

**VALUTAZIONE DELLA GEODIVERITA'
TRAMITE APPLICAZIONI GIS**

Dr.ssa Francesca Vergari

**Tutor: Dr. Paolo Gasparri
Ing. Martina Bussettini
Arch. Angelo Lisi**

PREFAZIONE

I termini Geositi, Geodiversità e Geoconservazione hanno una storia piuttosto recente. Nel 1993 Sharples introduce per la prima volta il termine “geodiversità” e solo nel 1995 W. A. Wimbledon fornisce la prima definizione di “geosito” come qualsiasi "località, area o territorio dove sia possibile definire un interesse geologico o geomorfologico per la conservazione". Anche se la tutela e la conservazione di siti, ambiti e paesaggi a valenza principalmente geologica viene praticata da più di 100 anni, è ancora considerata come ultimo livello della conservazione naturalistica.

L'attività istituzionale dell'APAT ha già da tempo avviato la ricerca e la valorizzazione del patrimonio geologico italiano e gli scenari futuri prevedono l'avviamento dei lavori della Segreteria tecnica del Repertorio italiano dei geositi, validati scientificamente. Nell'anno 2000 il Servizio Geologico Nazionale (ora APAT) aveva già sviluppato il progetto “Conservazione del Patrimonio Geologico Italiano”, finalizzato alla costituzione di un centro nazionale di raccolta sistematica di dati e metadati sui siti di interesse geologico, per la conoscenza e per il coordinamento delle diverse iniziative e ricerche volte alla promozione del patrimonio geologico d'Italia. Con l'istituzione dell'APAT (decreto legislativo n. 300/99) tali attività escono dalle competenze del Dipartimento Difesa del Suolo, che raccoglie gran parte degli uffici del Servizio Geologico Nazionale, ed entra nelle competenze del Settore Tutela del Patrimonio Geologico del Servizio Parchi e Risorse Naturali, all'interno del Dipartimento Difesa della Natura. Il Settore ha fin qui svolto diverse attività per il censimento dei geositi, ed in particolare due convenzioni con il Dipartimento Polis dell'Università degli Studi di Genova (Laboratorio Polis – Centro di Documentazione Geositi), volte alla realizzazione dell'archivio informatizzato dei siti di interesse geologico, concretizzato con lo sviluppo del Database “Geositi”, basato sulle informazioni pervenute attraverso le schede di prima segnalazione dei geositi.

Nell'ambito della seconda convenzione citata è stato sviluppato un modello matematico di valutazione della geodiversità ed il presente elaborato riporta i risultati della sua prima applicazione pratica, non a caso effettuata sul territorio dell'Isola d'Elba (di cui sono state recentemente presentate la Carta della Natura e la carta geomorfologica), volendo inserire l'analisi a integrazione degli indicatori preposti alla descrizione dell'ambiente naturale nel

conteso della Carta della Natura, rappresentando una caratterizzazione della componente abiotica del territorio.

ABSTRACT

Lo stage di formazione ambientale è stato svolto all'interno del Settore per la tutela del patrimonio geologico - Servizio Parchi e Risorse Naturali - Dipartimento Difesa della Natura, che ha realizzato un Database *Geositi* contenente le schede di prima segnalazione del patrimonio geologico italiano durante un'attività iniziata con una convenzione attuata con il Dipartimento Polis dell'Università degli Studi di Genova. Tale convenzione ha avuto l'obiettivo di delineare le linee guida per la costruzione del Database ed effettuare analisi realistiche sulla base delle quali poter attuare politiche di protezione e valorizzazione dei *Geositi* in particolare e della *Geodiversità* in generale. Proprio a quest'ultimo emergente concetto, la geodiversità, il presente lavoro è stato mirato, con l'obiettivo di fornire la prima sperimentazione del modello matematico di valutazione della geodiversità proposto nell'ambito della convenzione, partendo dalla consapevolezza che nelle decisioni di tutela del territorio, il compartimento abiotico-geologico degli ecosistemi deve avere valore pari a quello attribuito al più noto concetto di biodiversità, come del resto è stabilito nella L. 394/91, Legge quadro sulle aree protette.

Il modello di valutazione della geodiversità utilizzato è strutturato sull'applicazione di alcuni indici tramite applicazioni GIS. La valutazione quantitativa è stata effettuata per l'Isola d'Elba, di cui è stata recentemente ultimata la Carta della Natura (CdN). L'analisi è stata effettuata utilizzando diversi strati di dati, a livello di due diverse basi cartografiche,

1. a livello delle unità di paesaggio (UdP), già individuate in CdN,
2. a livello di bacini idrografici,

e inoltre, per rendere l'analisi più efficace, si è cercato di lavorare sempre a una scala più dettagliata di 1:50.000.

A livello operativo lo stage si è articolato in due diverse fasi, entrambe basate sull'utilizzo degli strumenti GIS (in particolare si è utilizzato il software ArcView 3.2).

La prima fase si è articolata nella delineazione automatica dei bacini idrografici dell'Isola d'Elba dal modello digitale del terreno (DTM), per fornire una base cartografica per le analisi

di geodiversità. Tale fase si è rivelata, in corso d'opera, particolarmente delicata ed ha quindi acquisito un'importante porzione dello studio eseguito nel corso dello stage. Il metodo di modellazione automatica dei bacini è CRWR-PrePro, un sistema di scripts per ArcView GIS, sviluppato nel Center for Research in Water Resources (CRWR) dell'University of Texas at Austin da Olivera e Maidment, 1998. Esso si articola in diverse fasi e prevede in primo luogo un pre-processamento del DTM, attraverso le funzioni *stream burning* e *fill sink* che, rispettivamente, costringono il flusso di scorrimento attraverso il DTM, sovrapponendogli uno strato di dati vettoriale rappresentante l'idrografia, e correggono gli errori del DTM. Le successive fasi, *flow direction* e *flow accumulation*, creano dal DTM due ulteriori grid con celle contenenti l'informazione della direzione di scorrimento dell'acqua, l'uno, e l'informazione dell'area di drenaggio a monte di ciascuna cella, l'altro. Entrambi vengono quindi utilizzati per ridefinire il reticolo idrografico (*stream definition*) e i punti dal valore massimo di drenaggio (*outlet from link*), sulla base dei quali viene suddivisa l'area in bacini e sottobacini (*Sub-watershed delineation*) in un grid che viene successivamente vettorializzato.

L'ottimizzazione della caratterizzazione dei bacini idrografici è stata perseguita eseguendo diversi tentativi, che hanno mostrato come:

- a. un layer dell'idrografia vettoriale non deve essere mai utilizzato per lo stream burning di un layer di dati raster con risoluzione peggiore, perché comporterebbe una semplificazione del reticolo idrografico ricreato;
- b. un valore soglia alto di flow accumulation (oltre cui definire bacini) comporta un minor numero di aste fluviali e rispettivi bacini, inoltre la stessa soglia produce un minor numero di corsi e bacini usando un DTM meno dettagliato.

Per l'Isola d'Elba è stato utilizzato un DTM di 10m X 10 m e uno strato vettoriale del reticolo digitalizzato dalle CTR 1:10.000 (dip. Difesa del suolo, APAT). L'immissione soglia del valore di 10.000 celle ha prodotto la creazione di 50 bacini, dopo l'eliminazione di tutti i sottobacini.

La seconda fase dello stage è consistita invece nell'applicazione del modello di valutazione quantitativa della geodiversità proposto dall'università di Genova. Esso rappresenta un'analisi spaziale *multistrato*, ossia l'analisi comparativa di informazioni contenute in più strati informativi, sovrapposti attraverso la strumentazione GIS. L'analisi è preceduta dallo studio indipendente dei singoli strati, considerando che un singolo aspetto può

fornire di per sé utili conclusioni, e, inoltre, la conoscenza approfondita di un settore permette di gestire meglio la successiva comparazione. In questa fase sono stati usati gli strumenti dei moduli Spatial Analyst, Geoprocessing Wizard, 3D analyst, Grid Utilitys e XTools di ArcView 3.2. Gli strati analizzati sono:

- litologia (carta geomorfologica 1:25.000, Trevisan, 1967),
- geomorfologia (carta geomorfologica 1:10.000, APAT, Dipartimento difesa del suolo),
- morfografia, studiata mediante gli strati informativi dell'altimetria, l'acclività e l'esposizione dei versanti (DTM 10m x 10m, e carte delle pendenze e dell'esposizione ricavate da esso),
- geositi (Carta dei geositi, Settore patrimonio geologico - Servizio Parchi e risorse naturali - Dip. Difesa della natura, APAT);

A fine studio è stato possibile realizzare una valutazione complessiva della geodiversità, che costituisce una media di tutti gli indici considerati. Nella valutazione complessiva si è deciso però di dare un peso maggiore all'indicatore che tiene conto della densità di geositi, costituendo essi un valore aggiunto già validato su base scientifica e condivisa. Non potendo proporre la tutela di intere unità di paesaggio, si sono scelte all'interno di esse alcune aree di particolare pregio, come risultato dell'analisi. In particolare è stato messo in evidenza il valore del bacino con il geosito Torre S. Giovanni, compresa nell'UdP del M. Capanne, e, tra le aree costiere comprese tra bacini, è risultata di grande pregio l'area di Punta Calamita, per l'elevatissima densità di geositi.

Questa prima applicazione del modello di geodiversità tramite analisi multistrato ha permesso in primo luogo di mettere in luce gli aspetti positivi e quelli da migliorare di esso, in particolare la poca tendenza alla sintesi di alcuni indici e la necessità di affiancare all'analisi, di volta in volta, osservazioni specifiche riguardanti l'area di studio, considerando che spesso l'omogeneità di alcuni dei caratteri considerati comporta un elevato pregio del territorio. In secondo luogo si è voluto proporre come base di studio, su cui applicare gli indicatori, le Unità di Paesaggio, la cui caratterizzazione in termini di geodiversità è molto interessante sia nell'ambito di CdN, sia per l'applicazione della recente ratifica italiana della Convenzione europea del paesaggio (Firenze, 2000).

Evaluation of geodiversity with the support of GIS tools

The environmental training stage has been carried out in the Settore per la tutela del patrimonio geologico (Servizio parchi e risorse naturali – Dipartimento difesa della natura), which has developed a database called “Geositi”. Such a database contains the forms of primary detail of Italian geological heritage. This activity started with a convention with the Dipartimento POLIS of Università degli Studi di Genova, whose objectives were to outline the database construction’s basis and to make analyses acting as foundation for nature protection strategies and for enhancement of geosites and of geodiversity in general. The present work focuses just on the emerging concept of geodiversity: it represents the first application of the mathematical model for geodiversity evaluation designed within the convention, starting from the supposition that in the safeguard initiatives the abiotic component of ecosystems, as well as biodiversity, should be taken into account, as the law on protected areas has established (law 394/91).

The model of geodiversity evaluation is based on the application of some indexes with GIS tools. The quantitative evaluation has been used to analyze the land of Isola d’Elba, whose Carta della Natura has been recently presented, and has been applied to 2 different cartographies:

1. at landscape units level (characterized in Carta della Natura),
2. at watershed level,

and, to obtain powerful results, the work’s scale was always more detailed than 1:50.000.

The executive plan was divided into 2 phases, both phases conducted with the support of GIS tools (in particular the software ArcView 3.2 has been used).

