywords: Geomorphic Quantitative Analysis, Watershed, Hydrographic Network, QGIS, Python

INDICE

1. INTRODUZIONE	7
1.1 Generalità sull'analisi geomorfica quantitativa	7
1.2 Utilizzo di strumenti GIS nell'analisi geomorfica quantitativa	7
1.3 Motivazioni per il presente lavoro	8
2. L'APPLICATIVO QMORPHOSTREAM	9
3. I SITI DI ESEMPIO	13
4. LONGEST PATH ANALYSIS	15
5. PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS	17
6. ASSIGN STRAHLER ORDER	22
7. GEOMORPHIC ANALYSIS	24
8. STREAM SLOPE ANALYSIS	30
9. RISULTATI E CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA	35

1. INTRODUZIONE

1.1 Generalità sull'analisi geomorfica quantitativa

L'analisi geomorfica quantitativa è una metodologia largamente utilizzata che consente di esprimere le principali caratteristiche dei bacini e delle reti idrografiche per mezzo di un insieme di parametri calcolati secondo procedure codificate.

Fino alla metà dello scorso secolo, lo studio della morfologia del territorio e dei bacini idrografici era sostanzialmente basato su considerazioni qualitative, difficilmente utilizzabili per applicazioni pratiche e molto legate al giudizio soggettivo del singolo autore. Si devono a Horton [1] e Strahler [2,3] le prime proposte di metodologie e strumenti analitici per descrivere le caratteristiche dei bacini mediante parametri quantitativi. L'insieme di tali tecniche, successivamente sviluppate e consolidate grazie al contributo di diversi autori, costituisce l'analisi geomorfica quantitativa.

In generale, le principali proprietà morfologiche di un bacino idrografico possono essere suddivise in tre categorie:

1. Proprietà lineari, cioè, essenzialmente, le caratteristiche della rete idrografica schematizzata attraverso un insieme di segmenti proiettati su un piano orizzontale. In tale categoria sono comprese l'organizzazione gerarchica del reticolo fluviale e la lunghezza delle aste.
2. Proprietà areali, ovvero la forma e le dimensioni planimetriche del bacino o di porzioni di esso aventi proprietà omogenee rispetto a determinati parametri.
3. Proprietà orografiche, che derivano dall'analisi dell'altimetria del bacino idrografico. Rientrano in tale categoria le caratteristiche ipsografiche del bacino e la pendenza delle aste del reticolo.

A ciascuna delle proprietà elencate corrisponde un insieme di parametri descrittivi, come sarà specificato nel seguito.

Fin dalla sua prima formulazione, l'analisi geomorfica quantitativa ha incontrato il favore crescente della comunità scientifica, in quanto consente di confrontare in modo oggettivo bacini idrografici di natura e caratteristiche anche molto diverse tra loro.

È stato inoltre osservato che le grandezze caratteristiche di importanti processi che hanno luogo nei bacini idrografici sono correlate ai principali parametri geomorfici del territorio. Questa circostanza traduce in termini quantitativi la considerazione che tali processi sono influenzati dalla morfologia del bacino e contribuiscono, al tempo stesso, al suo modellamento.

In particolare, numerosi lavori presentati a partire dal 1950 mostrano l'esistenza di importanti correlazioni tra le misure di portata solida fluviale in sospensione, la cosiddetta *portata torbida*, ed i parametri geomorfici, spesso accoppiati a parametri idrologici e climatici [4–9]. Sulla base di tali considerazioni, sono state proposte formule di varia natura che, mettendo in relazione i valori storici di portata solida ed i parametri geomorfici di un insieme di bacini campione, hanno lo scopo di stimare la portata solida per bacini in cui non sono disponibili misure dirette. Il tema costituisce attualmente oggetto di ricerca [10–12], orientata principalmente alla definizione di formule e metodologie di previsione affidabili e con un sempre più elevato grado di correlazione.

1.2 Utilizzo di strumenti GIS nell'analisi geomorfica quantitativa

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) rappresentano oggi un indispensabile strumento per la rappresentazione e l'analisi del territorio e vengono utilizzati in moltissimi settori scientifici e tecnici, oltre che nei processi decisionali e di gestione del territorio.

In particolare, fin dalla prima diffusione dei GIS, è apparso evidente come le funzioni di geo-processing e analisi spaziale potevano essere applicate all'analisi geomorfica quantitativa. L'interesse per tali applicazioni è andato progressivamente crescendo di pari passo con lo sviluppo

degli strumenti di calcolo e di condivisione dei dati geografici attraverso il web. A partire dagli anni 1990 [13,14], sono state quindi proposte varie soluzioni per l'esecuzione automatica o semi-automatica di procedure di analisi geomorfica quantitativa. Storicamente, la maggior parte delle applicazioni in tal senso [15–18] sono state sviluppate utilizzando ambienti software di tipo proprietario e commerciale, ed in particolare la piattaforma ESRI ArcView/ArcGIS [19].

Negli ultimi anni si è assistito ad una grande crescita e diffusione di software libero ed *open source* in diversi settori applicativi, tra cui i Sistemi Informativi Geografici. Oltre all'evidente risparmio economico, il ricorso a soluzioni *open source* consente di disporre di contributi condivisi e continuamente aggiornati da un'estesa rete di ricercatori e professionisti, che possono ricoprire il ruolo, al tempo stesso, di utenti e sviluppatori. Tra le soluzioni sviluppate, sono presenti significativi esempi relativi all'analisi geomorfica quantitativa [20–22].

Tra i vari GIS *open source*, il software QGIS [23] si è affermato, negli ultimi anni, come una delle applicazioni più diffuse nella comunità tecnica e scientifica. Il software, progetto della *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) è distribuito sotto la GNU *General Public License*. Nelle attuali versioni, QGIS integra, oltre alle proprie funzionalità, anche algoritmi sviluppati su altre piattaforme, tra cui GRASS [24]. Inoltre, QGIS integra il linguaggio di programmazione Python e ambienti di sviluppo per la creazione di plugin, strumenti di calcolo ed interfacce grafiche [25].

1.3 Motivazioni per il presente lavoro

Il lavoro qui presentato si inserisce nel quadro di un programma di ricerca finalizzato allo studio dell'interazione tra i bacini idrografici e la fascia costiera.

In particolare, uno degli obiettivi del programma è lo sviluppo di metodi di previsione del trasporto torbido nei reticoli fluviali e dei conseguenti apporti all'unità fisiografica costiera di riferimento. È prevista, in tal senso, l'applicazione dell'analisi geomorfica ad un esteso numero di bacini italiani di caratteristiche morfologiche e geologiche differenti, su cui sono disponibili misure storiche di trasporto torbido.

L'esame dello stato dell'arte della materia e dei software disponibili ci ha convinti dell'opportunità di sviluppare un insieme originale di strumenti di calcolo che consente l'esecuzione delle varie procedure di analisi geomorfica quantitativa in un unico schema logico integrato. Coerentemente con quanto discusso in precedenza, sono stati utilizzati la piattaforma QGIS ed il linguaggio di programmazione Python.

I principali vantaggi delle soluzioni prescelte sono elencati nel seguito:

- possibilità di controllare le procedure di analisi e di calcolo dei parametri geomorfici, ricercando soluzioni originali a criticità che normalmente si incontrano in tali applicazioni;
- possibilità di personalizzare la forma ed i contenuti degli input e output del modello in funzione delle esigenze del programma di ricerca;
- utilizzo di una piattaforma libera ed *open source*.

È stato, pertanto, sviluppato l'applicativo QMorphoStream, che opera su piattaforma QGIS. La versione beta 1.0 del software è descritta in un'altra pubblicazione [26]. Nel presente documento viene presentata la versione beta 1.1 che integra ulteriori funzionalità rispetto alla prima. Viene, inoltre, fornita una estesa descrizione degli algoritmi di calcolo e dei parametri geomorfici, che vengono discussi attraverso l'applicazione del software sviluppato a due bacini campione dell'Italia meridionale.

2. L'APPLICATIVO QMORPHOSTREAM

L'applicativo QMorphoStream è un insieme di strumenti di calcolo (“toolset”) che vengono aggiunti al pannello “Processing Tools” di QGIS, come illustrato in Fig. 1.

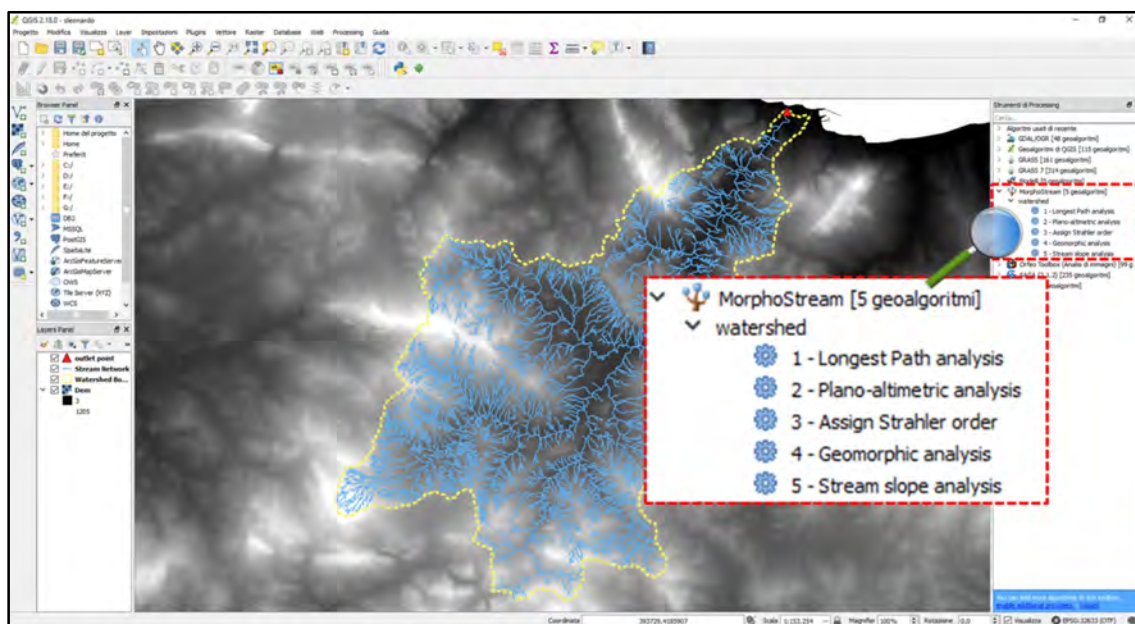


Fig. 1 – Il toolset QMorphoStream aggiunto al pannello “Processing tools” di QGIS

Gli strumenti di calcolo (“tool”) sviluppati sono elencati nel seguito:

1. LONGEST PATH ANALYSIS: consente di individuare un’ipotetica sorgente del bacino, come il punto del reticolo idrografico più distante dalla foce;
2. PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS: esegue una serie di analisi preliminari e calcola le principali grandezze areali e orografiche del bacino. I risultati sono utilizzati come input dai tool successivi;
3. ASSIGN STRAHLER ORDER: analizza l’ordinamento gerarchico del reticolo idrografico, che rappresenta la principale proprietà lineare del reticolo;
4. GEOMORPHIC ANALYSIS: calcola i parametri geomorfici, utilizzando i risultati degli strumenti di calcolo precedenti. I risultati sono aggiunti alla mappa QGIS sotto forma di tabelle;
5. STREAM SLOPE ANALYSIS: calcola la pendenza media delle singole aste del reticolo idrografico. Il tool, inoltre, restituisce la media delle pendenze delle aste appartenenti ad ogni ordine gerarchico.

Ad eccezione del tool LONGEST PATH ANALYSIS, la cui esecuzione è opzionale, QMorphoStream è organizzato secondo una logica sequenziale, in cui a ciascun tool corrisponde un singolo passo dell’analisi geomorfica, necessario ai passi successivi.

I dati di input necessari all’esecuzione di QMorphoStream devono essere presenti come layer nella mappa QGIS e sono riportati di seguito:

- il reticolo idrografico (*stream network*), rappresentato da un layer vettoriale di tipo “linea”;
- il contorno del bacino idrografico (*watershed boundary*), rappresentato da un layer vettoriale di tipo “poligono”;
- il modello digitale del terreno dell’area di indagine (DEM)¹;

¹ DEM (*Digital Elevation Model*) è un layer di tipo raster in cui a ciascun pixel corrisponde un valore della quota.

- la foce o la sezione di chiusura del bacino (*outlet point*), rappresentata da un layer vettoriale di tipo “punto”;
- la sorgente del reticolo/bacino idrografico (*source point*), rappresentata da un layer vettoriale di tipo “punto”.

Per quanto riguarda la definizione della sorgente, è possibile utilizzare tre diversi criteri:

1. la sorgente è nota a priori e viene fornita come input aggiuntivo, sotto forma di un layer vettoriale costituito da un solo punto. In molti casi la sorgente è indicata nella cartografia, ad esempio nelle tavolette IGMI;
2. la sorgente corrisponde al punto del reticolo posto alla distanza maggiore dalla foce, misurata lungo il reticolo idrografico stesso. In tal caso è possibile individuare la sorgente attraverso il tool LONGEST PATH ANALYSIS;
3. la sorgente corrisponde al punto del reticolo idrografico posto a quota più elevata. In tal caso è possibile individuare la sorgente attraverso una specifica funzione implementata nel tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS.

È interessante osservare che in molti casi è difficile dare una definizione univoca di sorgente del reticolo, in particolare quando non è individuabile una prima scaturigine sotterranea o un primo tratto in cui il regime idraulico può considerarsi perenne. È consigliabile, in tali casi, eseguire i calcoli con riferimento a differenti criteri per la definizione della sorgente, confrontando poi i risultati ottenuti.

Lo schema concettuale ed il flusso delle informazioni tra i diversi tool di QMorphoStream è illustrato in Fig. 2. Le linee tratteggiate indicano che l'esecuzione del tool è opzionale.