In order to create the basic data layer for geodiversity analysis, the first phase consisted in the automated delineation of Isola d’Elba watersheds from the digital terrain model (DTM, 10m). This activity turned out to be a hard step during the stage, so it lasted for a long time period. As application of automated hydrological modelling I used CRWR Pre-Pro, which is a system of scripts for ArcView GIS, developed in the Center for Research in Water Resources

(CRWR), University of Texas at Austin, by D. Olivera and D. Maidment in 1998. It consists of different Avenue Requests and it starts from DTM preprocessing: the *stream burning* function is the integration of vector hydrography used to enforce the drainage on DTM, the *fill sink* function eliminates the incorrect sinks of the DTM. The *flow direction* and *flow accumulation* requests define 2 grids where each cell stores the information about the water path direction (following the maximum descent slope) and the number of cells located upstream (the drainage area), respectively. Both grids are used to reach the stream network delineation (*stream definition*) and the subbasin outlets definition, as the point with the maximum drainage area in each fluvial segment (*outlet from link*) With these information the watersheds can be delineated in a grid that has to be vectorialized.

In order to perform a better characterization, different attempts have been made, showing that:

- a. a vector data layer should never be burned into a raster data layer of coarser resolution, to avoid an oversimplification of the stream network subsequently defined,
- b. a great value of flow accumulation threshold (used to defined the watersheds) reach a low number of river segments and watersheds, moreover the same threshold produces less watersheds using a DTM of lower resolution.

The watersheds of Isola d'Elba have been delineated using a DTM of 10m resolution and a vector data layer of hydrography digitalized from CTR 1:10.000. The flow direction threshold value of 10.000 cells has produced 50 watersheds, after the elimination of all subbasins.

The second phase of the stage consisted in the application of the geodiversity evaluation model, developed by Genova's university. It represents a spatial analysis provided by the comparison of different data layers overlapped with GIS instruments. The comparison is preceded by the analysis of each single layer, considering that each component will provide useful conclusions and the detailed knowledge of them will improve the results of the following comparison. In this phase different GIS extensions of ArcView 3.2 have been used (Spatial Analyst, Geoprocessing Wizard, 3D Analyst, Grid Utilitiys and Xtools). The analysed layer are:

- lithology (geological map, 1:25.000, Trevisan, 1967),

- geomorphology (geomorphological map, 1:10.000, Dipartimento difesa del suolo, APAT),
- morphology, divided into the study of altimetry, slopes and aspects (DTM 10m and slopes and aspects maps, derived from DTM),
- geosites (geosites map, Settore patrimonio geologico - Servizio Parchi e risorse naturali - Dip. Difesa della natura, APAT).

The study allowed to perform the whole evaluation of geodiversity as the weighted mean of all considered indexes. However a greater importance has been given to geosites index, since geosites are scientifically acknowledged and shared values. As landscape units are too large to be proposed for nature safeguard, valuable areas among them have been chosen after the analysis. In particular the value of the watershed with the geosite Torre S. Giovanni (the area of the watershed within the landscape unit M. Capanne) and the value of the coastal area of Punta Calamita (for the high density of geosites) have been emphasized.

Summing up, this first application of the geodiversity model has allowed to show its positive aspects and those to be improved. Actually, some indexes are not very useful to summarize the environmental abiotic features, and in every specific research particular comments on the studied areas are necessary, since homogeneity is often a great value for a natural territory.

Finally, this study supports the use of landscape units as cartographical basis for the model application, since their characterization is useful for safeguard tools (as Carta della Natura) or for the application of the European Landscape Convention (Florence, 2000), which Italy has recently ratified.

INDICE SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	11
METODOLOGIA e DATI.....	14
2.1 Caratterizzazione automatica di bacini idrografici con strumenti GIS	
2.1.1 I Modelli digitali del terreno	
2.1.2 Hydrological modeling	
2.1.3 Delineazione dei bacini idrografici dell'Isola d'Elba	
2.1.4 Problemi incontrati	
2.1.5 Bacini idrografici dell'Isola d'Elba	
2.2 Valutazione della geodiversità	
LA GEODIVERSITA' e LA CARTA DELLA NATURA.....	27
3.1 Geodiversità e aree protette: la legge 394/1991	
3.2 La carta della Natura dell'Isola d'Elba	
MISURE DI GEODIVERSITA' dell'ISOLA D'ELBA.....	35
4.1 Modello di valutazione della geodiversità utilizzato	
4.2 La diversità litologica	
4.3 La diversità geomorfologica	
4.4 La diversità morfografica	
4.4.1 La diversità altimetrica	
4.4.2 La variabilità di pendenza	
4.4.3 La variabilità dell'esposizione dei versanti	
4.5 I geositi	
4.6 Valutazione globale della geodiversità delle aree studiate dell'Isola d'Elba	
CONCLUSIONI.....	55
BIBLIOGRAFIA.....	57
APPENDICE.....	58

1 INTRODUZIONE

Lo stage di formazione ambientale è stato svolto all'interno del Dipartimento Difesa della Natura, Servizio Parchi e Risorse Naturali, in cui il Settore per la tutela del patrimonio geologico, che svolge attività e promuove studi in materia di monumenti geologici, geodiversità, siti di interesse geologico, ha realizzato un Database *Geositi*, contenente le schede di prima segnalazione del patrimonio geologico italiano, finalizzato a diventare, attraverso delle procedure di validazione delle schede, il repertorio nazionale dei geositi. Tale attività è iniziata con una convenzione¹ attuata con il Dipartimento Polis dell'Università degli Studi di Genova, che ha avuto come obiettivo l'archiviazione dei *Geositi* organica e basata su una scala di valori, quantomeno scientifici, utili ad analisi realistiche sulla base delle quali poter attuare politiche di protezione e valorizzazione dei *Geositi* in particolare e della *Geodiversità* in generale.

Proprio a quest'ultimo emergente concetto, la geodiversità, il presente lavoro è stato mirato, con l'obiettivo di fornire un'applicazione pratica del modello di valutazione della geodiversità proposto nell'ambito della convenzione, partendo dalla consapevolezza che nelle decisioni di tutela del territorio, il compartimento abiotico-geologico degli ecosistemi deve avere valore pari a quello attribuito al più noto concetto di biodiversità. Tale valore deve essergli attribuito sia per il suo interesse intrinseco, presente nella definizione di Johansson (2000) “*complesso delle variazioni del substrato roccioso, dei depositi, delle forme del terreno e dei processi che modellano il paesaggio*”, sia per l'interesse che esso richiama, in quanto “*collegamento tra le persone, il paesaggio e la cultura; è la varietà degli ambienti, dei fenomeni e dei processi geologici che creano i paesaggi, le rocce, i minerali, i fossili e i suoli che forniscono la struttura per la vita sulla Terra*” (Stanley, 2001), che gli conferisce l'importanza del presupposto senza il quale la biodiversità non esisterebbe.

Il valore della componente abiotica è messo in evidenza in tutto il comparto legislativo riguardante la tutela del territorio e la salvaguardia degli elementi paesaggistici di particolare rilievo, ma soprattutto è presente nella legge “caposaldo” del settore delle aree protette, in cui il patrimonio naturale da preservare e valorizzare è definito come l'insieme delle “*formazioni*

¹ Convenzione (Rif. N° 36296/2003) tra APAT e Dipartimento POLIS dell'Università di Genova

fisiche, geologiche, geomorfologiche e biologiche, o gruppi di esse, che hanno rilevante valore naturalistico e ambientale” (L. 394/91, Legge quadro sulle aree protette).

Di recente ratifica da parte dell'Italia è poi la Convenzione Europea del Paesaggio², svoltasi a Firenze il 20 ottobre 2000, istituita quale strumento dedicato alla salvaguardia, gestione e pianificazioni dei paesaggi europei, non solo quello eccezionali, ma anche quelli ordinari e degradati, intesi quali *“determinate parti del territorio così come sono percepite dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni”*. Tale convenzione vuole conservarne e migliorarne la qualità in un'ottica di tutela dell'ambiente e sviluppo sostenibile ed al contempo, contrastare la tendenza all'omologazione, quando non addirittura all'estinzione di tali paesaggi. Tutto questo passando attraverso una conoscenza del paesaggio, che assume un ruolo fondamentale nell'identità europea, da realizzare tramite l'analisi delle sue caratteristiche, di cui il comparto abiotico rappresenta il substrato.

Infine si vuole evidenziare la novità proposta dal Codice Urbani³, per redigere una legislazione unitaria in materia di tutela ambientale, considerando il nostro patrimonio storico-culturale e paesaggistico come qualcosa di altrettanto unitario. In esso si evince come le regioni sono obbligate ad evitare di rovinare i monumenti geologici rari ed unici, subordinando la pianificazione urbanistica rispetto alla pianificazione paesaggistica.

Ancora nella legge 394/91 trova concepimento la Carta della Natura⁴ (CdN), quale strumento finalizzato a fornire le conoscenze sulla fragilità, sensibilità e pregio del territorio al decisore che sulla base di essa deve individuare le linee di salvaguardia da mettere in atto sul territorio. La CdN, ai fini della pianificazione territoriale, deve contenere un'ampia gamma di informazioni sugli ambienti fisico, biotico, e antropico, valutandone le loro interrelazioni. E' per questo motivo che si basa sulla strutturazione di un Sistema Informativo Geografico (GIS) e sulla classificazione della qualità delle aree studiate mediante degli indicatori, applicabili in maniera estensiva e uniforme su diversi territori. La Carta della Natura prevede due scale di analisi, 1:250.000 e 1:50.000, ma si tende a discutere dell'auspicabilità di lavorare a un dettaglio maggiore, per rendere lo studio dello stato dell'ambiente ancora più dettagliato, e quindi efficace ai fini decisionali.

² Convenzione Europea del Paesaggio, adottata dal Comitato dei Ministri della Cultura e dell'Ambiente del Consiglio d'Europa il 19 luglio 2000, 20 ottobre 2000

³ Decreto Legislativo del 22/01/2004, n.42

⁴ L. 394/91, art.3, comma 2

Proprio sulla base della necessità, emersa anche a livello legislativo, di applicare indici di valutazione del pregio del territorio da strutturare mediante dei sistemi GIS, parte il lavoro effettuato, che vuole essere una proposta di analisi della componente abiotica da inserire in contesti che valutino quantitativamente il pregio delle aree da sottoporre a tutela, come Carta della Natura. E considerando la fase di transizione cui è sottoposta la CdN, si è cercato sempre di lavorare a un maggior dettaglio rispetto alla scala 1:50.000.

A livello operativo si tratta della prima applicazione pratica del modello matematico di valutazione della geodiversità proposto dall'Università di Genova, modello utilizzato per caratterizzare la componente abiotica dell'Isola d'Elba, area che ben si adattava alle quantificazioni di geodiversità, grazie alla grande disponibilità di dati. Il modello consiste in un'analisi multistrato delle componenti della geodiversità, prima analizzate separatamente e poi in una valutazione globale, forte dell'approfondimento svolto sui singoli ambiti. Gli indici sono stati applicati a livello di due basi cartografiche: bacini idrografici e unità di paesaggio dell'Isola d'Elba. I bacini idrografici sono stati delineati automaticamente con strumenti GIS, mediante una elaborazione che nel corso dello stage si è rivelata particolarmente delicata, motivo per cui buona parte dello stage è stata dedicata all'ottimizzazione del metodo (cap. 2).

L'analisi della geodiversità (cap. 4), svolta parallelamente a livello di Unità di paesaggio e a livello di bacini idrografici, da una parte ha avuto lo scopo di caratterizzare in due diversi modi un territorio particolare quale è quello insulare, in cui l'effetto bordo è rilevante, per decidere quale fosse la migliore base di analisi, dall'altra ha permesso di approfondire meglio gli aspetti positivi e quelli da migliorare del modello utilizzato.

2 METODOLOGIA E DATI

La valutazione quantitativa della geodiversità è stata effettuata utilizzando diversi strati di dati, e a livello di due diverse basi cartografiche: a livello di bacini idrografici e a livello di unità di paesaggio.

Lo studio della geodiversità dei bacini idrografici è stato preceduto dalla loro caratterizzazione automatica in ambiente GIS, fase, questa, che si è rivelata, in corso d'opera, particolarmente delicata ed ha quindi acquisito un'importante porzione dello studio eseguito nel corso dello stage. Si è studiata ed eseguita la metodologia inizialmente sulla regione Sicilia, che si prestava particolarmente bene al procedimento in quanto isola (non comportava la delineazione di bacini idrografici tagliati). Successivamente però tale base cartografica si è rivelata poco adatta alle analisi di geodiversità, a causa della difficoltà incontrata nel reperire cartografie tematiche a scala regionale, in particolare per valutare la geodiversità geomorfologica.

Si è quindi spostata l'area di studio nell'Isola d'Elba, che, dati il suo carattere insulare e le sue dimensioni limitate, ben si adattava sia al processo di delineazione dei bacini idrografici che allo studio della geodiversità, potendo disporre, per questa, di diversi strati di dati.

2.1 Caratterizzazione automatica di bacini idrografici

L'analisi della distribuzione dei bacini idrografici, che è normalmente alla base degli studi sui processi idrologici e sulle risorse idriche, richiede informazioni sul territorio di carattere fisiografico, come la configurazione della rete idrografica, l'ubicazione degli spartiacque, la lunghezza delle aste fluviali e la loro pendenza, parametri che tradizionalmente si ottengono da indagini cartografiche o su campo.

Nell'ultimo ventennio, tali informazioni sono sempre più spesso ricavate direttamente da rappresentazioni digitali della topografia, detti modelli digitali del terreno, o DTM (digital terrain models).

I vantaggi della derivazione automatica dei bacini idrografici dai DTM sono la velocità del procedimento, la minore soggettività, e quindi la possibilità di ricavare misure più riproducibili rispetto alle tradizionali tecniche manuali applicate sulle carte topografiche⁵.

2.1.1 Modelli Digitali del terreno

Un **Modello Digitale del Terreno**, anche noto come **DTM**, dall' inglese *Digital Terrain Model*, è la rappresentazione della distribuzione delle quote di una certa superficie, in formato digitale.

Il tipo più comune di DTM è quello di una struttura di dati in formato raster, ossia una rappresentazione in cui lo spazio geografico è diviso in una griglia di celle generalmente quadrate (GRID). In essa si può esprimere qualunque variazione di un parametro, assegnando un valore a ciascuna cella. Nel caso dei DTM si assegna a ogni cella un valore di altitudine, derivando i dati da carte topografiche, da quote già digitalizzate o da stereomodelli basati su foto aeree o immagini da telerilevamento satellitare. Ogni cella è georeferenziata con coordinate geografiche note, in modo da contenere l'informazione della quota media dell'area geografica che rappresenta. Il prodotto dell'elaborazione di dati è la realizzazione di uno strumento per la generazione di immagini tridimensionali foto realistiche che permette di ricostruire al calcolatore un territorio reale, di poterlo visualizzare ed esplorare in tutte le sue parti ed aspetti più utili, di poterlo modificare interattivamente.

La *qualità* di un DTM è l'accuratezza di un dato di altitudine (il grado in cui il dato misurato è conforme alla realtà o al valore accettato), mentre la *risoluzione* si riferisce alla precisione del dato (vicinanza di una serie ripetuta di osservazioni della stessa quantità a un'altra, è una misura del controllo dell'errore casuale), che produce una risoluzione orizzontale e una la risoluzione verticale, connesse con la grandezza della cella.

⁵ D. Maidment, D. Djokic, 2000, da cui sono riprese anche le successive informazioni sullo sviluppo dell'Hydrological modeling.

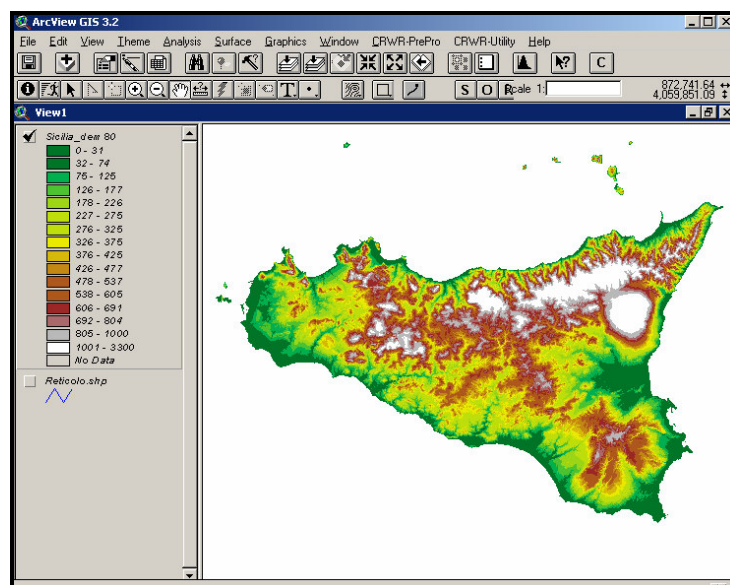


Fig. 2.1: DTM della Sicilia, con celle dalla risoluzione 250m x 250m.

2.1.2 Hydrological modeling

L'uso del DTM per derivare una rappresentazione dell'idrografia superficiale fu incoraggiato dallo sviluppo dell'algoritmo D-8 (*Deterministic-8 Node*, O'Callaghan e Mark 1984), secondo il quale, per una rappresentazione topografica strutturata con una griglia di celle, il flusso si muove da una cella verso solo una delle otto celle a essa adiacenti, e la sua direzione segue la massima pendenza. Questo concetto permise di creare un grid di *flow accumulation* dal DTM. Ma l'algoritmo era proibitivo per DTM di grandi estensioni.

Nel 1988 Jenson e Dominigue introdussero il concetto di costruzione del drenaggio, attraverso un programma di delineazione automatica dei bacini di drenaggio che permetteva di eliminare le "fosse" (*sink*) spurie esistenti nel DTM elevando la quota di quei punti a quella della cella adiacente con la quota minore, o abbassando la quota della sella che chiudeva tale sink.

Saunders e Maidment, nel 1995 applicarono tale metodo per delineare i bacini costieri di San Antonio-Neuces, nel sud del Texas. Essi ottennero dei risultati che mostravano come nelle porzioni più vicine alla costa dei bacini, dove le pendenze erano generalmente deboli, il percorso del flusso era distorto rispetto alla posizione conosciuta del corso d'acqua.

Già nel 1989 Hutchinson aveva discusso dell'incorporazione di dati lineari rappresentanti i corsi d'acqua ai DTM, in modo da imporre una costrizione del flusso attraverso quelle celle che corrispondevano alla rete delle aste fluviali. Un metodo per risolvere i problemi prodotti dalla riproduzione digitale della rete idrografica dal DTM, comprende quindi l'integrazione con un set di dati vettoriali dell'idrografia, preliminarmente alla delineazione automatica dei bacini dal DTM. Tale metodo è noto col nome di "*stream burning*". Nel 1996 Maidment e Mizgalewicz operarono il processo integrativo di correzione del DTM, che aumentava il valore di altitudine di quelle celle che secondo i dati vettoriali non erano interessate da scorrimento superficiale, con un valore arbitrario, e manteneva inalterato il valore delle celle depresse con scorrimento superficiale. Il metodo di *stream burning* assicurava inoltre che la lunghezza di scorrimento dei corsi d'acqua non venisse sottostimata. Il processo tuttavia non è privo di inconvenienti: lo strato vettoriale rappresentante l'idrografia, scelto per integrare il procedimento automatico, dev'essere a una scala simile a quella del DTM e dev'essere anch'esso sottoposto a un preprocessamento. Altri difetti furono notati, quali l'erronea delineazione di corsi artificiali paralleli nella rete di drenaggio (Hellweger,1997) e la distorsione dei limiti dei bacini idrografici risultanti dal DTM modificato.

2.1.3 Delineazione dei bacini idrografici della Sicilia

Il metodo di delineazione automatica dei bacini idrografici è stato sperimentato sulla regione Sicilia. La suddivisione della regione Sicilia in bacini idrografici è stata effettuata a seguito di una ricerca, svolta all'interno dello stage, sul web, finalizzata al trovare gli strumenti per delineare in modo automatico i bacini idrografici di un'area estesa da utilizzare come base per le misure di geodiversità. La ricerca del metodo informatico si è conclusa nel download⁶ di un file di progetto per ArcView che contiene gli scripts, i menù e i bottoni del sistema di caratterizzazione dei bacini idrografici detto **CRWR-PrePro**, dove PrePro indica il PreProcessamento di dati in ambiente GIS per realizzare modelli idrologici.

⁶ <http://ceprofs.tamu.edu/folivera/GIS-CE/Exercises/HydrologicParameters/gis2hms.htm>

CRWR-PrePro (fig. 2.2) è un sistema di scripts per ArcView GIS sviluppato per estrarre informazioni topografiche, topologiche e idrologiche dai dati spaziali digitali di un sistema idrologico. Il sistema è stato sviluppato nel Center for Research in Water Resources (CRWR) dell'University of Texas at Austin, e sostituisce il precedente pacchetto CRWR HEC-PrePro, versione 2.0 (Olivera e Maidment, 1998).

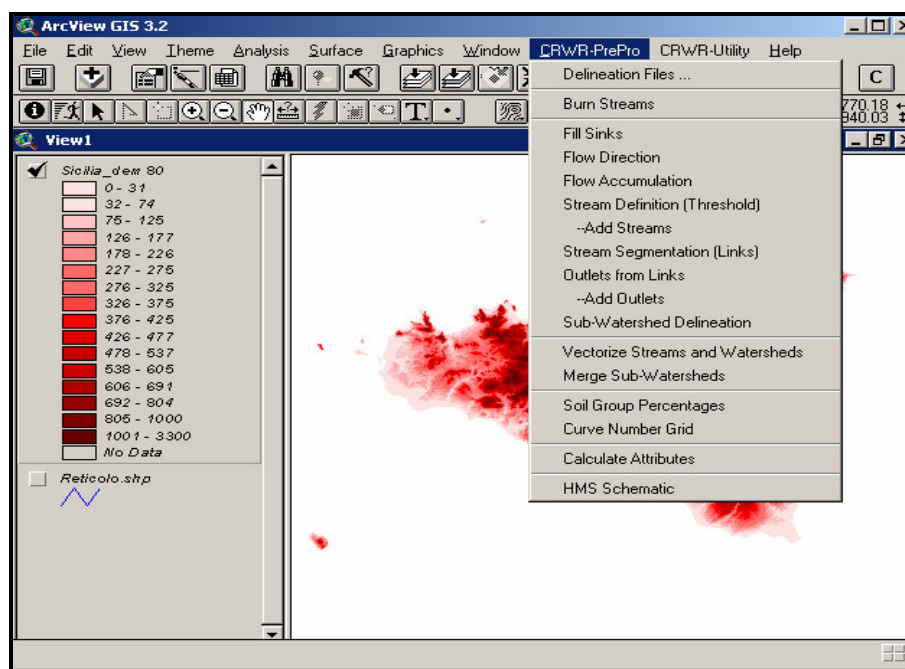


Fig. 2.2: funzioni del sistema di scripts CRWR Pre-Pro.