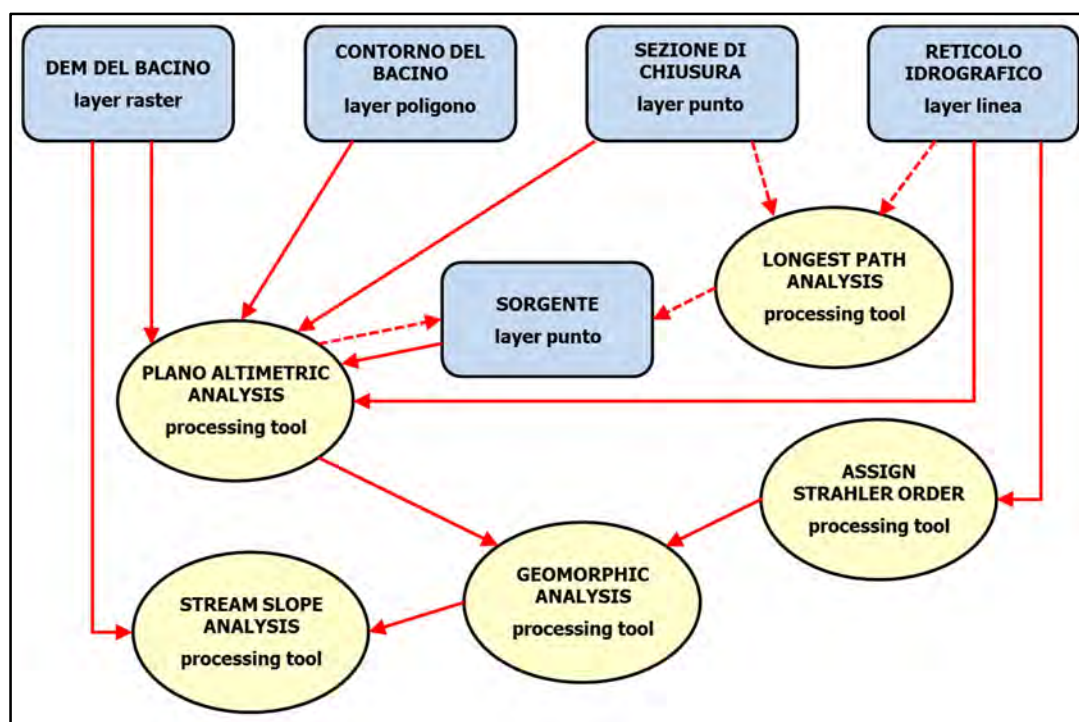


Fig. 2 – Schema concettuale di QMorphoStream

Dal momento che molti dei parametri geomorfici si basano su misure di lunghezze e di aree, è necessario utilizzare un sistema di coordinate metriche proiettate (es. UTM) sia per la mappa, sia per i layer da analizzare.

Nella fase di ideazione di QMorphoStream, la scelta della modalità di inserimento del reticolo e del bacino idrografico è stata oggetto di una approfondita discussione, alla luce delle esperienze maturate e dall'esame della letteratura precedente.

In generale, i metodi per la descrizione e mappatura dei bacini e dei reticoli possono essere ricondotti a due approcci concettuali distinti:

1. Ricostruzione a partire dalla cartografia disponibile;
2. Estrazione automatica a partire dal DEM mediante tecnologie GIS.

Entrambi gli approcci presentano aspetti positivi e negativi.

1. Relativamente al primo punto, che rappresenta storicamente la prima soluzione adottata, nella cartografia tradizionale i canali costituenti una rete idrografica (le cosiddette “*blue lines*”) sono tracciati sulla base della aero-foto-interpretazione. In generale, tali reticoli, per essere trattati in ambito scientifico, necessitano di una integrazione che viene fatta, a sua volta, mediante utilizzo di un’ulteriore copertura fotografica, possibilmente di maggior dettaglio, unitamente a controlli a terra. Questo perché il livello di dettaglio del reticolo idrografico riportato sulla cartografia ufficiale è strettamente connesso, oltre che all’abilità ed esperienza del foto-interprete, alla scala dei fotogrammi adoperati ed alla scala di rappresentazione cartografica. A tali considerazioni si aggiunge la necessità di ricavare dalla cartografia raster un’informazione in formato vettoriale, mediante procedure di digitalizzazione, che, anche in caso di automatizzazione, necessitano comunque di un intervento manuale di verifica e di eventuale correzione.
2. Relativamente al secondo approccio, fin dalle prime applicazioni delle tecnologie GIS in ambito fluviale sono stati proposti algoritmi per la perimetrazione dei bacini idrografici e per il tracciamento automatico delle reti di drenaggio a partire dal DEM, una volta che sia stata definita la sezione di chiusura del bacino. Tali metodi presentano l’indubbio vantaggio di evitare le procedure di interpretazione e di restituire i risultati già in formato vettoriale, utilizzabili per successive elaborazioni senza ricorrere ad operazioni di digitalizzazione. Al tempo stesso, però, l’utilizzo di tali tecniche automatiche introduce incertezze legate all’algoritmo utilizzato, alla risoluzione del DEM ed al livello di dettaglio desiderato per il reticolo. In particolare, i risultati sono fortemente influenzati dalla scelta del cosiddetto “*threshold parameter*”, ovvero una grandezza definita dall’utente che individua il numero minimo di celle del bacino che alimentano e supportano una singola asta del reticolo. La scelta del valore ottimale di tale parametro presenta normalmente incertezze tali da rendere necessari diversi tentativi per ottenere una rappresentazione sufficientemente realistica del reticolo, spesso ricorrendo al confronto dei risultati con la base cartografica tradizionale.

Numerose applicazioni per l’analisi geomorfica riportate in letteratura utilizzano l’estrazione automatica del bacino e del reticolo idrografico. Scegliendo tale soluzione, i soli dati di input richiesti sono il DEM e la sezione di chiusura; l’algoritmo provvede in automatico alla perimetrazione del bacino, al tracciamento del reticolo e, successivamente, all’analisi geomorfica vera e propria.

In QMorphoStream, al contrario, si è deciso di lavorare esclusivamente con bacini e reticoli idrografici generati esternamente, ed aggiunti alla mappa QGIS come layer vettoriali. In altre parole, si è scelto di separare il momento del tracciamento di bacini e reticoli dalle procedure di analisi geomorfica. I principali motivi di tale scelta sono i seguenti:

- Ripetibilità della procedura. L’utilizzo di dati vettoriali generati esternamente garantisce che i risultati dipendono esclusivamente dalle procedure di analisi geomorfica. In caso contrario, variando anche di poco i parametri del modello, sarebbe possibile, a partire dallo stesso DEM, generare reticoli differenti e l’univocità dei risultati, pertanto, non sarebbe garantita per uno stesso bacino.
- Validazione del reticolo. Il tracciamento in automatico del reticolo potrebbe non rappresentare in maniera sufficientemente realistica lo stato dei luoghi, in particolare quando i gradienti sono bassi o, a maggior ragione, quando il territorio è stato modellato

artificialmente (reti di canali, derivazioni di alvei, etc.). In generale, una procedura di validazione sul reticolo generato è sempre necessaria, e di solito viene comunque effettuata mediante confronto con la cartografia o con verifiche sul campo.

In conclusione, l'approccio seguito privilegia come dato idrografico affidabile quello desunto dalla cartografia disponibile.

In particolare, per i bacini italiani, si utilizza la cartografia dell'Istituto Geografico Militare alla scala 1:25.000, che, nonostante le inevitabili incertezze dovute alla rappresentazione cartografica ed all'aggiornamento delle carte, riveste un carattere di ufficialità e, soprattutto, costituisce una base di riferimento omogenea a scala nazionale.

3. I SITI DI ESEMPIO

A scopo di esempio, viene presentata l'applicazione di QMorphoStream a due bacini campione dell'Italia meridionale (Fig. 3).

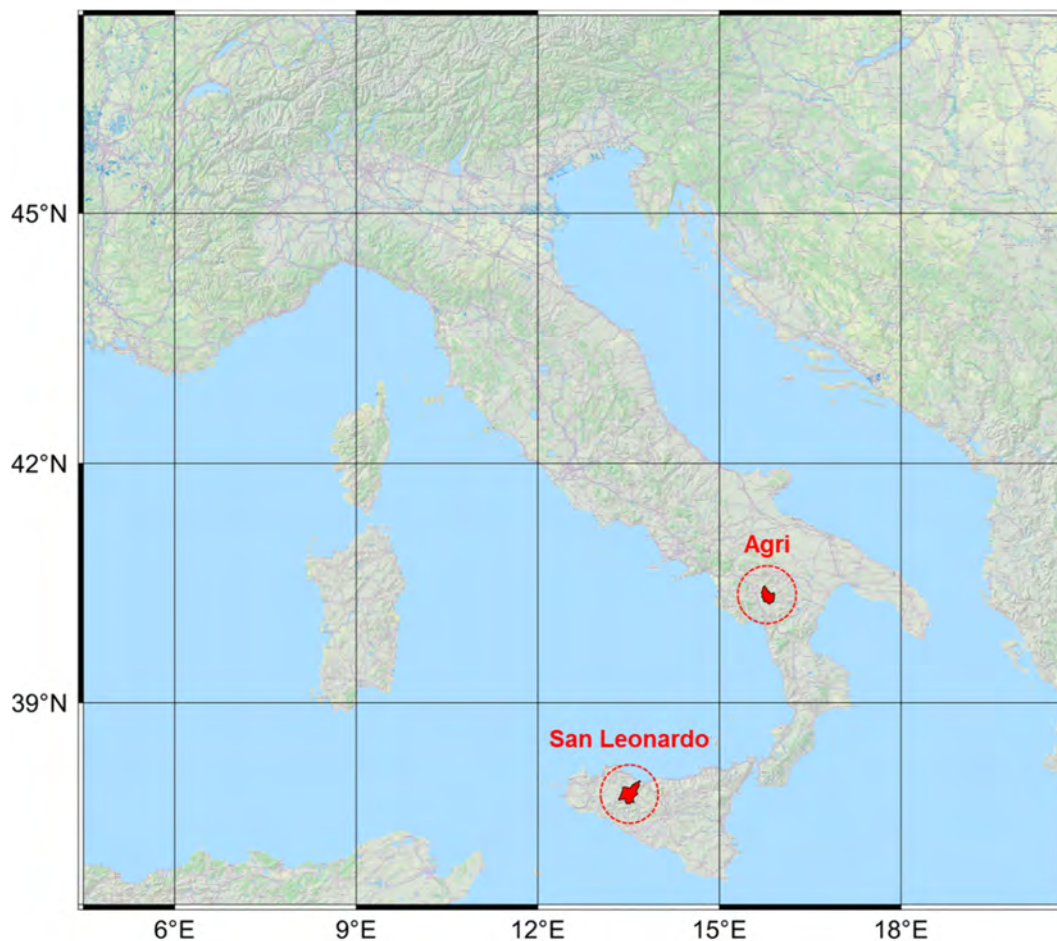


Fig. 3 – Inquadramento geografico dei bacini idrografici analizzati a scopo di esempio. Basemap: © Open Street Map Contributors, distribuita sotto licenza CC-BY-SA 2.0

Il fiume San Leonardo, in Sicilia, ha la foce in prossimità della città di Termini Imerese (PA), lungo la costa settentrionale dell'isola. Nell'esempio qui riportato, l'analisi geomorfica è stata condotta sull'intero bacino idrografico.

Il fiume Agri sfocia nel Mare Ionio, lungo la costa orientale della Basilicata. Nell'esempio presentato, l'analisi geomorfica è stata effettuata sul tratto fluviale a monte del lago di Pietra del Pertusillo. La sezione di chiusura del bacino, pertanto, è localizzata in corrispondenza della stazione di misura di Grumento Nova (PZ).

Nelle Figg. 4 e 5 sono riportate le mappe dei bacini e dei reticoli idrografici analizzati. Nella legenda sono riportati i layer caricati nel progetto QGIS e necessari all'esecuzione di QMorphoStream.

I reticoli idrografici sono stati ricavati dalla base IGMI in scala 1:25.000. Per entrambi i siti, la risoluzione del DEM utilizzato è pari a 20 m.