Il metodo prevede l'utilizzo di diverse funzioni da eseguire secondo un ordine prestabilito (fig. 2.2).

In primo luogo sono stati caricati gli strati informativi dal server interno dell'APAT relativi al modello digitale del terreno dell'Italia (poi tagliato con la funzione "Extract Grid theme using polygon" della Grid Analyst extension, in modo da elaborare i dati della sola regione Sicilia), e i dati relativi al reticolo idrografico digitalizzati dalla cartografia a scala 1:250.000 (reticolo.shp, anch'esso tagliato per ottenere i dati della sola regione Sicilia). Del file vettoriale rappresentante l'idrografia della Sicilia è stato creato quindi un nuovo shapefile selezionando le sole aste fluviali di ordine 1 e 2 (ordini attribuiti con numeri crescente da valle a monte), per limitare la densità del reticolo utilizzato per effettuare lo Stream Burning di un territorio vasto quanto è quello regionale (fig. 2.3).

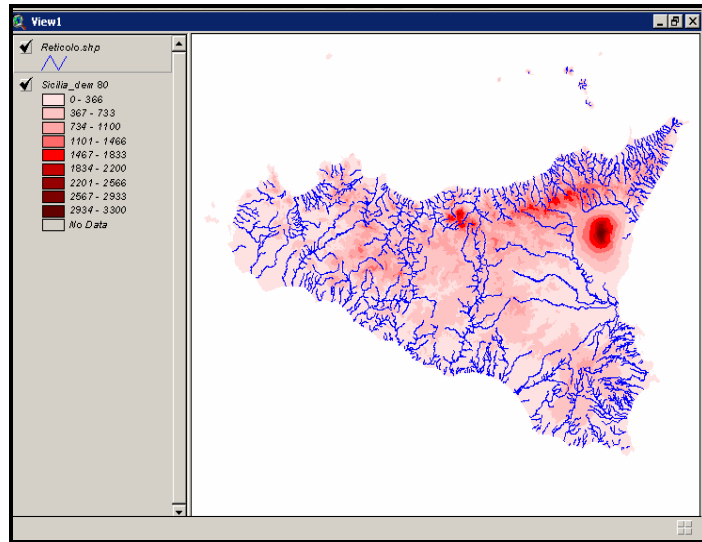


Fig. 2.3: DTM (250m) e strato vettoriale rappresentante l'idrografia della regione Sicilia.

- Il primo passo del procedimento automatico è lo “*stream-burning*”, un pre-processamento del DTM che permette di replicare successivamente una rete idrografica il più possibile coincidente con la rete di aste fluviale conosciuta e digitalizzata dalle carte 1:250.000 nello shapefile vettoriale reticolo.shp; il metodo consiste infatti nell'innalzare le quote delle celle del DTM che non sono interessate dallo scorrimento superficiale individuato del set di dati vettoriali per produrre un nuovo DTM, chiamato “*burned*”. Lo strato di dati vettoriali è stato a sua volta scelto in base ad alcune caratteristiche che permettano di ottimizzare il processo:

- 1) non deve essere “bruciato” in uno strato di dati raster di risoluzione meno dettagliata, che porta ad una semplificazione della rete idrografica risultante;
- 2) non deve comprendere laghi o comunque poligoni chiusi, che poi producano locali depressioni;
- 3) la rete deve essere continua e non comprendere alcuna discontinuità tra i vari segmenti fluviali;
- 4) non deve comprendere la linea di costa;
- 5) l'estensione della rete di drenaggio non deve essere maggiore dell'estensione del DTM della Sicilia.

- Per quanto accurato, ogni DTM contiene delle aberrazioni che causano delle depressioni puntuali o pozzi nella rappresentazione del terreno. Questo comporta problemi nel

calcolo della direzione di scorrimento, poiché tale parametro non si può determinare per una cella con valore di quota inferiore alle otto celle che la circondano. La funzione “*Fill sinks*” aumenta il valore di elevazione di queste celle in modo da livellarle alla quota delle celle che le circondano; in questo modo vengono colmati soltanto i “pozzi” artificiali. Il file risultante, chiamato “*filled*”, è del tutto simile al DTM di partenza, ma contiene delle correzioni non apprezzabili nella sua visualizzazione.

- Avviando la funzione “*Flow direction*” si ottiene un grid di direzione del flusso (assegnata secondo un codice, come mostrato in fig. 2.4), in modo che da ogni cella lo scorrimento sia nella direzione della massima pendenza. Così da ogni cella sarà determinata un’unica direzione di percorso verso la chiusura dei bacini idrografici.
- Una volta conosciuta la direzione di scorrimento, si può calcolare l’area di drenaggio attraverso la funzione “*Flow accumulation*”, per creare un grid la cui informazione per ogni cella è il numero di celle a monte che confluiscono in essa (fig. 2.4). Tale numero, moltiplicato per l’area della cella, equivale all’area di drenaggio a monte della cella. Conclusa questa operazione, si è ottenuto un DTM corretto.
- Il passo successivo è quindi quello di ricostruire un reticolo idrografico sulla base del processamento del DTM effettuato, attraverso la funzione “*Stream definition*”. Preliminarmente bisogna però specificare un valore soglia del grid di *flow accumulation* appena creato: questa operazione identifica come interessate da scorrimento superficiale tutte le celle del grid di *flow accumulation* che hanno valori maggiori della soglia specificata. E’ usata come metodo per suddividere i bacini idrografici: soglie più alte avranno come risultato una rete meno densa, e un minor numero di sottobacini. Il grid “*stream*” risultante contiene il valore 1 in ogni cella in cui il grid “*flow accumulation*” ha un valore maggiore della soglia definita e NODATA in tutte le altre celle. Una volta definite le celle di scorrimento superficiale, a ogni asta fluviale individuata viene attribuito un numero identificativo univoco avviando lo “*Stream segmentation*”.

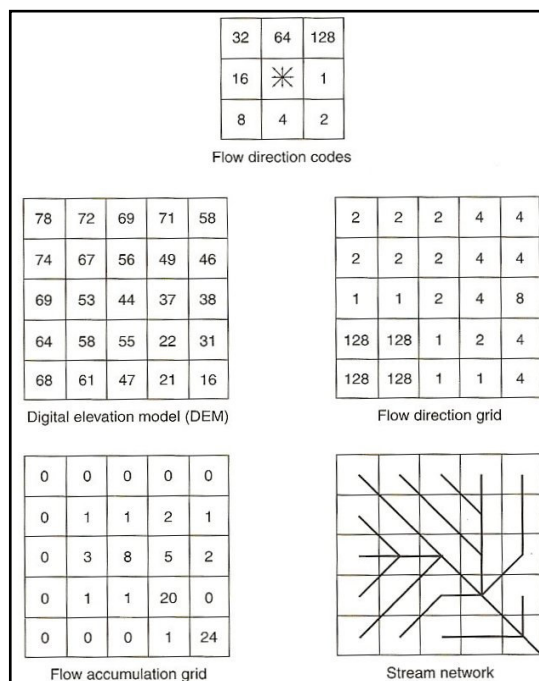


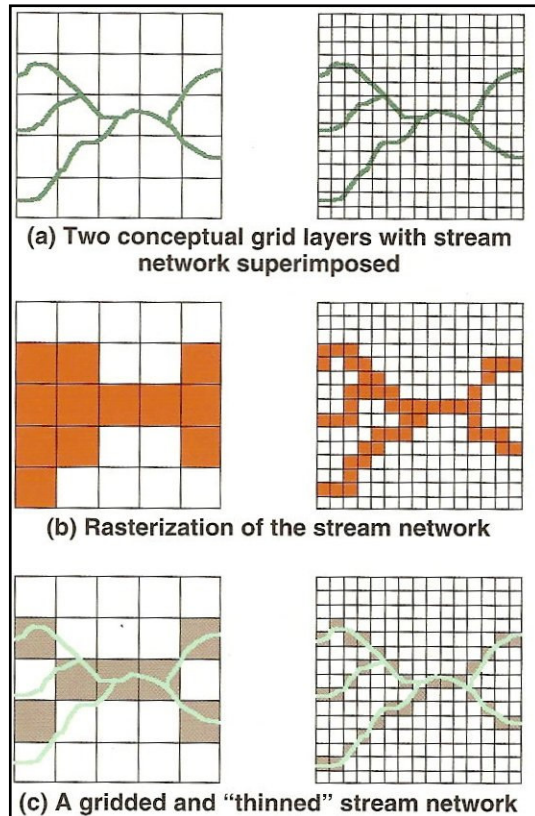
Fig. 2.4: sono messe in evidenza le successive trasformazioni dal DTM, al grid rappresentante le direzioni di scorrimento (identificate dai numeri 1,2,4,8,16,32,64,128, come raffigurato in essa), al grid dell'area di drenaggio di ciascuna cella, al tracciamento della rete fluviale (D. Maidment, D. Djokic, 2000).

- La cella di ogni asta fluviale con il massimo valore di flow accumulation viene identificata con il tool “*Outlet from link*” come il punto di chiusura del bacino di quel corso d’acqua.
- A questo punto si possiedono tutti gli elementi per delineare i bacini idrografici, che la funzione “*Sub-Watershed Delineation*” crea come grid. Bacini e sottobacini mantengono lo stesso numero di identificazione delle aste fluviali, come i loro corrispondenti punti di chiusura.
- L’ultima operazione (“*Vectorize streams and watersheds*”) consiste nel trasformare il reticolo e i bacini delineati in formato vettoriale, in modo da rendere più veloci le analisi che sono state successivamente compiute su questi due strati di dati.

2.1.4 Problemi incontrati

I punti critici incontrati nel procedimento automatico sono stati essenzialmente due: in primo luogo la scelta della risoluzione del DTM e della scala dello strato di dati vettoriale dell'idrografia, in secondo luogo l'immissione del valore soglia di *flow accumulation* per definire il nuovo layer dell'idrografia.

Come spiegano Maidment e Djokic (2000), un layer dell'idrografia vettoriale, non deve essere mai utilizzato per lo *stream burning* di un layer di dati raster con risoluzione peggiore. Come mostrato in fig. 2.5 infatti lo stesso strato vettoriale utilizzato su due DTM dalla risoluzione diversa porterà a una rasterizzazione che lo ripercorre in maniera diversamente accurata: il DTM con risoluzione maggiore (a destra) ricrea una rete idrografica più simile a



quella impostagli; inoltre lo strato raster meno dettagliato (a sinistra) comporta una semplificazione del reticolo idrografico

Fig. 2.5: trasformazione di due DTM dalla risoluzione differente (D. Maidment, D. Djokic, 2000).

Per la sperimentazione del metodo sulla Sicilia è stato utilizzato, come strato di dati vettoriale, il reticolo digitalizzato dalla carta alla scala 1:250.000. Sono quindi stati compiuti diversi tentativi di delineazione dei bacini a partire da due strati di dati raster: un DTM con cella di 250m x 250m e un altro con cella 80m x 80m, quest'ultimo ottenuto mediante un ricampionamento del DTM a 20m di lato (considerato troppo dettagliato per l'estensione regionale a cui si lavorava) tramite la funzione Resample della Grid Analyst Extension .

Il secondo punto di snodo è la scelta del valore di flow accumulation da considerare come minimo per determinare le celle interessate da scorrimento superficiale, e quindi per definire una rete idrografica più o meno fitta.

In tabella 1 sono riassunti i risultati dei diversi tentativi eseguiti, combinando la scelta della risoluzione del DTM e la scelta del valore soglia dell'area di drenaggio. E' possibile notare come in entrambi i DTM una soglia maggiore porta alla creazione di un minor numero di aste fluviali e di rispettivi bacini idrografici, poiché aumentando l'area minima di drenaggio

sono sempre meno i corsi d'acqua con tale attributo. Inoltre la stessa soglia comporta il tracciamento di meno aste nel DTM meno dettagliato (250m) poiché il reticolo idrografico viene maggiormente semplificato.

	DTM 80 m	DTM 250 m
SOGLIA	Numero bacini	Numero bacini
800 celle	/	231
1.500 celle	/	117
2.000 celle	950	77
4.000 celle	453	36
15.000 celle	111	/
20.000 celle	71	/
25.000 celle	59	/
50.000 celle	28	/
100.000 celle	11	/

Tab. 2.1: tentativi di definizione della rete idrografica eseguiti su diversi DTM e con diversi valori soglia di flow accumulation.

Per quanto riguarda l'accuratezza con cui il reticolo ricreato ripercorre lo strato vettoriale ottenuto dalla digitalizzazione manuale, i vari tentativi hanno messo in evidenza una buona coincidenza tra i prodotti del processo automatizzato e quello manuale, ma sicuramente una determinazione migliore partendo dal layer di partenza a maggiore risoluzione: a titolo d'esempio in figura 2.6 è messo a confronto un particolare dei tre layer: si può notare una maggiore coincidenza con il reticolo digitalizzato del reticolo tracciato a partire da DTM a 80m, mentre il reticolo ricreato dal DTM a 250m salta alcune anse che in realtà il corso d'acqua percorre.

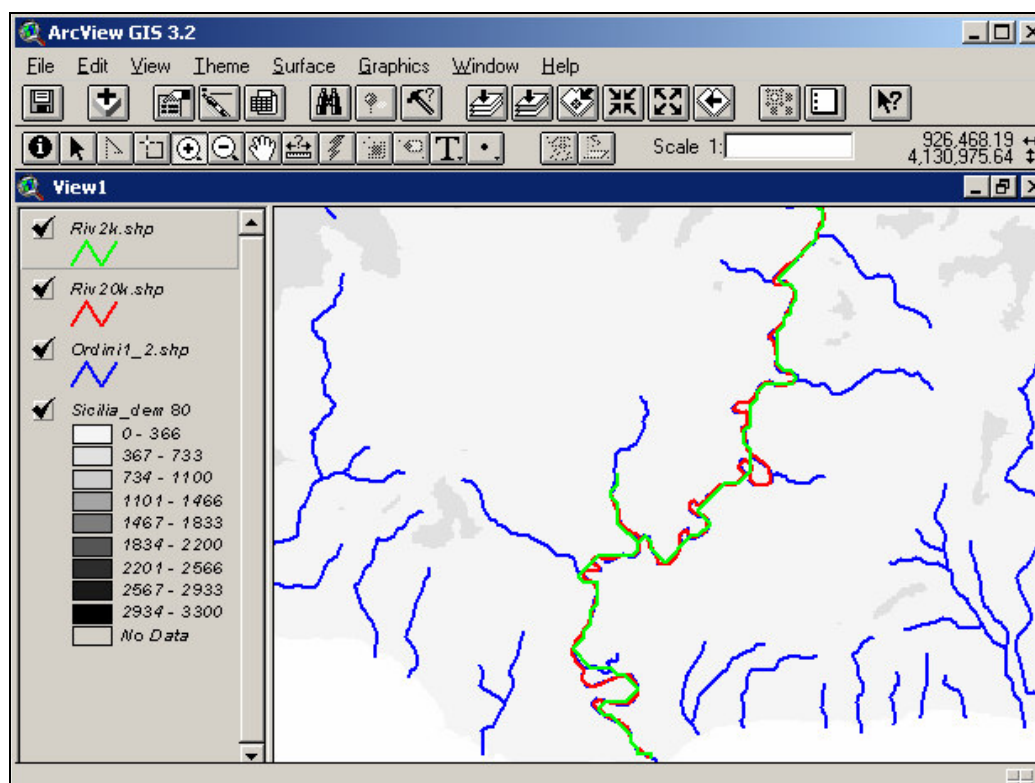


Fig. 2.6: il reticolo ricreato usando un DTM a maggiore risoluzione (rosso) ripercorre meglio lo strato di dati rappresentante l'idrografia (blu) rispetto al reticolo creato a partire da un DTM dalla bassa risoluzione (verde).

Un altro problema del procedimento è la scarsa efficienza che esso ha nelle aree costiere pianeggianti, dove, soprattutto se il DTM è poco dettagliato, si possono incontrare varie celle adiacenti con uguale valore di altitudine, per cui, non potendo calcolare direzione di scorrimento e area di drenaggio, il metodo tende a tracciare diversi corsi d'acqua paralleli tra loro e perpendicolari alla linea di riva, che non ricreano la situazione reale.

2.1.5 Bacini idrografici dell'Isola d'Elba

Per la delineazione dei bacini dell'Isola d'Elba si è seguito il procedimento descritto, con leggere accortezze aggiuntive dovute alle peculiarità dell'area studiata.

A seguito dell'esperienza acquisita nell'applicazione del metodo alla Sicilia, si è deciso di utilizzare un DTM molto dettagliato, con celle di 10m x 10m, elaborato all'interno dell'APAT a partire dalle curve di livello ricavate dalla carta tecnica regionale 1:10.000, ottenuta per gentile concessione della Regione Toscana, Servizio Informativo. Dalla stessa

cartografia è stato pure ottenuto il layer del reticolo idrografico utilizzato per la forzatura del DTM (*Stream burning*).

Per tracciare il nuovo reticolo idrografico sono state effettuati due tentativi con soglie diverse di *flow accumulation*: una di 10.000 celle, ha portato all'elaborazione di 39 aste e rispettivi bacini fluviali, l'altra di 20.000, ne tracciava 79. Si è deciso di utilizzare il secondo strato informativo, in quanto il primo lasciava scoperte aree costiere troppo vaste; ma si è ridotto il numero di bacini unendo tutti i sottobacini ottenuti nel bacino principale, in modo da eliminare i sottobacini, con la funzione "Merge Sub-watersheds" del tool utilizzato (fig. 2.7).

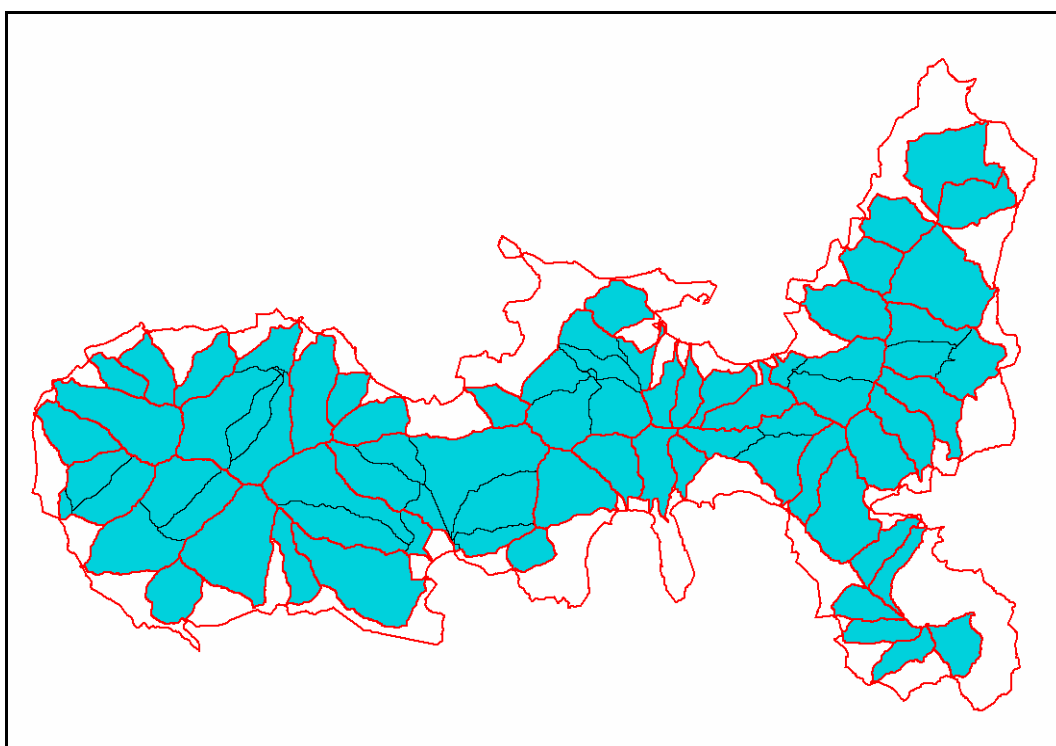


Fig. 2.7: strati informativi vettoriali dei bacini idrografici delineati immettendo una soglia di flow accumulation di 10.000 celle: in azzurro il layer originale, in rosso i contorni dei bacini rimasti dopo l'eliminazione di tutti i sottobacini.

2.2 Valutazione della geodiversità

Per le misure quantitative della geodiversità effettuate (proposte dall'università di Genova) sull'Isola d'Elba sono stati utilizzati i seguenti strati informativi e le seguenti procedure:

- *Carta delle Unità di Paesaggio*, compresa nella Carta della Natura dell'Isola d'Elba elaborata dal Servizio Carta della Natura del Dipartimento Difesa della Natura (APAT).
- *Carta dei bacini idrografici*, caratterizzati durante lo stage, come descritto nel precedente paragrafo.
- *Carta geologica* 1:25.000 (Trevisan, 1967), digitalizzata dal Servizio Geologico del Dipartimento Difesa del Suolo (APAT).
- *Carta geomorfologica* 1:10.000, elaborata presso il Servizio Geologico del Dipartimento Difesa del Suolo (APAT).
- *DTM* 10m x 10m, elaborato all'interno dell'APAT a partire dalle curve di livello ricavate dalla carta 1:10.000, ottenuta per concessione della Regione Toscana, Servizio Informativo.
- *Carta dell'esposizione dei versanti*, derivata dal DTM tramite la funzione "Aspects" del tool Spatial Analyst di ArcGIS
- *Carta delle pendenze*, derivata dal DTM tramite la funzione "Slope" del tool Spatial Analyst di ArcGIS.
- *Carta dei geositi*

Infine per il calcolo della geodiversità sono stati usati gli strumenti dei moduli Spatial Analyst, Geoprocessing Wizard, 3D analyst, Grid Utilitys e XTools di ArcView 3.2

3 LA GEODIVERSITA' E LA CARTA DELLA NATURA

3.1 Geodiversità e aree protette: la legge 394/1991

Proprio in questi giorni riemerge la grande rilevanza del tema della tutela del territorio, sottolineata proprio dal Ministro dell'Ambiente e della tutela del territorio durante la Comunicazione sugli indirizzi generali della politica del suo dicastero, in occasione della 13° Commissione Permanente del Senato (13/06/2006). Egli ha infatti evidenziato che, tra le priorità del governo nel settore ambientale, è necessaria una particolare attenzione in materia di parchi e difesa del suolo, rappresentando il territorio una risorsa ineguagliabile.