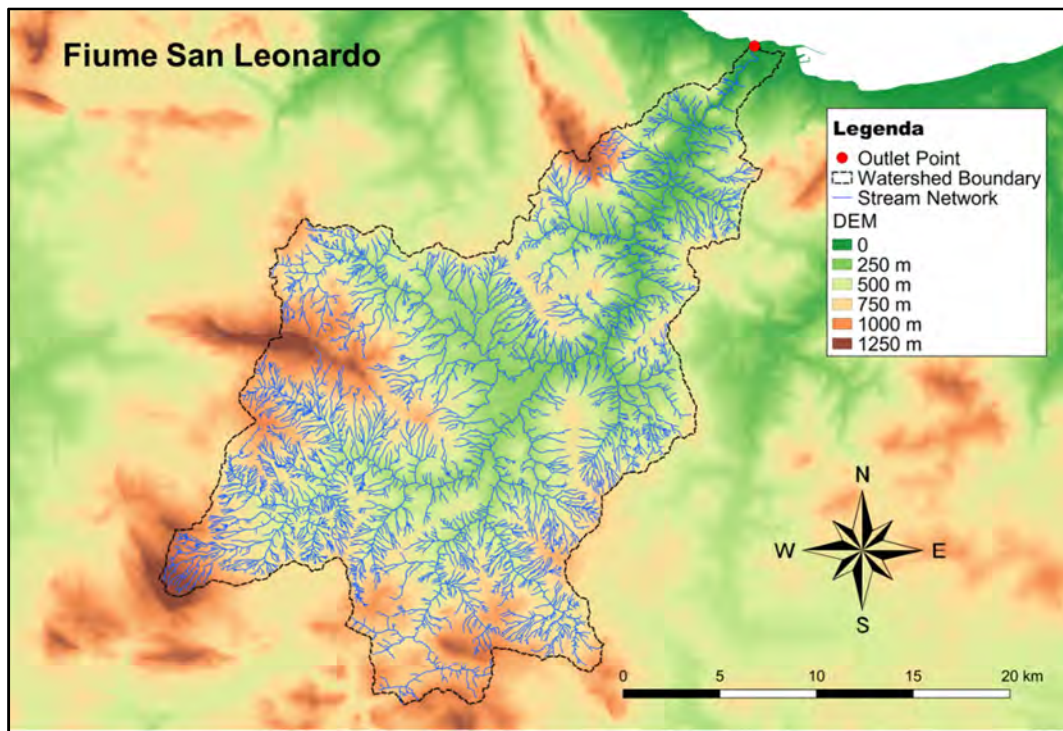


Fig. 4 – Mappa del bacino del fiume San Leonardo

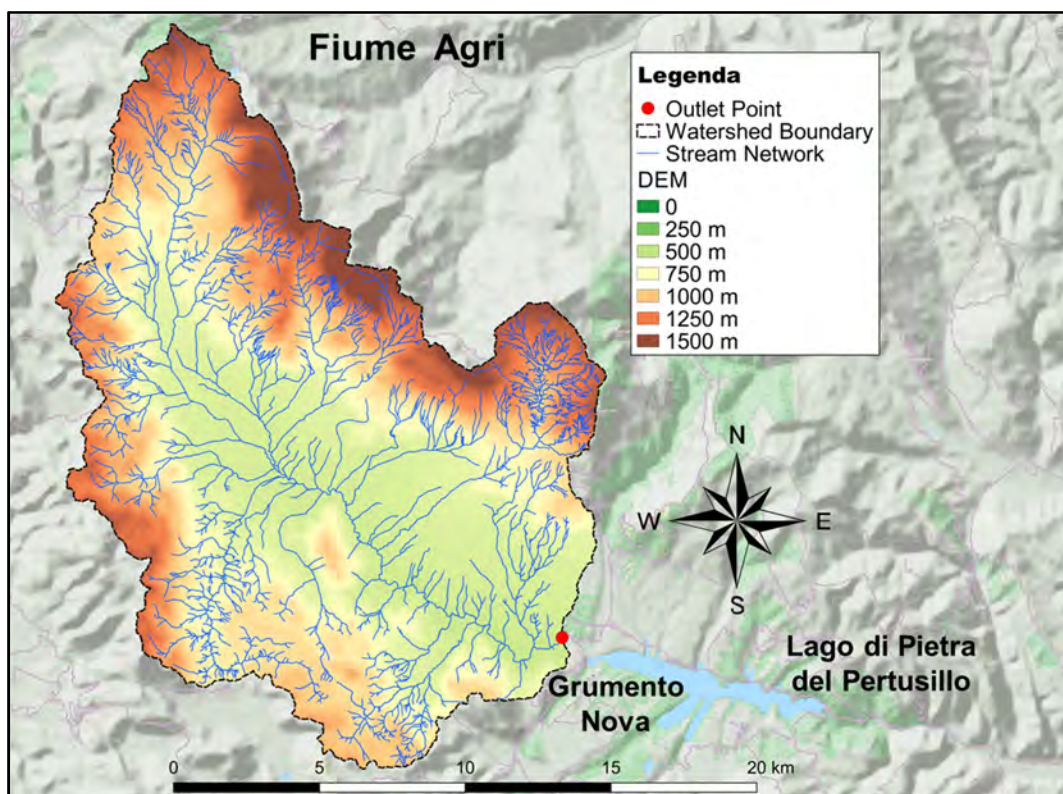


Fig. 5 – Mappa del bacino del fiume Agri alla stazione di Grumento Nova. Basemap: © Open Street Map Contributors, distribuita sotto licenza CC-BY-SA 2.0

4. LONGEST PATH ANALYSIS

Il tool LONGEST PATH ANALYSIS individua il punto del reticolo idrografico al quale corrisponde la distanza maggiore (misurata lungo il reticolo) dalla sezione di chiusura o dalla foce. In sostanza, viene valutato il percorso più lungo tra tutti quelli che, a partire dalle aste di ordine 1, raggiungono la sezione terminale percorrendo il reticolo.

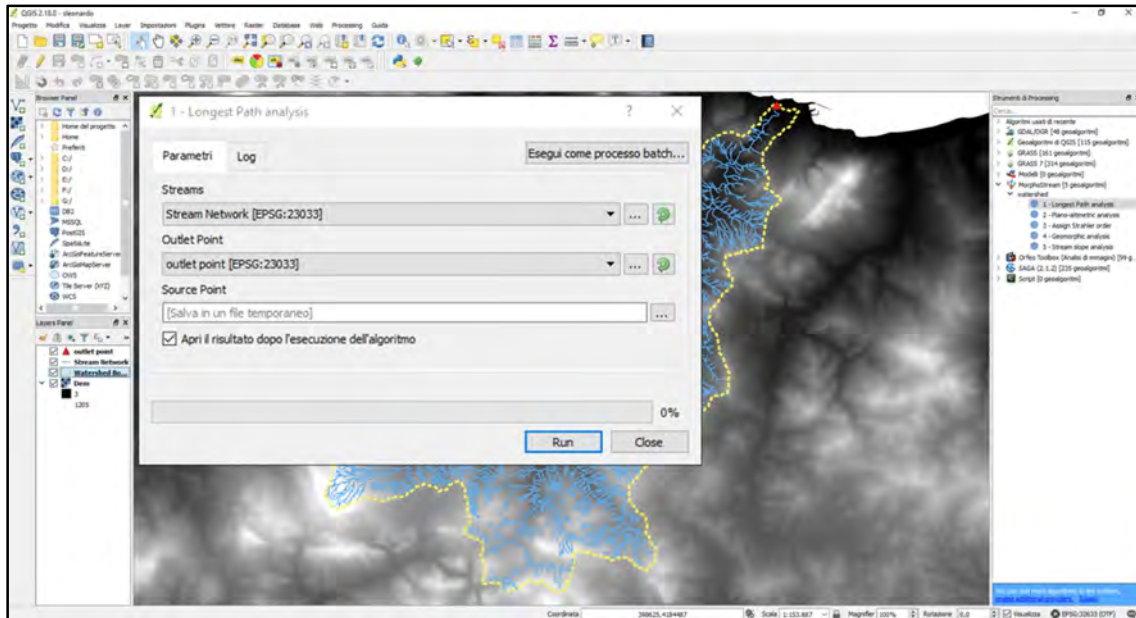


Fig. 6 – Interfaccia utente del tool LONGEST PATH ANALYSIS

Il motivo per cui è stato sviluppato questo tool è che, come si è detto in precedenza, uno dei criteri per la definizione del corso d'acqua principale e quindi della sua sorgente è proprio quello del percorso più lungo attraverso il reticolo stesso.

La Fig. 6 illustra l'interfaccia utente del tool LONGEST PATH ANALYSIS, con i relativi dati di input.

I dati di ingresso sono costituiti dal reticolo e dalla sezione di foce o di chiusura (*outlet point*).

A partire dall'asta finale del reticolo, l'algoritmo scorre il reticolo fino ad individuare un'asta priva di connessioni a monte, a cui corrisponde, quindi, una potenziale sorgente. Viene quindi calcolata, tramite il tool di GRASS "v.net.distance", la distanza lungo il reticolo tra la potenziale sorgente e l'*outlet point*.

La procedura viene ripetuta scorrendo tutte le geometrie ("feature") del reticolo fino a ciascuna potenziale sorgente e conservando, ad ogni passo, l'elemento a cui corrisponde la distanza maggiore risultante dal confronto con lo step precedente.

Il risultato finale è un layer costituito da un unico punto, che rappresenta la sorgente del reticolo.

La Fig. 7 illustra il risultato delle elaborazioni. Il punto a cui corrisponde il percorso più lungo è automaticamente aggiunto alla mappa (*farthest point*).

A differenza degli altri moduli di QMorphoStream l'esecuzione di questo tool è opzionale, dal momento che, come specificato in precedenza, il punto sorgente può essere definito anche con altri criteri.

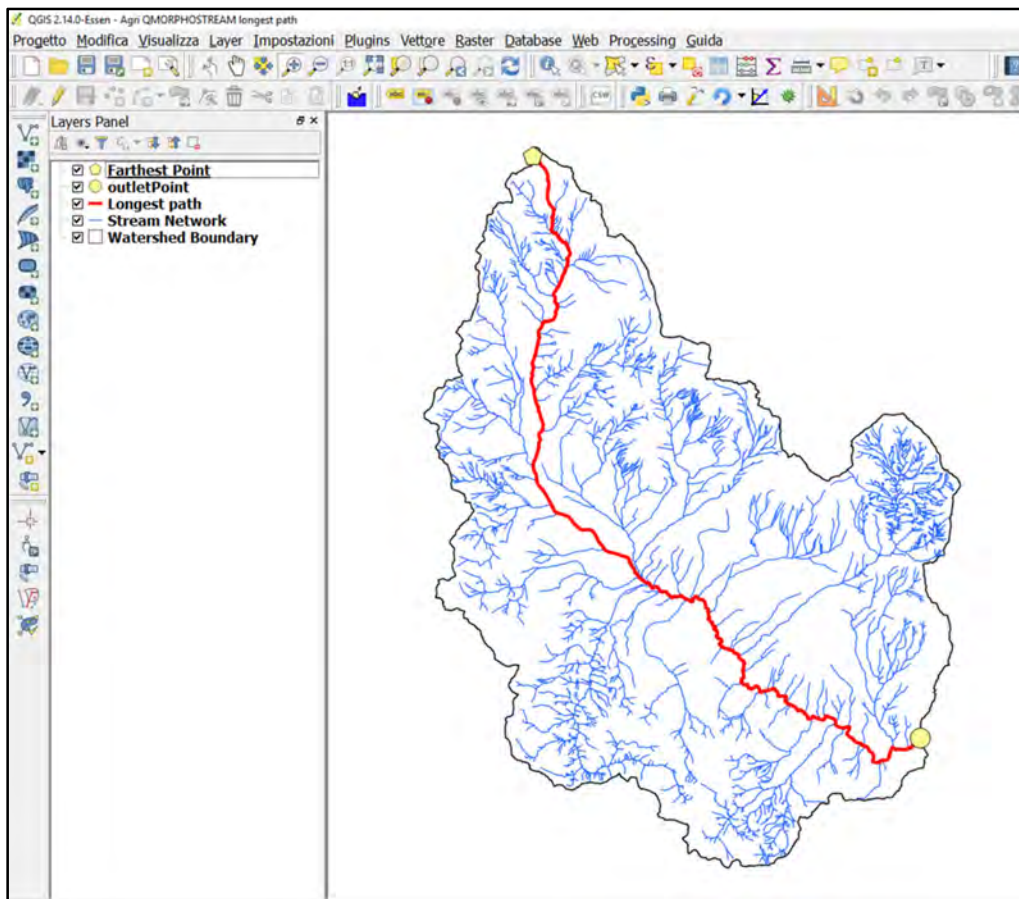


Fig. 7 – Risultato delle elaborazioni svolte dal tool LONGEST PATH ANALYSIS

5. PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS

Il tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS esegue una prima serie di analisi delle caratteristiche geometriche e dell'altimetria del bacino e del reticolo idrografico. I risultati vengono utilizzati dai tool eseguiti nelle fasi successive dell'analisi geomorfica.

In Fig. 8 è illustrata l'interfaccia utente del tool.

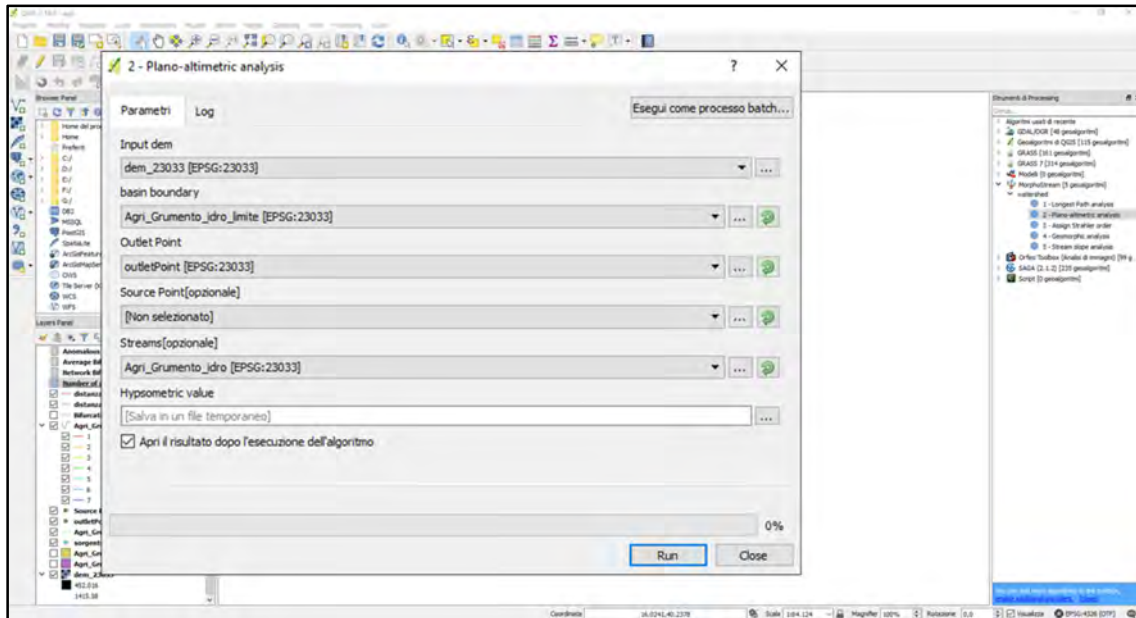


Fig. 8 – Interfaccia utente del tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS

Le grandezze calcolate, con le relative unità di misura, sono elencate nel seguito:

- P_m : perimetro del bacino [km];
- A : area del bacino [km²];
- H_{max} : quota massima del bacino [m];
- H_{min} : quota minima del bacino [m];
- H_{mean} : quota media del bacino [m];
- H_{range} : differenza tra le quote massima e minima del bacino [m];
- L_e : distanza euclidea tra la foce ed il punto più lontano del bacino [km];
- L_{net} : distanza, misurata lungo il reticolo idrografico, tra la foce e la sorgente [km].