Ma troppo spesso si qualifica il valore del paesaggio solo in base alla presenza di eccezionali elementi naturali del mondo biologico, senza dare il dovuto valore naturalistico e storico alla componente abiotica.

Ogni territorio deve infatti la sua esistenza a vicende geologiche accadute in un passato più o meno remoto. Il susseguirsi di episodi di accumulo o formazione di rocce, seguiti da momenti di erosione e deformazione delle stesse concorrono a definire una storia che, a seconda dei casi, è giunta fino a noi in maniera più o meno completa. In ogni caso tale storia è scritta nelle rocce del territorio, che quindi rappresentano elementi del paesaggio unici ed irripetibili. E' a partire da questo presupposto che conviene affiancare alla biodiversità, il concetto meno conosciuto di **geodiversità**, e quindi valorizzarlo e sottoporre a tutela quelli che rappresentano veri e propri monumenti della natura, tanto quanto le specie vegetali e animali protette per la loro peculiarità.

Di altrettanta rilevanza è la funzione che la geodiversità svolge nel mantenere la biodiversità, se si considerano i corpi rocciosi come il substrato fisico naturale di una regione (Nieto, 2001) e della componente biotica di qualunque ecosistema. Tale concetto è insito nella definizione di **suolo**, in quanto substrato su cui si insedia la copertura vegetale, interessato da continui scambi di energia e materiali con la biosfera, e che è il risultato di processi di alterazione che interessano le rocce e i materiali organici.

E' da considerare inoltre che, così come il mondo biologico, anche il mondo abiotico è soggetto a mutamenti e a rischi di alterazione dovuti all'impatto dell'uomo, spesso minaccioso, sul territorio (Gray, 2004). Da questa base risulta di importanza irrinunciabile la tutela degli oggetti geologici, che a loro volta garantiscono l'esistenza della diversità vegetale e animale.

Agli obiettivi della geoconservazione, va infine aggiunto il mantenimento e la valorizzazione dei geositi, quei particolari elementi della geodiversità che hanno un valore intrinseco estetico e paesaggistico, quale memoria della storia geologica del paesaggio. Sono i monumenti geologici che oggi vengono sempre più valorizzati per poter entrare a far parte dell'educazione dei cittadini alla lettura del pregio del paesaggio, troppo spesso identificato soltanto nei suoi aspetti biologici, in modo da comprenderne pienamente i processi naturali che lo hanno determinato. Wimbleton (1995) definisce geosito *“l'insieme degli elementi fisici del territorio o singolarità del paesaggio (espressione e testimonianza dei processi che hanno formato e modellato il nostro pianeta), che rappresentano un richiamo per la loro componente scenica, ma che manifestano anche contributi di tipo scientifico, storico, culturale, educativo, ricreativo, socio-economico, ecc...”*

Il termine “geodiversità” è stato usato solo piuttosto recentemente, in evidente analogia col più noto termine “biodiversità”. Numerose definizioni via via più complete sono state proposte, fino alla più recente e sistemica di Murray Gray (2003), che la definisce *“la naturale gamma (diversità) dei caratteri geologici (rocce, minerali, fossili), geomorfologici (forma del terreno, processi) e del suolo. Essa include i loro assemblaggi, le loro connessioni e le relative proprietà, interpretazioni e sistemi”*. Allo stesso Gray (2004) si deve una classificazione efficace e sintetica dei valori della geodiversità, raggruppati in 4 gruppi:

- Valore intrinseco: si riferisce al principio etico secondo cui alcune cose (in questo caso la Geodiversità della natura) hanno valore soltanto in quanto tali e non per ciò che possono rappresentare per le persone (in contrapposizione quindi al valore utilitaristico).
- Valore culturale ed estetico: valore assegnato dalla società ad un elemento dell'ambiente fisico perché riveste un particolare significato per la società o la comunità (in questo senso possiamo considerare all'interno del valore culturale – estetico: il Folklore, la “Geomitologia”, il valore archeologico e storico, il valore spirituale, il valore legato al senso del luogo e del paesaggio locale, nonché il luogo stesso inteso come fonte di ispirazione artistica)
- Valore economico: inteso come risorsa naturale da sfruttare (idrocarburi, metalli, minerali preziosi, materiali da costruzione e per l'industria, fossili etc.)
- Valore didattico e di ricerca: l'ambiente fisico può essere considerato come un laboratorio di ricerca; pertanto i danni ai sistemi fisici danneggiano irrimediabilmente la nostra capacità di studiarlo e comprenderlo. Se prendiamo in considerazione, ad esempio la storia della terra si evince come molti dei nomi assegnati ai periodi del tempo geologico derivano da toponimi, questi siti sono riconosciuti come “standard” a livello internazionale e devono essere conservati in modo da poterli tramandare alle generazioni future.

Il legame tra la componente abiotica del paesaggio e la tutela del territorio è sottolineato proprio nella legge quadro 394/91 sulle aree protette, che detta principi fondamentali per l'istituzione e la gestione delle aree naturali protette, finalizzate a garantire e promuovere la conservazione e la valorizzazione del patrimonio naturale del paese. Tale patrimonio naturale è in tale ambito definito come l'insieme delle *“formazioni fisiche, geologiche, geomorfologiche e biologiche, o gruppi di esse, che hanno rilevante valore naturalistico e ambientale”*⁷, per cui in seguito si legge che per le singolarità geologiche, come per quelle biologiche, sono validi gli stessi obiettivi di conservazione, applicazione di metodi di gestione o di restauro ambientale idonei a realizzare una integrazione tra uomo e ambiente naturale, promozione di attività di educazione, di formazione e di ricerca scientifica, anche interdisciplinare, nonché di attività ricreative compatibili, difesa e ricostituzione degli equilibri idraulici e idrogeologici (art. 1, comma 1,2,3). Così, nell'art.2, comma2, le formazioni fisiche, geologiche e geomorfologiche, oltre che biologiche, di rilievo sono richiamate quali elementi che costituiscono motivo di istituzione di parchi nazionali, quando, per valori naturalistici, scientifici, estetici, culturali, educativi e ricreativi, richiedano l'intervento dello Stato ai fini della loro conservazione per le generazioni presenti e future. Al valore naturalistico, di cui è ormai chiaro faccia parte la diversità delle forme e processi geologici, si dà pari rilevanza nella definizione delle altre categorie di aree protette.

Ancora, nella legge quadro trova concepimento la Carta della Natura, quale strumento per l'integrazione delle conoscenze territoriali. Essa individua lo stato dell'ambiente naturale in Italia, evidenziando i valori naturali ed i profili di vulnerabilità territoriale, e sulla base di essa il Comitato per le aree naturali protette, oggi sostituito dalla Conferenza Stato-Regioni,

⁷ Di fatto il primo atto di riconoscimento nei confronti della tutela degli elementi geologici a livello internazionale si deve all'UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, Le Scienze e la Cultura). Infatti nella “Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Culturale e Naturale Mondiale” (Parigi, 1972) vengono compresi nella definizione di “patrimonio naturale”:

- i monumenti naturali, costituiti da formazioni fisiche e biologiche oppure da gruppi di tali formazioni, aventi valore universale eccezionale dal punto di vista estetico o scientifico;
- le formazioni geologiche e fisiografiche e le zone rigorosamente delimitate, costituenti l'habitat di specie animali e vegetali minacciate, che hanno valore universale eccezionale dal punto di vista della scienza o della conservazione;
- i siti naturali oppure le zone naturali rigorosamente delimitate, aventi valore universale eccezionale dal punto di vista della scienza, della conservazione o della bellezza naturale.

All'interno dell'Elenco del Patrimonio Mondiale, istituito in base all'art. 9 della citata Convenzione, sono stati inseriti siti di interesse naturale che rientrano in categorie di preminente valenza geologico-geomorfologica, quali, ad esempio, paesaggi e formazioni vulcaniche, paesaggi montani, sistemi idrotermali, grotte e paesaggi carsici, elementi idrologici, barriere coralline ed atolli, siti fossiliferi.

identifica le linee fondamentali dell'assetto del territorio. Scorrendo le linee di salvaguardia da mettere in atto nella gestione delle aree protette, enunciate nell'art.6, si evince come sia di fondamentale importanza salvaguardare le componenti geologiche e geomorfologiche del territorio, perché imprescindibili dalla biodiversità e dall'equilibrio degli ecosistemi.

Per la Carta della Natura è in corso una fase di transizione: è stata concepita come uno strumento finalizzato alla pianificazione territoriale, e sulla base di questa esigenza è stato sviluppato un modello concettuale e applicativo che prevede la realizzazione della Carta della Natura in due scale di analisi: 1:250.000 e 1:50.000. Le due scale di analisi permettono di esaminare due diverse categorie di fenomeni emergenti, una, di carattere regionale a grande scala, che evidenzia gli aspetti fisiografici dei paesaggi italiani, l'altra, di carattere locale, che considera prevalentemente le componenti biotiche come determinanti nella definizione dello stato dell'ambiente. Ma il progetto è in fase di revisione, considerato il fatto che, per essere uno strumento decisionale davvero efficace, sarebbe auspicabile un dettaglio ancora maggiore, che permetta di studiare il territorio in tutte le sue angolazioni e in maniera particolareggiata.

3.2 La carta della Natura dell'Isola d'Elba

Il lavoro svolto durante lo stage di valutazione del pregio del territorio attraverso l'adozione di indicatori di geodiversità vuole essere una proposta di integrazione ai numerosi indicatori che vengono utilizzati all'interno del progetto Carta della Natura, supporto alle attività decisionali delle aree protette.

La Carta della Natura dell'Isola d'Elba è di recente ultimazione. Sono stati utilizzati gli indicatori previsti nella metodologia generale di Carta della Natura per il calcolo dei tre parametri

- Valore Ecologico (“Qualità ambientale”)
- Sensibilità Ecologica
- Pressione Antropica

di cui gli ultimi due concorrono a definire la Fragilità territoriale (“Vulnerabilità”).

L'Elba con un'estensione di 22.350 ettari e 147 km di coste è la terza isola italiana; lo sviluppo massimo est-ovest (tra Punta Nera e Capo Pero) è di 27 km e quello nord-sud (tra Capo Vita e Punta dei Ripalti) è di 18 km. L'isola d'Elba dista 10 km dalla costa di Piombino, 40 da Capraia e 50 dalla Corsica. Amministrativamente appartiene alla Provincia di Livorno ed è suddivisa in otto comuni: Campo nell'Elba, Capoliveri, Marciana, Marciana Marina, Porto Azzurro, Portoferraio, Rio Marina, Rio nell'Elba.

La base di riferimento usata per l'attribuzione dei valori è la carta degli habitat, in cui ogni poligono rappresenta un biotopo classificato con un codice CORINE biotopes. Per l'Isola d'Elba sono state individuate 17 tipologie di habitat diversi, di seguito elencati con il rispettivo codice:

- 16.21 Dune mobili e dune bianche
- 19 Isolette rocciose e scogli
- 31.75 Arbusti spinosi emisferici corsico-sardi
- 32.13 Matorral di ginepri
- 32.215 Macchia bassa a *Calicotome sp. pl.*
- 32.23 Formazioni ad *Ampelodesmus mauritanicus*
- 32.3 Garighe e macchie mesomediterranee silicicole
- 32.4 Garighe e macchie mesomediterranee calcicole
- 34.5 Prati aridi mediterranei

- 41.9 Castagneti
- 42.82 Pinete a pino marittimo (*Pinus pinaster* = *P. mesogeensis*)
- 42.83 Pinete a pino domestico (*Pinus pinea*) naturali e coltivate
- 42.84 Pineta a pino d'Aleppo
- 45.318 Leccete dell'Italia centrale e settentrionale
- 82.3 Colture di tipo estensivo e sistemi agricoli complessi
- 86.1 Città centri abitati
- 86.41 Cave

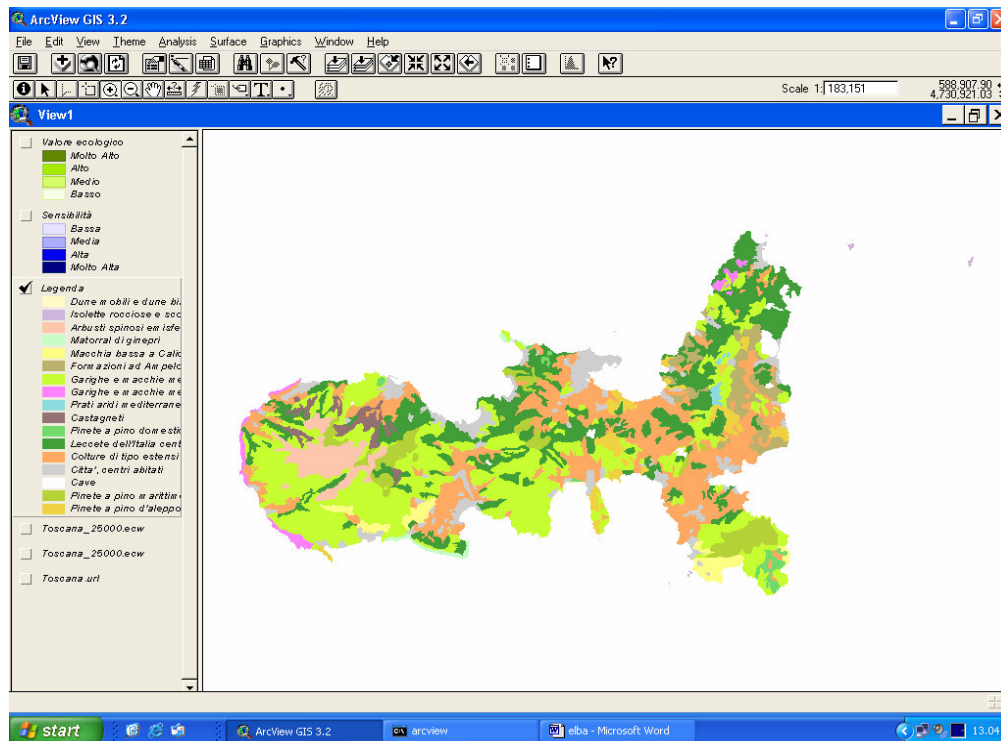


Fig. 3.1: la carta degli habitat di Carta della Natura

Il grafico di fi. 3.2 mostra la distribuzione degli habitat nell'isola.

In generale gli arbusteti sono tra gli ambienti maggiormente rappresentati, si tratta infatti di tipiche formazioni dell'ambiente mediterraneo. L'unica tipologia rilevata relativa ai prati è quella che presenta comunità a terofite annuali

Si mette in evidenza che la grande attrazione turistica e la conseguente importante presenza di strutture ricettive rende l'Isola fortemente antropizzata. 1598,941942 sono gli ettari occupati dai centri abitati, cioè circa il 7% del territorio. Inoltre l'Isola d'Elba è sicuramente uno dei siti più importanti per la presenza di miniere, sia per l'eccezionale ritrovamento di campioni di minerali sia per l'estrema varietà di questi. Il codice Corine

Biotope che riconduce a tale tipologia è 86.41 Cave, con il quale sono state cartografate tutte le zone interessate alle attività estrattive (in questo caso si tratta di miniere a cielo aperto)

Le coltivazioni dell'Isola, come del resto in buona parte della Toscana, sono di tipo estensivo e presentano spesso un mosaico di colture sia di tipo arboreo (frutteti) sia di tipo erbaceo e orticolo, intercalate da siepi, boschetti e praticelli che nel loro insieme vanno a costituire sistemi agricoli complessi.

Per quanto riguarda gli habitat forestali, la coltivazione del castagno è decisamente ridimensionata e le vecchie coltivazioni hanno dato vita a boschi naturalizzati, le leccete all'Elba sono ben rappresentate, si tratta esempi di vegetazione climacica con formazioni dominate da *Quercus ilex* generalmente associate ad altre querce come *Q. suber*, *Q. pubescens* e *Q. cerris*, mentre le pinete presenti all'isola d'Elba appartengono a tre diverse tipologie (Pino d'Aleppo, Pino Marittimo, Pino Domestico), tutte di origine antropica, da rimboschimenti che vengono effettuati in maniera copiosa nell'isola, in quanto spesso teatro di incendi.

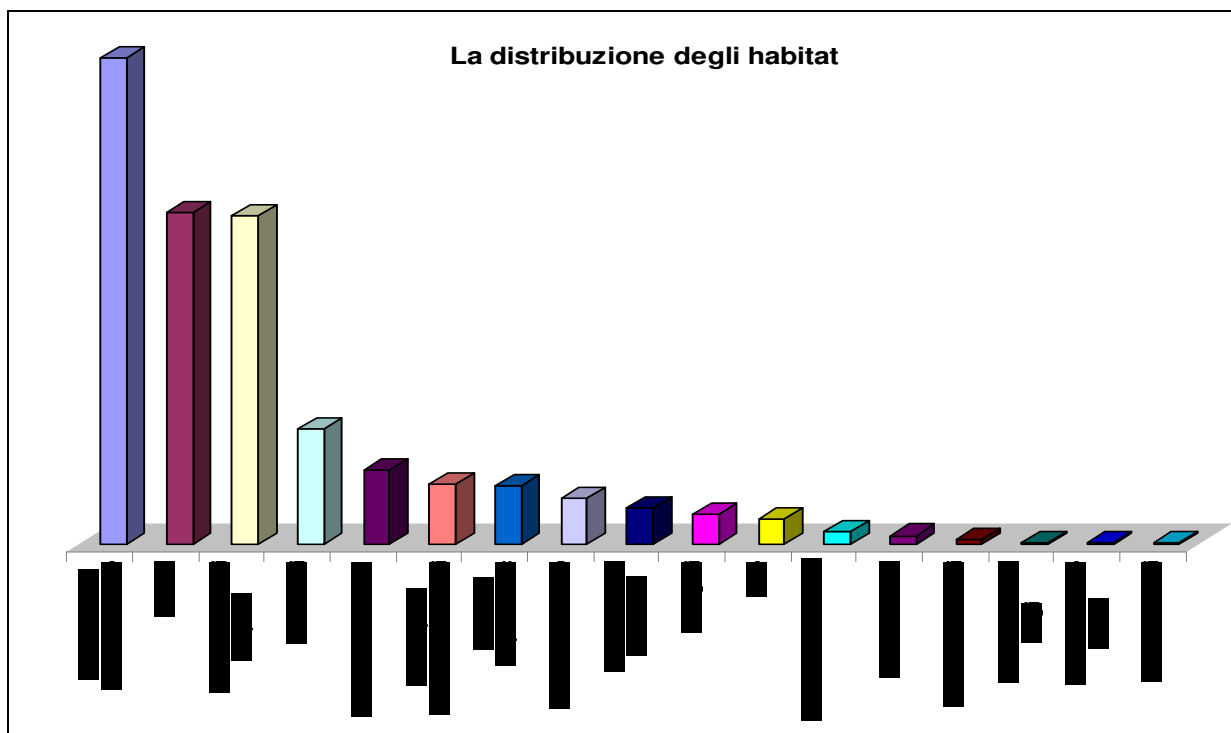


Fig. 3.2: distribuzione degli habitat dell'Isola d'Elba.

In fig.3.3 sono schematizzati i risultati dei calcoli dei diversi indicatori per i parametri di Carta della Natura.

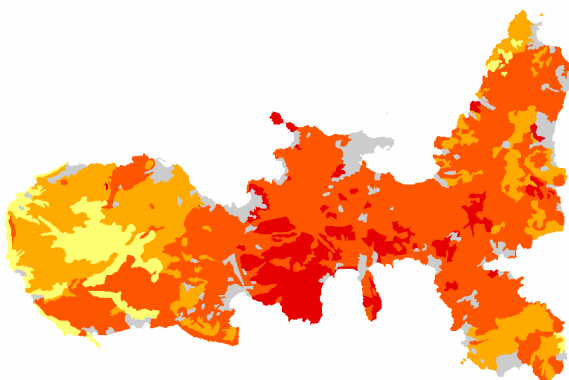
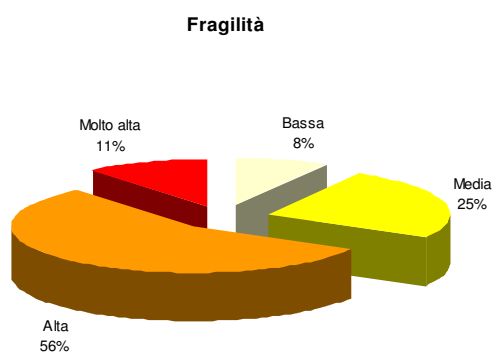
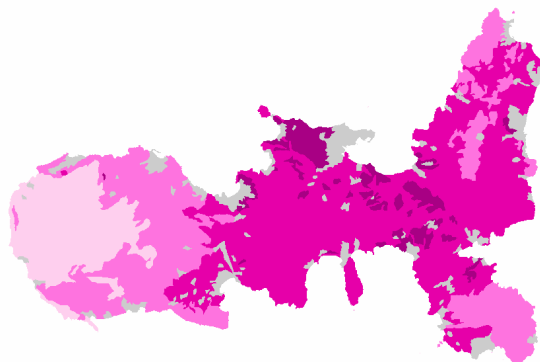
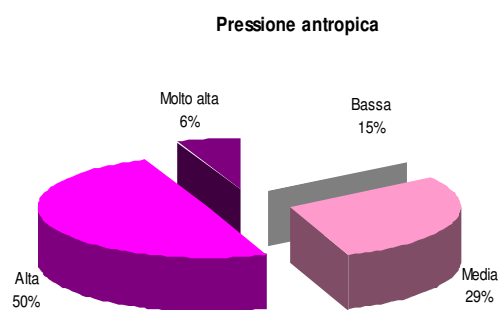
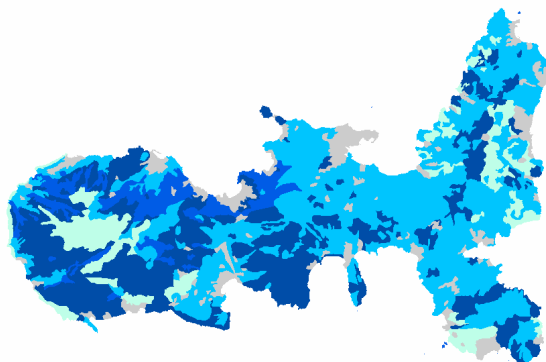
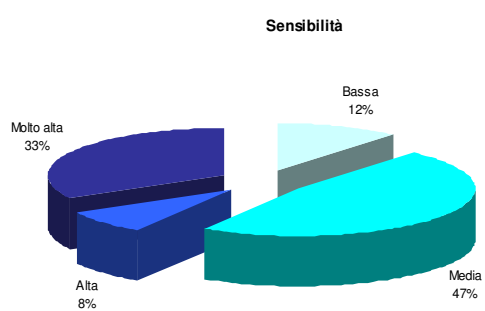
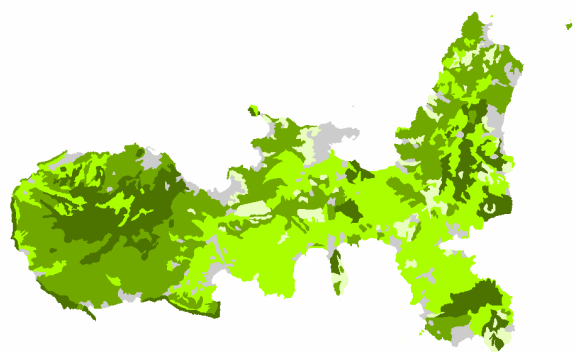
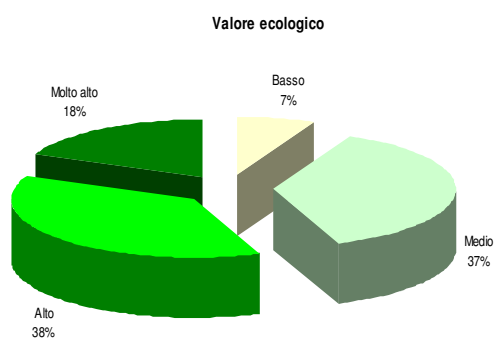