Il calcolo dell'area e del perimetro viene eseguito direttamente a partire dal layer che descrive il bacino, utilizzando funzioni di geoprocessing di QGIS.

Le quote massima, minima e media vengono calcolate utilizzando, all'interno del codice Python, la plugin "zonal statistics". In particolare, la quota media è espressa dalla relazione:

$$H_{mean} = \frac{\sum_i z_i a_i}{A} \quad (1)$$

in cui z_i è la quota dell'area elementare di estensione a_i ed A è l'area totale del bacino.

Per quanto riguarda il calcolo della distanza euclidea L_e , l'algoritmo misura la distanza tra la sezione di foce e tutti i vertici del contorno del bacino. Ad ogni passo, la distanza calcolata viene confrontata con il valore calcolato al passo precedente, e solo il maggiore dei due valori viene conservato per il passo successivo. In tal modo, al termine della procedura, viene restituito il valore di distanza maggiore tra tutti quelli calcolati.

Per valutare la distanza L_{net} è necessario specificare la posizione della sorgente, secondo quanto discusso nei paragrafi precedenti.

Nel caso in cui si scelga per la sorgente il criterio della quota massima sul reticolo idrografico, il

tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS esegue i seguenti passi:

1. rasterizzazione del reticolo idrografico, eseguendo il tool di GRASS “v.to.rast.value”;
2. creazione di un layer raster mediante il tool di GRASS “r.mapcalculator”, intersecando il DEM con il reticolo rasterizzato. La formula utilizzata è: “ $if(isnull(A),null(),B)$ ”, in cui A =reticolo rasterizzato e B =DEM del bacino. Pertanto, il raster creato ha il valore del DEM nelle celle in cui è presente un elemento del reticolo idrografico, ed il valore NULL nelle altre celle;
3. lettura della massima quota del layer raster generato al precedente punto 2, richiamando il tool di GRASS “r.info”;
4. creazione di un nuovo layer raster in cui il valore è posto uguale a 1 nel punto in cui $z=z_{max}$, e pari a zero in tutti gli altri punti. Analogamente a quanto descritto nel punto 2, viene utilizzato il tool di GRASS “r.mapcalculator”. La formula utilizzata è: “ $if(A==z_{max},1,0/0)$ ”, in cui A =reticolo rasterizzato. In rari casi può capitare che i punti con quota pari a z_{max} siano due o più e si rende necessaria una correzione manuale;
5. vettorializzazione del layer raster generato al punto 4, richiamando il tool di GRASS “r.to.vect”. il risultato è un layer vettoriale costituito da un solo punto, che rappresenta la sorgente del reticolo (*highest source*).

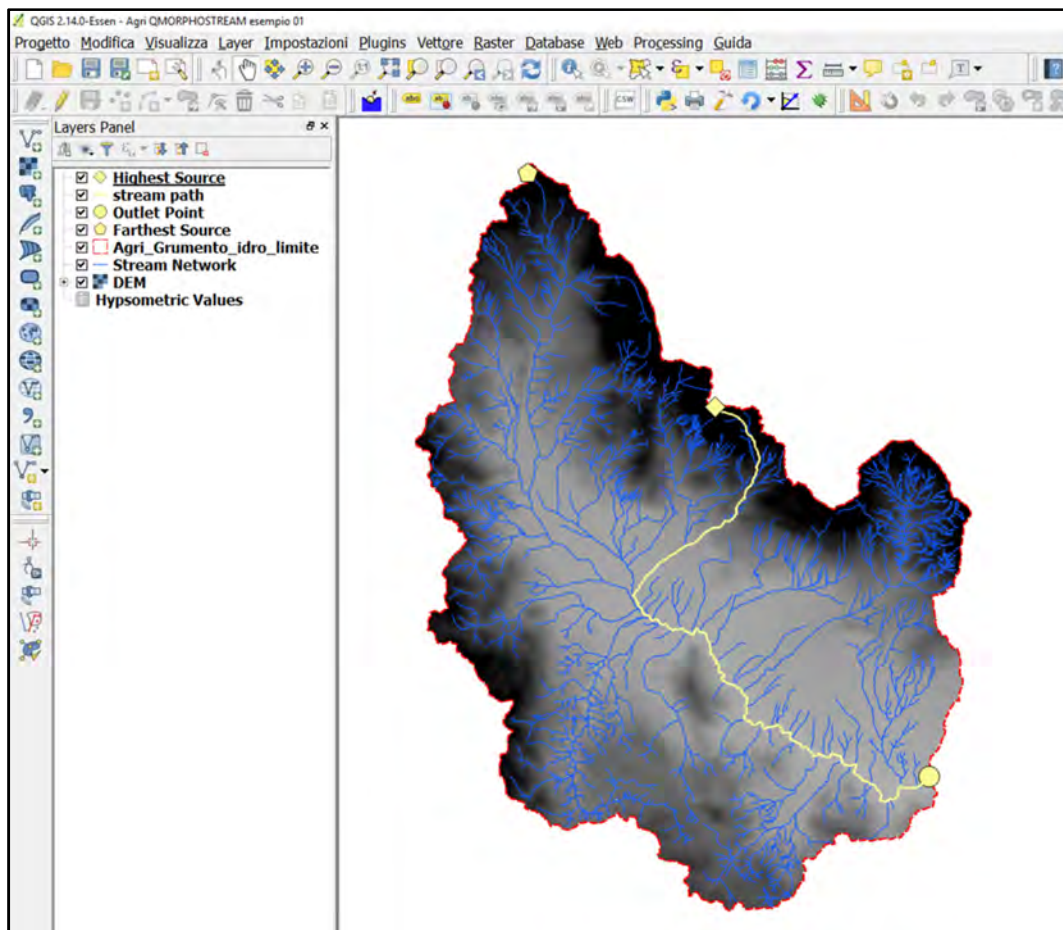


Fig. 9 – Al termine dell’esecuzione del tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS, sono aggiunti automaticamente alla mappa il punto sorgente ed il percorso lungo il reticolo fino alla foce

Indipendentemente dal criterio adottato per l’individuazione della sorgente, l’algoritmo sviluppato aggiunge il punto corrispondente alla mappa e valuta la distanza L_{net} richiamando il tool di GRASS “v.net.distance”. Il risultato è un layer di tipo linea corrispondente al percorso lungo il reticolo dalla sorgente alla foce, che viene aggiunto alla mappa, e di cui viene misurata la

lunghezza.

La Fig. 9 riporta una schermata della mappa QGIS al termine dell'esecuzione del tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS. Nel caso illustrato, la sorgente, individuata dal software mediante il criterio del punto più alto del reticolo, è stata aggiunta automaticamente alla mappa; inoltre, è evidenziato il percorso dalla sorgente alla foce lungo il reticolo idrografico. Nella mappa è riportata, per confronto, anche la posizione della sorgente definita con il criterio del percorso più lungo, come descritto nel paragrafo precedente.

Il tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS, inoltre, esegue l'analisi ipsometrica del bacino idrografico, la quale, secondo la definizione di Strahler [27], è lo studio di come l'area del bacino è distribuita rispetto alla sua quota.

Tale proprietà viene di solito descritta mediante una curva in cui a ciascun valore della quota z , riportato in ordinata, viene associato, in ascissa, l'estensione planimetrica a dell'area del bacino che si trova al di sopra di z . La procedura equivale concettualmente a misurare le aree risultanti dall'intersezione tra la superficie tridimensionale del bacino ed un piano orizzontale a quota z . Evidentemente, alla quota massima del bacino corrisponde un'area nulla, mentre alla quota minima corrisponde l'intera area A del bacino. In base a tali definizioni, l'area sottesa dalla curva rappresenta il volume del rilievo ed il suo rapporto con l'area del bacino è pari alla quota media H_{mean} .

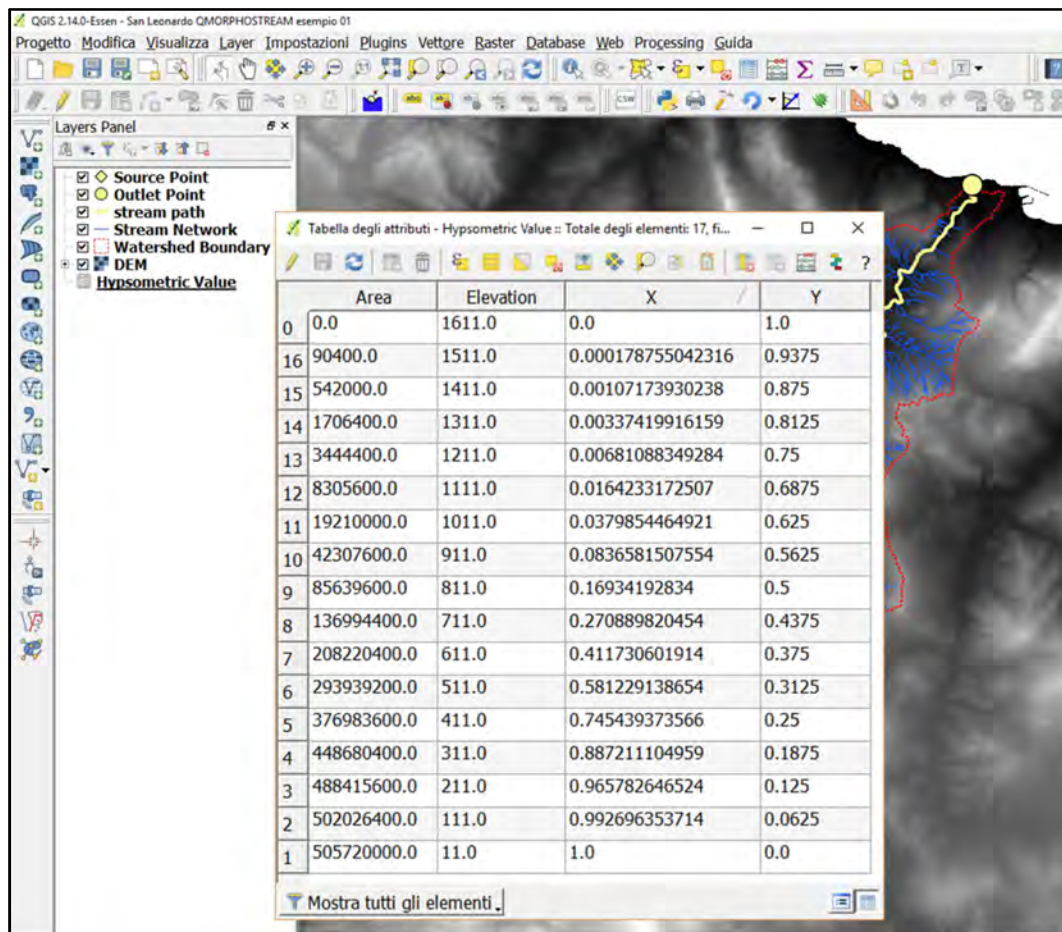


Fig. 10 – Risultati dell'analisi ipsometrica eseguita dal tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS

Normalmente, si utilizza una curva adimensionalizzata (curva ipsometrica) in cui in ascissa ed ordinata sono riportate, rispettivamente, le grandezze x ed y che, utilizzando la simbologia introdotta in precedenza, sono definite dalle seguenti formule:

$$x = \frac{a}{A} \quad (2)$$

$$y = \frac{z - H_{\min}}{H_{\text{range}}} \quad (3)$$

La Fig. 10 illustra i risultati dell'analisi ipsometrica relativa al fiume San Leonardo.

Dalle definizioni introdotte si evince che y è una funzione decrescente di x ; x ed y variano entrambe tra 0 ed 1, essendo $x=0$ per $y=1$ ed $x=1$ per $y=0$. L'area sottesa dalla curva ipsometrica prende il nome di integrale ipsometrico (H_y), definito come:

$$H_y = \int_0^1 x dy \quad (4)$$

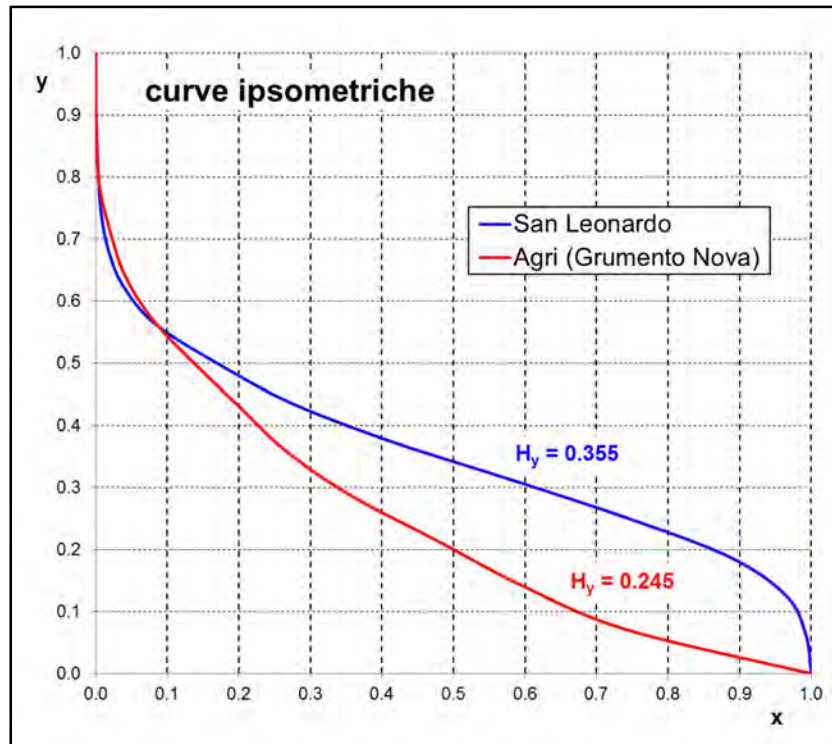


Fig. 11 – Curve ipsometriche, ricavate dal tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS

In Fig. 11 sono riportate le curve ipsometriche dei bacini esaminati, insieme ai valori calcolati degli integrali ipsometrici.

L'andamento della curva ipsometrica fornisce informazioni circa il grado di evoluzione morfologica del bacino idrografico dovuto al modellamento ad opera del deflusso fluviale. I bacini più “giovani” presentano curve con concavità verso il basso. I bacini in fase di evoluzione più matura sono descritti da curve a forma di S caratterizzate da una concavità verso l'alto per i valori più bassi di x , e da un punto di flesso che tende a spostarsi verso i valori più elevati di x al procedere del processo evolutivo, fino ad arrivare ad una fase di “senilità” (*monadnock*) in cui il processo erosivo ha sostanzialmente esaurito la sua azione. Tali considerazioni possono essere espresse in termini quantitativi attraverso la valutazione di parametri caratteristici e funzioni di distribuzione che descrivono la forma della curva [28].

Anche il valore dell'integrale, che esprime il volume del bacino in termini adimensionali, è indicativo dell'età morfologica. L'effetto dell'erosione fluviale induce una progressiva diminuzione dell'integrale ipsometrico, per cui i valori più elevati, e prossimi al valore massimo, teoricamente pari ad 1, corrispondono a bacini in fase iniziale, mentre valori inferiori corrispondono a bacini via via più evoluti. In generale, si assume che valori di $H_y > 0.6$ siano indicativi di bacini “giovani”, valori di H_y compresi, all'incirca, tra 0.3 e 0.6 corrispondano a bacini “maturi”, e, infine, valori inferiori a 0.3 indicano bacini in fase cosiddetta “senile” [27,29].

Dalla Fig. 11 si osserva che sia l'andamento delle curve, sia i valori di H_y sono indicativi, per il San Leonardo e l'Agri, rispettivamente, di un bacino in fase di evoluzione morfologica "matura" e di un bacino in fase "senile".

Il tool sviluppato esegue l'analisi ipsometrica richiamando automaticamente lo strumento di calcolo "curve ipsometriche" disponibile in QGIS. Successivamente, vengono calcolati i valori adimensionali x e y e, utilizzando funzioni di calcolo numerico disponibili nella libreria di Python SciPy [30], viene valutato l'integrale H_y . I parametri della curva ipsometrica vengono scritti in una tabella che viene aggiunta automaticamente al progetto QGIS.

6. ASSIGN STRAHLER ORDER

L'ordinamento gerarchico del reticolo idrografico costituisce un passo essenziale dell'analisi geomorfica. Il processo consiste nell'assegnare a ciascuna asta del reticolo (indicata anche con i termini segmento, ramo, o tratto) un numero d'ordine definito univocamente in base alla sua posizione nel reticolo ed alla sua connessione con gli altri tratti.

Nel lavoro qui presentato si utilizza il criterio di ordinamento gerarchico proposto da Strahler [2,3], riprendendo i concetti formulati da Horton [1]. In base a tale criterio, viene assegnato il numero di "ordine 1" ai rami del reticolo che non hanno affluenti a monte e si originano, quindi, da punti "sorgenti", intesi in senso topologico. Seguendo una struttura topologica ad albero binario, la confluenza di due rami di ordine 1 dà origine ad un ramo di "ordine 2"; due rami di ordine 2, intersecandosi a loro volta, danno origine ad un ramo di "ordine 3" e così via. Nel caso in cui si intersechino rami di ordine differente, al ramo effluente viene assegnato un ordine pari al maggiore tra gli ordini dei due rami influenti. Il maggiore tra i numeri d'ordine così calcolati definisce l'ordine del bacino e ad esso corrisponde un solo ramo, identificato come l'asta principale del reticolo fluviale.

Nel caso in cui un ramo di ordine i confluisce in un ramo di ordine $i+1$, la confluenza è definita "diretta"; invece, un ramo di ordine i che si immette in uno di ordine $i+2$ o superiore viene definito "anomalo" e la confluenza individua una cosiddetta "anomalia gerarchica".

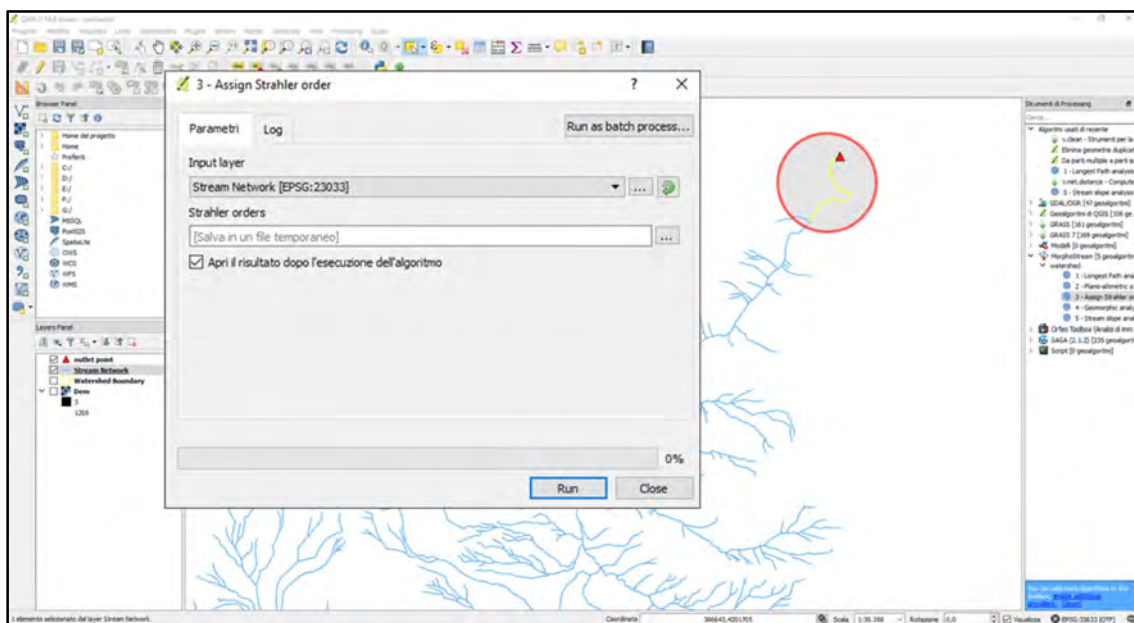


Fig. 12 – Interfaccia utente del tool ASSIGN STRAHLER ORDER. L'unico dato di input è il layer che descrive il reticolo idrografico. Il tratto terminale del reticolo (indicato nel cerchio) deve essere selezionato dall'utente

Il tool ASSIGN STRAHLER ORDER esegue l'ordinamento gerarchico del reticolo fluviale secondo il criterio di Strahler. Il software è stato implementato adattando ed estendendo il codice del plugin "Strahler", sviluppato da Delahaye [31] e disponibile nel repository ufficiale di QGIS.

Come si può osservare dalla Fig. 12, l'esecuzione richiede come unico dato di input il layer del reticolo idrografico, in cui l'utente deve selezionare il tratto identificato come asta terminale, e da cui l'algoritmo inizia il processo di calcolo, procedendo idealmente verso monte lungo il reticolo. Si osserva che il calcolo dei numeri di ordine viene condotto secondo criteri esclusivamente topologici, senza considerare gli aspetti idraulici e l'altimetria del bacino.

La Fig. 13 illustra una schermata al termine dell'esecuzione del tool. Il risultato è un nuovo layer costituito dalle stesse geometrie (feature) del layer reticolo idrografico. A ciascun elemento è però associato il valore calcolato della lunghezza (espressa in km) e del numero d'ordine di Strahler, come si può osservare dalla tabella degli attributi. Il nuovo layer è automaticamente aggiunto alla

mappa e categorizzato in base al valore del numero d'ordine di Strahler.

Il layer generato viene utilizzato dai successivi tool di QMorphoStream per il calcolo dei parametri geomorfici.

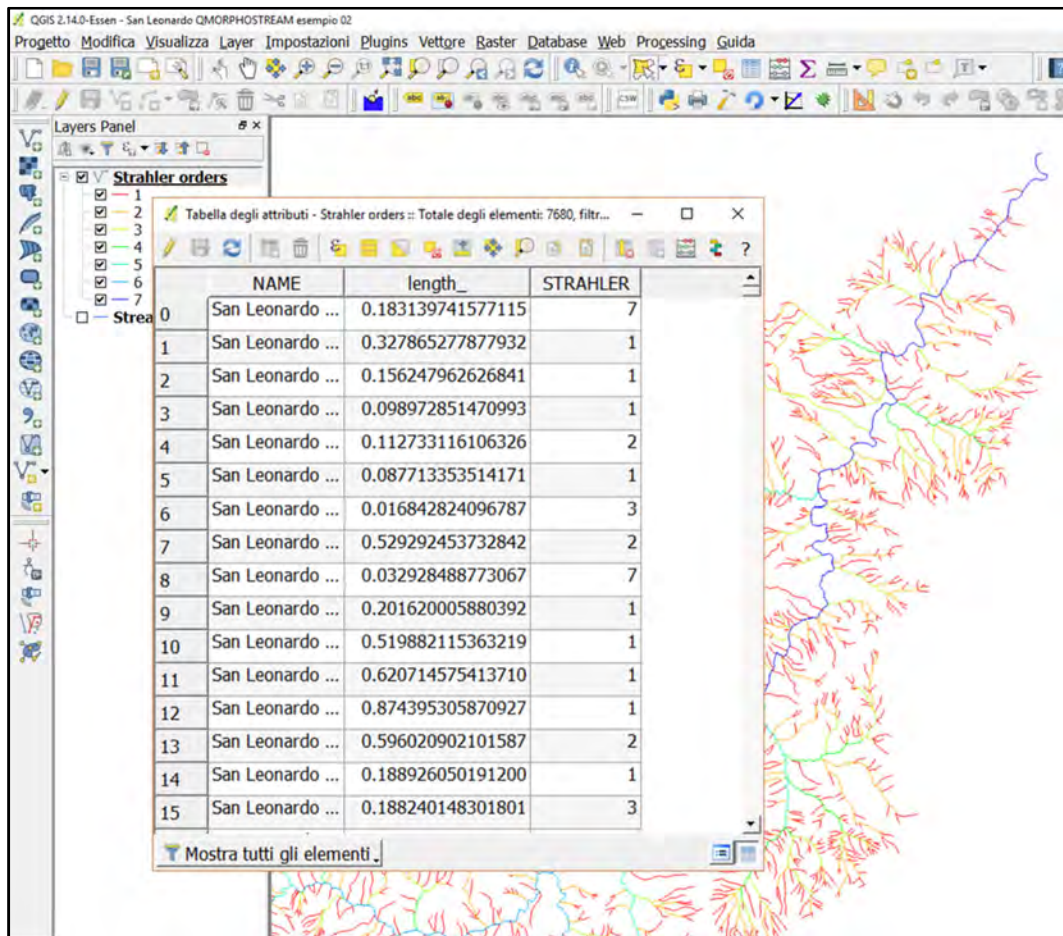


Fig. 13 – Risultato dell'esecuzione del tool ASSIGN STRAHLER ORDER

7. GEOMORPHIC ANALYSIS

Il tool GEOMORPHIC ANALYSIS processa i risultati dei tool già eseguiti in precedenza e calcola i principali parametri geomorfici, che vengono scritti in tabelle aggiunte automaticamente alla mappa.

I dati di input sono rappresentati dal contorno del bacino elaborato dal tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS e dal reticolo idrografico elaborato dal tool ASSIGN STRAHLER ORDER. I layer così elaborati includono le informazioni geometriche ed orografiche e l'ordinamento gerarchico necessari al calcolo dei parametri geomorfici.

L'interfaccia utente del tool è illustrata in Fig. 14.

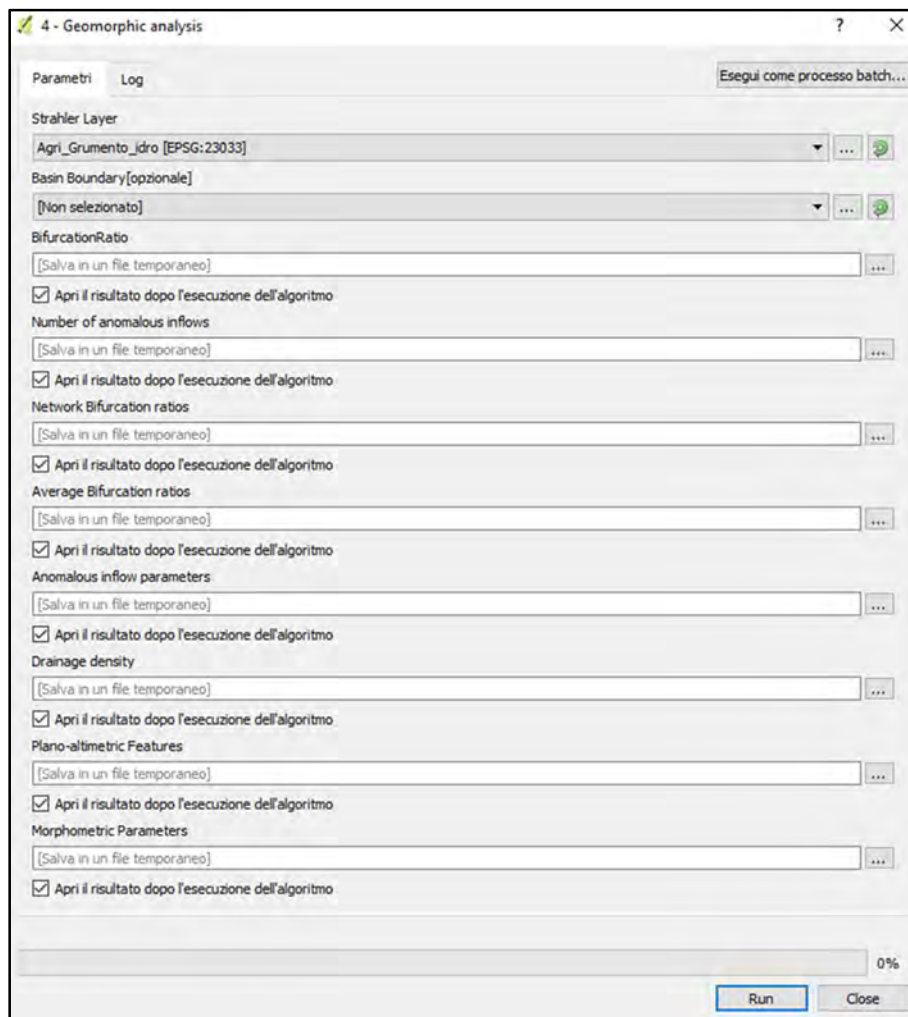


Fig. 14 – Interfaccia utente del tool GEOMORPHIC ANALYSIS

Nel calcolo dei parametri geomorfici, un aspetto di particolare criticità è rappresentato dalla corretta identificazione delle intersezioni tra le varie aste che compongono il reticolo fluviale descritto dal layer di input. Questo problema nasce dalle modalità di digitalizzazione del reticolo, spesso eseguita manualmente, il che induce l'utente ad interrompere in modo non prevedibile il tracciamento delle singole linee di deflusso. Pertanto, una singola asta fluviale, definita idraulicamente come un tratto compreso tra due confluenze (o tra una "sorgente" e la confluenza più vicina), può essere in realtà rappresentato da un numero arbitrario di feature, che non può essere previsto a priori.

È stato, quindi, necessario ideare ed implementare una procedura specifica per identificare, nel reticolo idrografico, le feature che idraulicamente rappresentano un unico ramo del reticolo, distinguendo così i "falsi nodi" dalle reali intersezioni da considerare ai fini dell'analisi geomorfica.

La soluzione adottata consiste nel raggruppare le feature che idraulicamente appartengono alla medesima asta mediante un codice numerico generato automaticamente. Analogamente al tool ASSIGN STRAHLER ORDER, l'algoritmo scorre tutte le feature a partire dalla foce, procedendo verso monte e seguendo le varie ramificazioni del reticolo. Nel caso in cui si incontrano due feature dello stesso ordine aventi un punto in comune in cui non sono presenti ulteriori connessioni, l'algoritmo genera un valore del codice numerico GROUP e lo assegna ad entrambe le feature. La procedura viene ripetuta fino ad incontrare una connessione con un segmento di ordine differente. In tutti i calcoli successivi, le feature con il medesimo codice GROUP vengono considerate come un unico segmento. Tali elementi sono evidenziati in giallo nella Fig. 15.

La procedura descritta si applica anche nel caso in cui un'asta riceve, lungo il suo percorso, contributi da parte di aste di ordine inferiore. In tal caso, anche se i nodi lungo l'asta rappresentano, effettivamente, connessioni del reticolo, i vari segmenti che si originano da essi devono essere considerati ai fini dei calcoli come una singola asta. Tali elementi sono evidenziati in grigio nella Fig. 15.

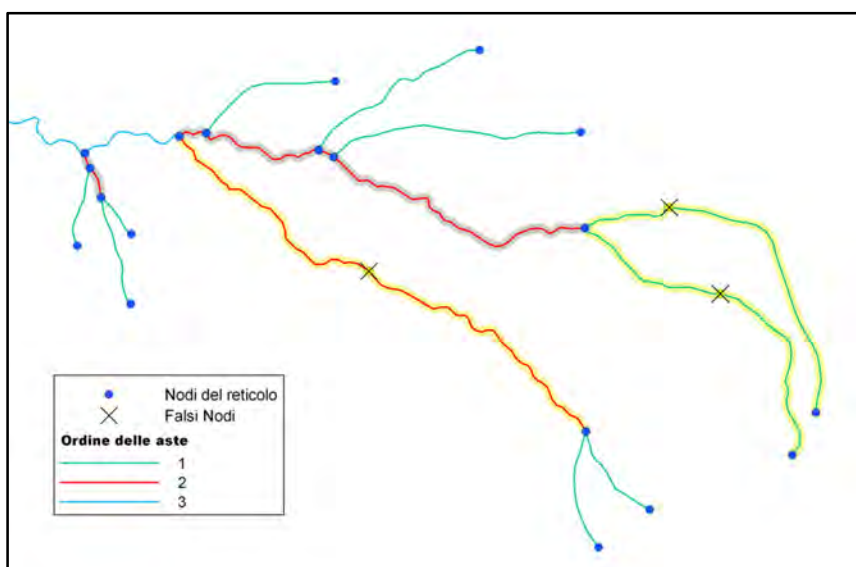


Fig. 15 – Particolare del reticolo idrografico, in cui sono presenti i falsi nodi generati durante la digitalizzazione. Sono evidenziate le aste del reticolo composte da più feature, che vengono raggruppate dall'algoritmo di calcolo

La Fig. 16 illustra la tabella associata al layer generato, in cui sono presenti i seguenti attributi:

- GROUP: è il codice che identifica il gruppo, come descritto sopra. Nel caso in cui l'asta è composta da una singola feature, non viene associata ad alcun gruppo e pertanto il valore in tabella è NULL;
- N_{ai} : è il codice che identifica un'anomalia gerarchica, costituito da due numeri separati da una virgola. Il primo numero indica l'ordine dell'asta recipiente, il secondo l'ordine dell'asta influente. Il valore, pertanto, è sempre del tipo (r,i) , con $r \geq i+2$. Se la confluenza è diretta, il valore in tabella è NULL;
- N_{du} : è il codice che identifica una confluenza diretta, costituito da due numeri separati da una virgola. Il valore è sempre del tipo $(i+1,i)$, essendo i il numero d'ordine dell'asta incidente. Se la confluenza è anomala, il valore in tabella è NULL;

Nei casi di aste composte da più feature raggruppate, il codice N_{ai} o N_{di} viene attribuito, per semplicità ed efficienza di calcolo, solo alla feature che interseca l'asta di livello superiore. Per tutte le altre feature del gruppo, il valore in tabella è NULL.

Una volta eseguita la procedura descritta, l'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

1. conteggio delle aste per ciascun valore dell'ordine i ;
2. conteggio, per ciascun valore dell'ordine i , delle aste con confluenza "diretta" cioè che

- drenano in aste di ordine $i+1$;
3. conteggio delle aste “anomale”, cioè delle aste di ordine i che drenano in aste di ordine r , con $r \geq i+2$;
 4. calcolo dei parametri geomorfici.

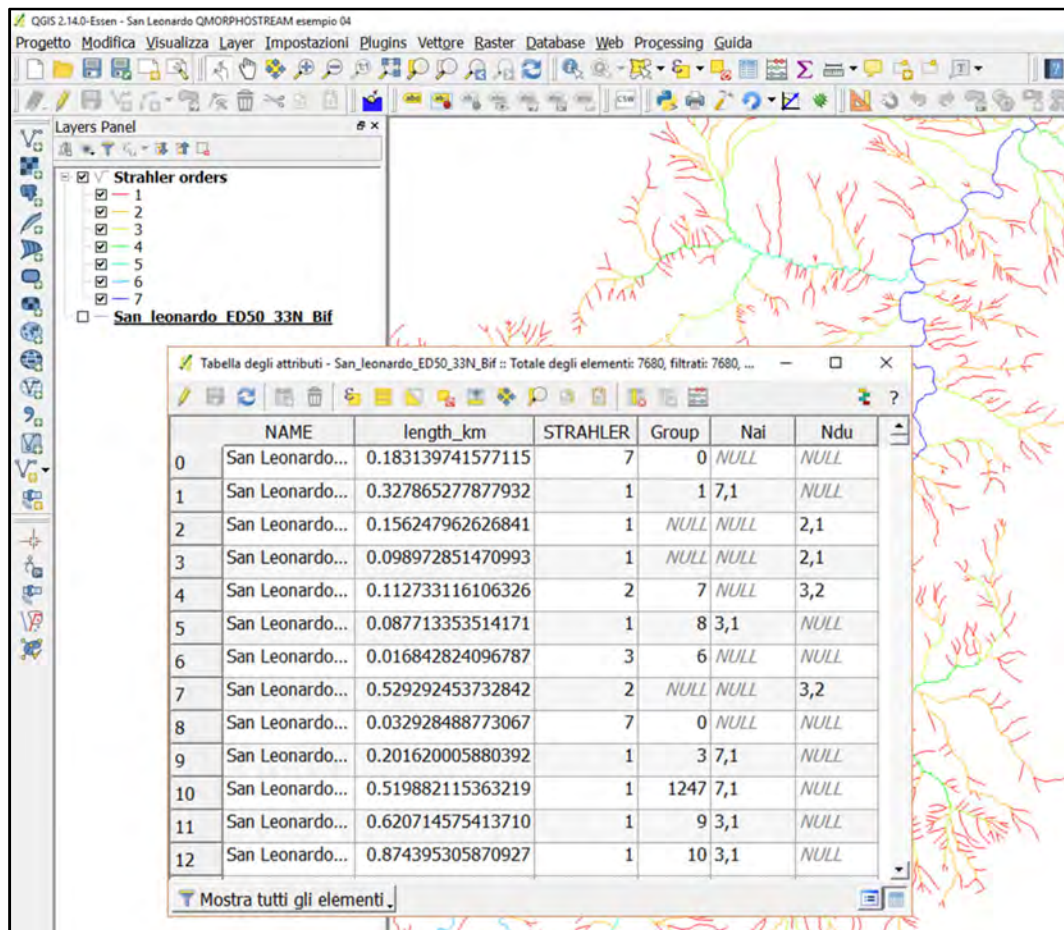


Fig. 16 – Analisi del reticolo idrografico, con individuazione delle aste anomale o a confluenza diretta

I parametri geomorfici sono scritti in tabelle che vengono aggiunte automaticamente alla mappa.

La Fig. 17 illustra una mappa al termine delle elaborazioni, in cui sono evidenziate le tabelle PLANO_ALTOMETRIC_FEATURES e NUMBER_OF_ANOMALOUS_INFLOWS. La prima tabella riporta i parametri calcolati dal tool PLANO-ALTIMETRIC ANALYSIS descritto in precedenza; la seconda tabella riporta il numero delle confluenze anomale. In particolare, per ciascun valore di i nell'intervallo $[1, i_{\max}-2]$, viene riportato il numero di aste anomale N_{ai} che confluiscono in aste di ordine $r \geq i+2$. Nell'esempio riportato in figura, l'ordine massimo delle aste è 7, e pertanto le aste anomale incidenti hanno ordine compreso tra 1 e 5, e drenano in aste di ordine da 3 a 7.

I contenuti delle altre tabelle generate dall'applicazione eseguita sono riportati nel seguito. Per i parametri dimensionali, sono riportate le unità di misura (u.m.) in cui viene restituito il risultato.

SIMBOLO	U.M.	DEFINIZIONE DEL PARAMETRO
Tabella NETWORK BIFURCATION RATIOS		
N_i		Numero di aste di ordine i del reticolo idrografico
Nd_i		Numero di aste di ordine i a confluenza diretta

Rb_i		Rapporto di biforcazione $Rb_i = \frac{N_i}{N_{i+1}}$
Rbd_i		Rapporto di biforcazione diretta $Rbd_i = \frac{Nd_i}{N_{i+1}}$
R_i		Indice di biforcazione $R_i = Rb_i - Rbd_i$
Tabella AVERAGE BIFURCATION RATIOS		
Rb_{arit}		Media aritmetica dei rapporti di biforcazione, calcolata come: $Rb_{pon} = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}-1} Rb_i}{i_{max} - 1}$
Rbd_{arit}		Media aritmetica dei rapporti di biforcazione diretta Rbd_i
R_{arit}		Media aritmetica degli indici di biforcazione R_i
Rb_{pon}		Media pesata dei rapporti di biforcazione, espressa da: $Rb_{pon} = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}-1} (N_i + N_{i+1}) Rb_i}{\sum_{i=1}^{i_{max}-1} (N_i + N_{i+1})}$
Rbd_{pon}		Media pesata dei rapporti di biforcazione diretta Rbd_i
R_{pon}		Media pesata degli indici di biforcazione R_i
Tabella ANOMALOUS INFLOW PARAMETERS		
N_a		Numero di anomalia gerarchica: $N_a = \sum_{i=1}^{i_{max}-2} \sum_{r=i+2}^{i_{max}} Na_{i,r} \cdot f_{i,r}$ con $f_{i,r} = 2^{r-2} - 2^{i-1}$ per $i \leq r-2$, in cui $Na_{i,r}$ è il numero di aste di ordine i che drenano in aste di ordine r
I_a		Indice di anomalia gerarchica: $I_a = \frac{N_a}{N_1}$, in cui N_1 è il numero di aste di ordine 1
D_a	km^{-2}	Densità di anomalia gerarchica: $D_a = \frac{N_a}{A}$
Tabella DRAINAGE DENSITY		
L_{tot}	km	Sviluppo lineare complessivo, pari alla somma della lunghezza di tutte le aste del reticolo
F_s	km^{-2}	<i>Stream frequency</i> , data dal rapporto $F_s = \frac{N}{A}$ in cui N è il numero totale di aste del reticolo
D_d	km^{-1}	Densità di drenaggio, data dal rapporto $D_d = \frac{L_{tot}}{A}$
$SQRT_D_d$		Densità di drenaggio modificata, data dal rapporto: $SQRT_D_d = \frac{L_{tot}}{\sqrt{A}}$

Tabella MORPHOMETRIC PARAMETERS		
H_f		Coefficiente orografico di Fournier $H_f = H_{mean} \cdot \tan \alpha$, in cui $\tan \alpha = \frac{H_{mean}}{A}$
H_y		Integrale ipsometrico
R_c		Rapporto di circolarità, ovvero il rapporto tra l'area del bacino e l'area del cerchio di circonferenza uguale al perimetro del bacino
R_h		Rapporto di rilievo: $R_h = \frac{H_{range}}{L_e}$
R_e		Rapporto di elongazione $R_e = \frac{D_c}{L_e}$, in cui D_c è il diametro del cerchio di area equivalente a quella del bacino

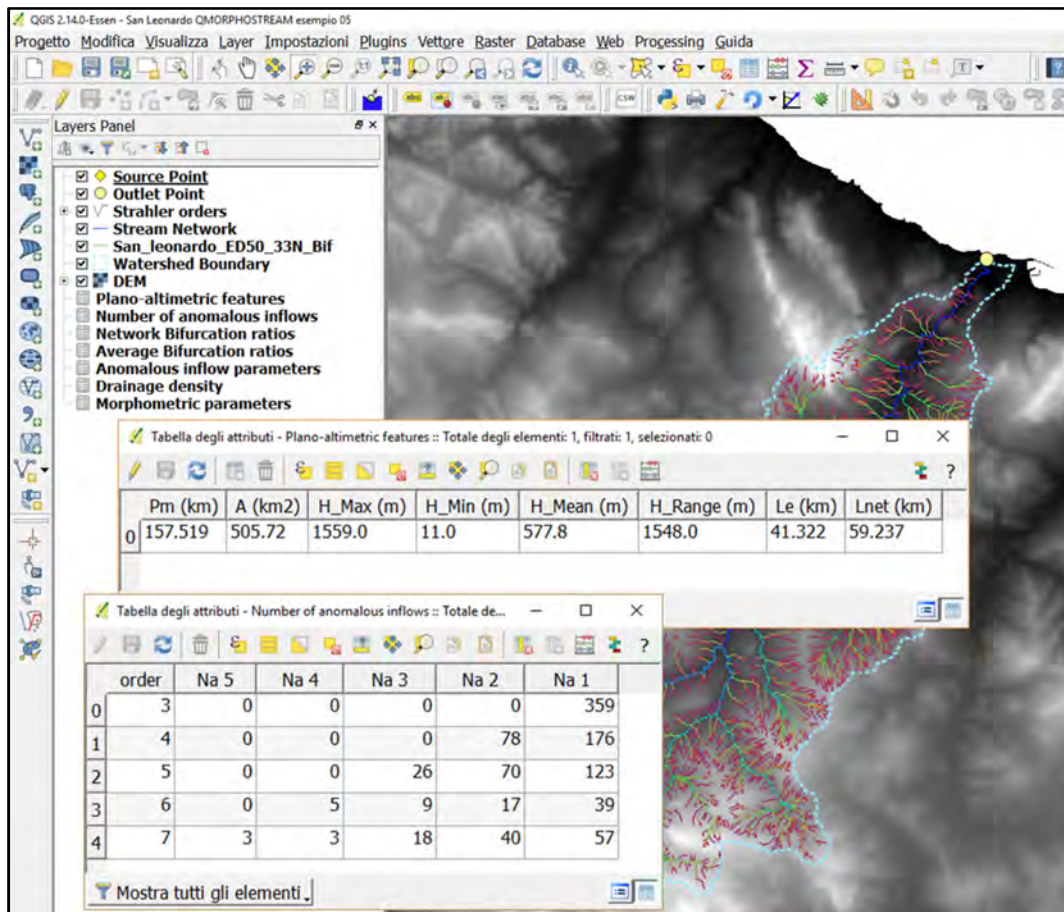


Fig. 17 – Risultati ottenuti dal tool GEOMORPHIC ANALYSIS. Sono illustrati, in particolare, i contenuti delle tabelle PLANO-ALTIMETRIC FEATURES e NUMBER OF ANOMALOUS INFLOWS

Si può osservare che i rapporti di biforcazione sono relativi alle aste di un particolare valore i dell'ordine di Strahler, mentre gli altri parametri sono da considerarsi descrittivi dell'intero bacino o reticolo.

Nella Fig. 18 è illustrata una schermata relativa all'applicazione del tool al bacino del fiume San

Leonardo, in cui sono evidenziate le tabelle contenenti gli output descritti in precedenza.

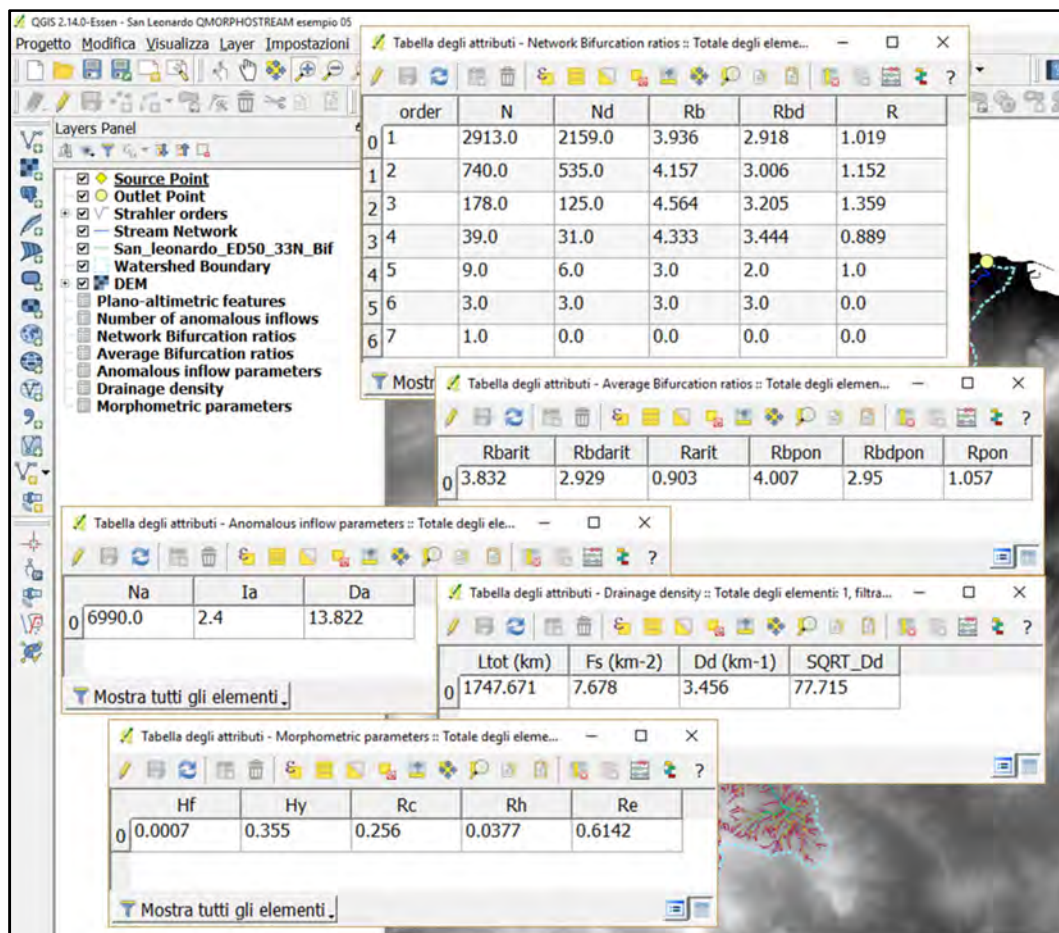


Fig. 18 – Risultati ottenuti dal tool GEOMORPHIC ANALYSIS. Sono illustrati, in particolare, i contenuti delle tabelle NETWORK BIFURCATION RATIOS, AVERAGE BIFURCATION RATIOS, ANOMALOUS INFLOW PARAMETERS, DRAINAGE DENSITY e MORPHOMETRIC PARAMETERS

8. STREAM SLOPE ANALYSIS

Il tool STREAM SLOPE ANALYSIS esegue il calcolo della pendenza delle varie aste del reticolo. I dati di input sono costituiti dal DEM del bacino e dal reticolo idrografico già elaborato dal tool GEOMORPHIC ANALYSIS.

L'interfaccia utente del tool è illustrata in Fig. 19.

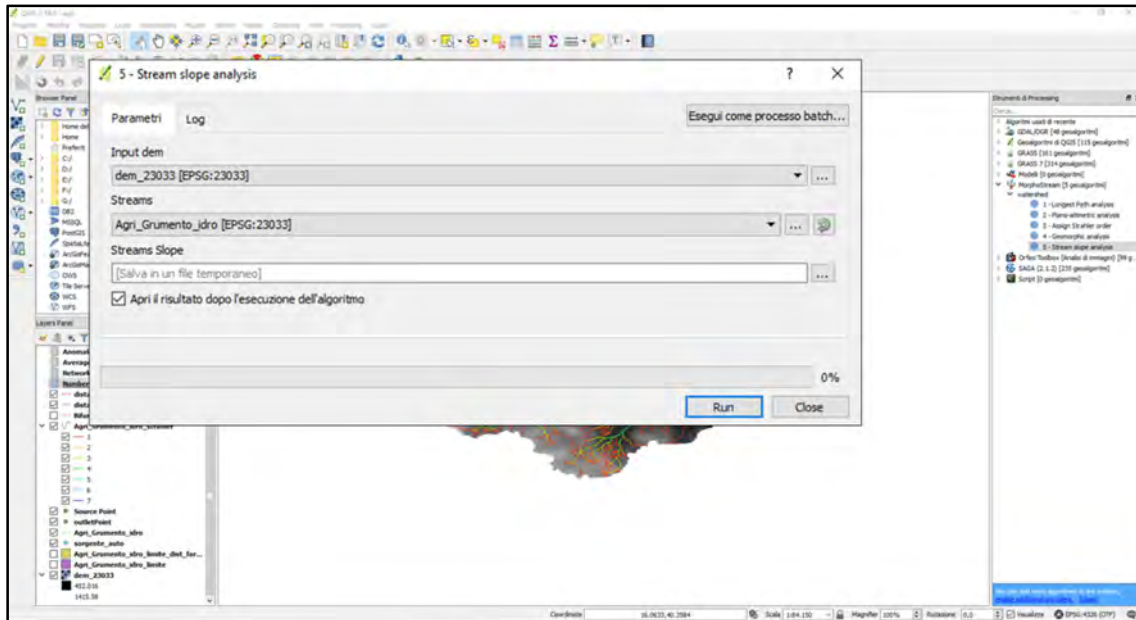


Fig. 19 – Interfaccia utente del tool STREAM SLOPE ANALYSIS

I passi eseguiti per il calcolo delle pendenze di ogni asta sono i seguenti:

1. creazione di un layer temporaneo a cui vengono aggiunte le feature componenti l'asta;
2. calcolo della lunghezza dell'asta L_s ;
3. creazione del raster "feat_rast" che corrisponde all'asta in esame rasterizzata, mediante il tool di GRASS "v.to.rast.value";
4. creazione di un layer raster mediante il tool di GRASS "r.mapcalculator", intersecando il DEM con l'asta del reticolo rasterizzato. La formula utilizzata è: " $if(isnull(A), null(), B)$ ", in cui $A=feat_rast$ e $B=DEM$ del bacino. Pertanto, il raster creato ha il valore del DEM nelle celle in cui è presente l'asta, ed il valore NULL nelle altre celle;
5. lettura della massima e minima quota, rispettivamente, z_{Smax} e z_{Smin} del layer raster generato al precedente punto 3, richiamando il tool di GRASS "r.info";
6. calcolo della pendenza media dell'asta, espressa dal rapporto: $S_s = \frac{z_{Smax} - z_{Smin}}{L_s}$.

I risultati vengono riportati in una tabella, automaticamente aggiunta alla mappa, in termini di media delle pendenze delle aste di ciascun ordine, come illustrato in Fig. 20.

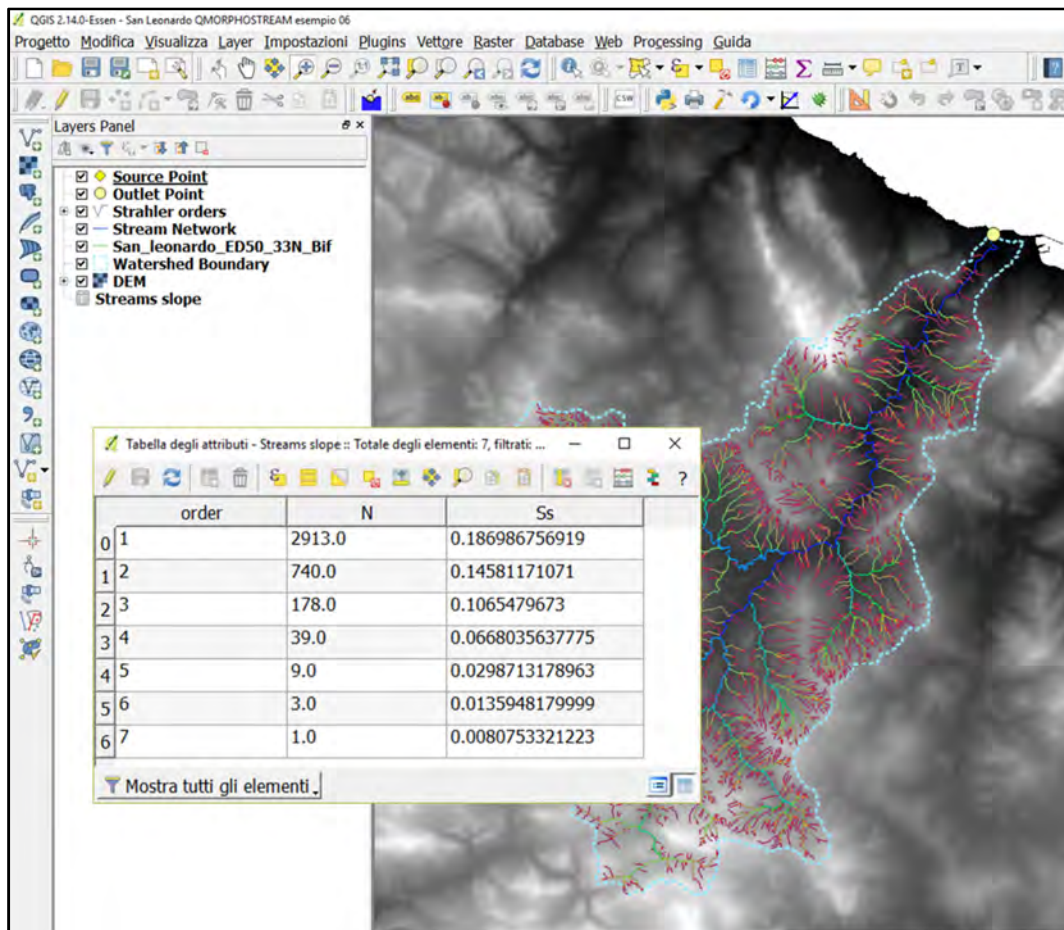


Fig. 20 – Risultati ottenuti dal tool STREAM SLOPE ANALYSIS

9. RISULTATI E CONCLUSIONI

Nella Tab. 1 sono sintetizzati i principali parametri globali risultanti dell'analisi geomorfica dei bacini dei fiumi San Leonardo e Agri. Per entrambi i bacini esaminati, il numero massimo dell'indice di Strahler, cioè l'ordine del bacino, è pari a 7.

Sono, inoltre, riportati nelle Tab. 2-6 i parametri descrittivi dell'ordinamento del bacino, delle anomalie gerarchiche e delle pendenze medie corrispondenti ai diversi valori dell'indice di Strahler.

Parametro	San Leonardo	Agri (Grumento Nova)
PARAMETRI PLANO-ALTIMETRICI		
P_m	157,519 km	97,758 km
A	505,72 km ²	275,61 km ²
H_{max}	1559,0 m	1830,0 m
H_{min}	11,0 m	529,0 m
H_{mean}	577,8 m	873,2 m
H_{range}	1548,0 m	1301,0 m
L_e	41,322 km	24,816 km
L_{net}	59,237 km	26,642 km
RAPPORTI MEDI DI BIFORCAZIONE		
Rb_{arit}	3,832	3,366
Rbd_{arit}	2,929	2,695
R_{arit}	0,903	0,671
Rb_{pon}	4,007	3,766
Rbd_{pon}	2,95	2,88
R_{pon}	1,057	0,886
PARAMETRI DI ANOMALIA GERARCHICA		
N_a	6990	2654
I_a	2,400	1,882
D_a	13,822	9,630
PARAMETRI DI DRENAGGIO		
L_{tot}	1747,671 km	791,351 km
F_s	7,678 km ⁻²	6,966 km ⁻²
D_d	3,456 km ⁻¹	2,871 km ⁻¹
$SQRT_D_d$	77,715	47,667
PARAMETRI MORFOMETRICI		
H_f	0,0007	0,0028
H_y	0,355	0,245
R_c	0,2560	0,3622
R_h	0,0377	0,0737
R_e	0,6142	0,7551

Tab. 1 – Parametri geomorfici calcolati per i bacini del San Leonardo e dell'Agri

San Leonardo					
r	$N_a(r,5)$	$N_a(r,4)$	$N_a(r,3)$	$N_a(r,2)$	$N_a(r,1)$
3					359
4				78	176
5			26	70	123
6		5	9	17	39
7	3	3	18	40	57

Tab. 2 – Numero di aste anomale conteggiate per il fiume San Leonardo

Agri (Grumento Nova)					
<i>r</i>	$N_a(r,5)$	$N_a(r,4)$	$N_a(r,3)$	$N_a(r,2)$	$N_a(r,1)$
3					183
4				53	72
5			10	20	28
6		2	6	7	30
7	3	3	3	8	23

Tab. 3 – Numero di aste anomale conteggiate per il fiume Agri

San Leonardo					
<i>ordine</i>	<i>N</i>	N_d	R_b	R_{bd}	<i>R</i>
1	2913	2159	3,936	2,918	1,019
2	740	535	4,157	3,006	1,152
3	178	125	4,564	3,205	1,359
4	39	31	4,333	3,444	0,889
5	9	6	3,000	2,000	1,000
6	3	3	3,000	3,000	0
7	1				

Tab. 4 – Parametri di biforcazione per il fiume San Leonardo

Agri (Grumento Nova)					
<i>ordine</i>	<i>N</i>	N_d	R_b	R_{bd}	<i>R</i>
1	1410	1074	3,821	2,911	0,911
2	369	281	3,690	2,810	0,880
3	100	81	3,571	2,893	0,679
4	28	23	3,111	2,556	0,556
5	9	6	3,000	2,000	1,000
6	3	3	3,000	3,000	0
7	1				

Tab. 5 – Parametri di biforcazione per il fiume Agri

<i>ordine</i>	San Leonardo		Agri (Grumento Nova)	
	<i>N</i>	S_s	<i>N</i>	S_s
1	2913	0,186986757	1410	0,275922892
2	740	0,145811711	369	0,208978043
3	178	0,106547967	100	0,158832058
4	39	0,066803564	28	0,096578226
5	9	0,029871318	9	0,044407250
6	3	0,013594818	3	0,015863973
7	1	0,008075332	1	0,003069039

Tab. 6 – Pendenze medie

Ai fini del calcolo della distanza L_{net} , le sorgenti sono state definite, per entrambi i bacini, adottando il criterio del punto del reticolo posto alla quota più elevata.

Il toolset QMorphoStream è ancora in fase di test, e pertanto i risultati presentati devono essere considerati a solo scopo di esempio.

Sono state condotte, tuttavia, alcune prove preliminari per la validazione degli algoritmi sviluppati. A tale scopo, sono stati utilizzati bacini e reticoli di piccole dimensioni e con un numero di aste compreso tra 500 e 1000. Per tali bacini, i risultati ottenuti tramite QMorphoStream sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante tecniche manuali o semi-automatiche. In particolare,

l'ordinamento del reticolo e l'individuazione delle anomalie è stata compiuta conteggiando ed analizzando individualmente le singole aste, mentre i parametri dimensionali sono stati calcolati utilizzando in maniera manuale le funzioni di geoprocessing di QGIS. Infine, i parametri geomorfici sono stati calcolati utilizzando un foglio di calcolo.

I risultati dei test preliminari condotti hanno avuto esito positivo. Saranno eseguite, nell'immediato futuro, ulteriori prove su un set più ampio di bacini di dimensioni maggiori.

Attraverso l'utilizzo di QMorphoStream sarà possibile eseguire l'analisi geomorfica quantitativa su un ampio numero di bacini del territorio nazionale per i quali sono disponibili misure idrologiche e di portata torbida. In tal modo, sarà possibile investigare le correlazioni esistenti tra i parametri geomorfici ed i dati storici allo scopo di derivare metodi e formule per la previsione del trasporto solido a scala di bacino.

L'utilizzo di QMorphoStream potrebbe, inoltre, suggerire modifiche ed ulteriori implementazioni dei tool, allo scopo, ad esempio, di ottimizzare l'interfaccia utente e l'efficienza degli algoritmi, o estendere il set di parametri calcolati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Horton, R.E., 1945. "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative analysis", *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, pp. 275–370.
- [2] Strahler, A.N., 1952. "Dynamic basis of geomorphology", *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, pp. 923–938.
- [3] Strahler, A.N., 1957. "Quantitative analysis of watershed geomorphology", *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), pp. 913–920.
- [4] Anderson, H.W., 1957. "Relating sediment yield to watershed variables", *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), pp. 921–924.
- [5] Stall, J.B., Bartelli, L.J., 1959. *Correlation of reservoir sedimentation and watershed factors. Springfield Plain, Illinois*, Illinois State Water Survey, Urbana, IL, USA.
- [6] Avena, G.C., Giuliano, G., Lupia Palmieri, E., 1967. "Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali", *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 86, pp. 781–796.
- [7] Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F., 1980, "Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali", *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 99, pp. 455–516.
- [8] Lupia Palmieri, E., 1983. "Il problema della valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali" Atti XXIII Congresso Geografico Italiano, Catania, maggio 1983, pp. 143–176.
- [9] Grauso, S., 1986. *Analisi geomorfica quantitativa: un contributo alla descrizione e qualificazione dell'ambiente*, RT/PAS/86/6, Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Roma.
- [10] Grauso, S., Pagano, A., Fattoruso, G., De Bonis, P., Onori, F., Regina, P., Tebano, C., 2008. "Relation between climatic-geomorphical parameters and sediment yield in a Mediterranean semi-arid area (Sicily, southern Italy)", *Environmental Geology*, 54, pp. 219–234.
- [11] Wuttichaikitcharoen, P., Babel, M.S., 2014. "Principal component and multiple regression analyses for the estimation of suspended sediment yield in ungauged basins of northern Thailand", *Water*, 6, pp. 2412–2435.
- [12] Genchi, S.A., Vitale, A.J., Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C., 2016. "Geomorphometric assessment of drainage systems in a semi-arid region of Argentina using geospatial tools and multivariate statistics", *Earth Science Informatics*, 9(3), pp. 309–324.
- [13] Blasi, L., Grauso, S., Marzocchi, S., 1990. *Automazione delle procedure di analisi geomorfica quantitativa mediante utilizzo di un sistema informativo geografico*, RT/AMB/90/31, Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Roma.
- [14] Gigli, C., Miniero, O., Grauso, S., Polizzano, C., Aurelio, V., Oliveri, F., Marzocchi, S., 1991. *ELISA e GEOMORF. Un sistema informativo territoriale ambientale e un applicativo idrografico come sua evoluzione*, RT/AMB/90/42, Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Roma.
- [15] De Bonis, P., Fattoruso, G., Grauso, S., Peloso, A., Regina, P., 2002. "Computation of geomorphic parameters via G.I.S.-based algorithms: a support tool in river basin management", Proceedings of International Conference: New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life. Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments, Capri, giugno 2002.
- [16] Sarangi, A., Madramootoo, C.A., Enright, P., 2003. "Development of User Interface in ArcGIS for Estimation of Watershed Geomorphology", Meeting of Canadian Society for Engineering

in Agricultural, Food, and Biological Systems, Montréal, Canada, luglio 2003.

- [17] Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Azor, A., 2009. “CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain”, *Computers & Geosciences*, 35, pp. 1214–1223.
- [18] Langen, G., Griffith, J., 2012. “Alternative method for automatic coding of stream order”, ESRI International User Conference, San Diego, CA, USA, luglio 2012.
- [19] *GIS mapping software, solutions, services, map apps, and data*, ESRI, <http://www.esri.com> (accesso effettuato il 26/10/2016).
- [20] Dorillo, I., 2010. *r.geomorphic.py: un algoritmo per il calcolo dei parametri dell'analisi geomorfica quantitativa. Un'applicazione al torrente Fersinone (Bacino del F. Tevere, Umbria centrale)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Perugia.
- [21] Jasiewicz, J., Metz, M., 2011. “A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks”, *Computers & Geosciences*, 37, pp. 1162–1173.
- [22] Abera, W., Antonello, A., Franceschi, S., Formetta, G., Rigon, R., 2014. “The uDig spatial toolbox for hydro-geomorphic analysis”, *Geomorphological Techniques*, 2(4.1), pp. 1–19.
- [23] *QGIS. A free and open source Geographic Information System*, Open Source Geospatial Foundation Project, <http://www.qgis.org> (accesso effettuato il 26/10/2016).
- [24] Neteler, M., Bowman, M.H., Landa, M., Metz, M., 2012. “GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS”, *Environmental Modelling & Software*, 31, pp. 124–130.
- [25] QGIS Development Team, 2016. *PyQGIS developer cookbook*.
- [26] Tebano, C., Pasanisi, F., Grauso, S. “QMorphoStream: processing tools in QGIS environment for the quantitative geomorphic analysis of watersheds and river networks”, sottoposto a: *Earth Science Informatics* (under review).
- [27] Strahler, A.N., 1952. “Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography”, *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, pp. 1117–1142.
- [28] Harlin, J. M., 1978. “Statistical moments of the hypsometric curve and its density function”, *Mathematical Geology*, 10(1), pp. 59–72.
- [29] Singh, O., Sarangi, A., and Sharma, M.C., 2008. “Hypsometric integral estimation methods and its relevance on erosion status of north-western lesser Himalayan watersheds”, *Water Resource Management*, 22, pp. 1545–1560.
- [30] *Numpy and Scipy Documentation*, <http://docs.scipy.org/doc> (accesso effettuato il 29/02/2016).
- [31] Delahaye, A., *Strahler plugin for QGIS*, <https://github.com/ArMoraer/QGISStrahler> (accesso effettuato il 29/02/2016).

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
novembre 2016