Fig3.3: risultati degli indici applicati in Carta della Natura

4 MISURE DI GEODIVERSITA' DELL'ISOLA D'ELBA

Il modello di valutazione della geodiversità utilizzato è stato sviluppato e proposto dal Dipartimento POLIS dell'Università degli Studi di Genova, nel corso di uno studio, effettuato in convenzione con l'APAT, finalizzato a realizzare un Database *Geositi* contenente le schede di prima segnalazione del patrimonio geologico italiano, per produrre, attraverso delle procedure di validazione delle schede, il repertorio nazionale dei geositi. Tale attività ha delineato le linee guida per la costruzione del Database ed ha effettuato analisi realistiche sulla base delle quali poter attuare politiche di protezione e valorizzazione dei *Geositi* in particolare e della *Geodiversità* in generale.

La base concettuale del modello parte proprio dalla definizione del termine geodiversità espressa da Murray Gray (vedi par. 3.1), il quale sottolinea come il concetto debba essere fisicamente e concettualmente analizzato sia nelle sue singole componenti che nella somma di esse. Quindi la proposta ha l'obiettivo di elaborare i diversi "profili" da cui la Geodiversità può essere costituita, tenendo conto del fatto che alcune aree possono presentare un'alta diversità legata a un aspetto, ad esempio varietà di affioramenti litologici, mentre altre possono essere ricche dal punto di vista delle forme, quindi considerando l'aspetto geomorfologico. E' per questo motivo che risulta tanto importante individuare e analizzare separatamente le diverse caratteristiche, quanto poi valutarle nel loro complesso, in modo da poter associare ad ogni area oggetto di studio una valutazione quantitativa, scomponibile però nelle diverse componenti che tengono conto della particolarità dell'area in questione. Il metodo si propone inoltre di elaborare misure quantitative attraverso parametri ripetibili su diversi territori e quindi generalizzabili, partendo dal presupposto che la diversità sia uno dei fattori che determina il valore naturale di un sito.

4.1 Modello di valutazione della geodiversità utilizzato

La messa a punto del metodo presuppone la disponibilità di dati in forma georeferenziata, associati a cartografie redatte in formato GIS. Da questa base di dati si può iniziare a studiare le forme di aggregazione dei fenomeni nello spazio e le loro relazioni.

L'analisi spaziale deve essere un'*analisi multistrato*, ossia l'analisi comparativa di informazioni contenute in più strati informativi, sovrapposti attraverso la strumentazione GIS. Ma a priori dev'essere compiuta un'analisi indipendente dei singoli strati, considerando che un singolo aspetto può fornire di per sé utili conclusioni, e, inoltre, la conoscenza approfondita di un settore permette di gestire meglio la successiva comparazione.

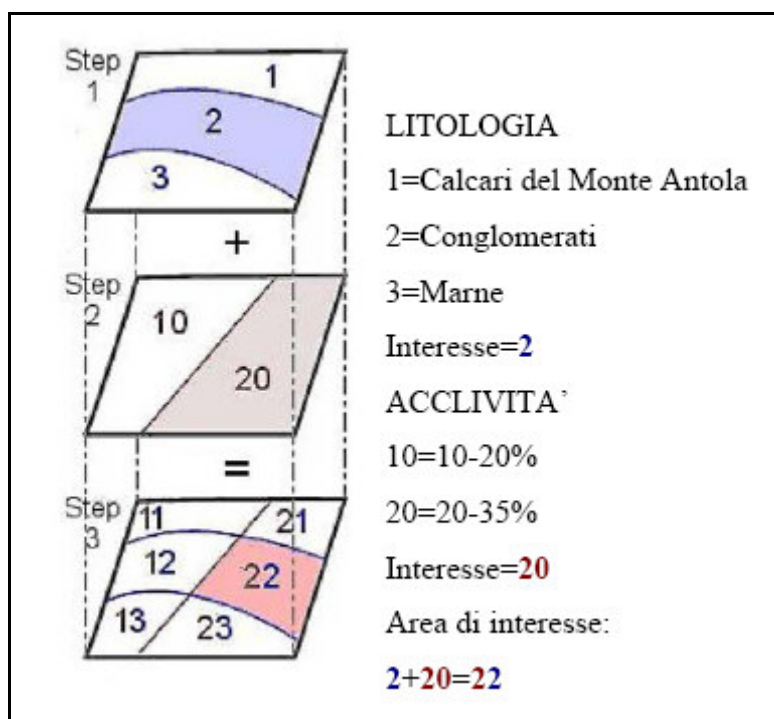


Fig. 4.1 Esempio di analisi dei vari livelli di geodiversità (Università di Genova – Dipartimento POLIS).

E' quindi fondamentale:

1. individuare i descrittori più idonei a descrivere ogni livello di studio della geodiversità, partendo dalla definizione del termine come variazione dei caratteri geologici, geomorfologici, ecc., di un'area. Lo studio a cui si fa riferimento parte da un livello di dettaglio che non arriva a considerare variazioni granulometriche, presenza di microstrutture, ecc., ma considera come primo passo lo studio delle litologie affioranti, per poi andare ad affiancare e sovrapporre, a seconda delle esigenze, gli altri livelli di analisi (geomorfologico, morfografico, presenza di geositi ecc.);

2. dare una valutazione globale di ogni ambito considerato: ogni ambito di studio viene analizzato tramite indici e parametri che diano un'analisi quantitativa di ognuno di essi, per poi avere la possibilità di studiarli separatamente;
3. dare una valutazione complessiva dell'area oggetto di studio, incrociando i diversi ambiti per ottenere un'analisi comprensiva di tutti gli aspetti esaminati;
4. indicare quali sono gli strumenti ed il materiale cartografico necessari per poter ricavare ed applicare i descrittori

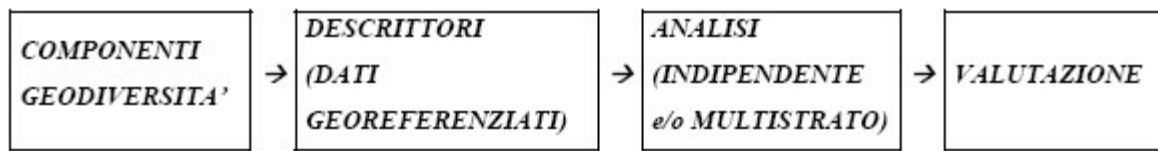


Fig. 4.2 Percorso di valutazione delle diverse componenti della geodiversità (Università di Genova – Dipartimento POLIS).

Si tratta, operativamente di un overlay vettoriale, in cui dati gli oggetti vettoriali rappresentati nei diversi strati informativi ne viene calcolata l'intersezione e viene generato un nuovo strato informativo (step 3 in fig. 4.1) che mette in evidenza una possibile combinazione delle diverse informazioni. Ogni indicatore di ciascun ambito viene classificato, a seconda del valore ottenuto, in Eccellente (A), Buono (B) e Sufficiente (C), assegnando a queste valutazioni rispettivamente i valori 3, 2, 1, per poi ottenere una valutazione globale del singolo ambito. Infine bisogna schematizzare tutti i valori ottenuti nei diversi ambiti in uno schema riassuntivo, comprendente i valori di ogni singolo indicatore e le valutazioni globali relative ad ogni profilo, per visualizzare il peso di ogni livello nella seguente valutazione complessiva. Quest'ultima si calcolerà come Valutazione Globale Media, costituendo una sintesi dei dati ottenuti per ciascun area studiata.

La valutazione della geodiversità dell'Isola d'Elba è stata realizzata utilizzando gli indici sviluppati nello studio citato, riferibili alle seguenti componenti della geodiversità:

- litologia,
- geomorfologia
- morfografia, a sua volta scomposta nello studio dell'altimetria, dell'acclività e dell'esposizione di versanti,

- presenza di geositi.

Dal punto di vista cartografico è stato scelto di analizzare il territorio scomponendolo nelle aree di studio individuate dalle unità di paesaggio definite nell'ambito del progetto Carta della Natura di questo territorio, e in un secondo momento di applicare il metodo anche ai diversi bacini idrografici in cui l'isola è stata suddivisa, nel corso del presente stage, tramite il metodo automatico descritto nel cap. 2. Essendo 50 i bacini idrografici, nei prossimi paragrafi si riporta solo la visualizzazione grafica dei risultati complessivi ottenuti per ogni ambito e la valutazione globale.

Bisogna inoltre sottolineare il fatto che quando il modello indicava di confrontare i risultati in ogni area ottenuti per un parametro con quelli riguardanti l'intera regione in cui l'area di studio è contenuta, si è scelto invece di confrontarli con i valori riguardanti l'intera Isola d'Elba, per un motivo pratico, la mancanza di dati su scala regionale, oltre che per il fatto che, considerando che l'isola è un'entità fisiografica a sé stante, si è ritenuto di garantire comunque coerenza nelle valutazioni.

4.2 La diversità litologica

Gli indici riguardanti il profilo litologico considerano il numero di litologie presenti all'interno di ciascuna area studiata e la loro estensione. Lo strato informativo utilizzato è la carta geologica dell'Isola d'Elba alla scala 1:25.000 (Trevisan, 1967).

- ❖ *Superficie relativa (S)*, percentuale di superficie ricoperta nel sito dalla litologia specifica rispetto alla copertura della stessa su tutta l'isola:

$$S = A_{Ln}/A_{LnR} \%$$

dove A_{Ln} = superficie occupata dalla litologia nell'area studiata e A_{LnR} = superficie occupata dalla n-litologia sul territorio regionale.

Valutazioni:

- 1 (C) = $S \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < S \leq 66\%$;
- 3 (A) = $S > 66\%$.

- ❖ *Rappresentatività (R)*, numero di litologie rappresentate sull'area rispetto al numero di litologie presenti nella regione.

$$R = N_L/N_R. \%$$

dove N_L = numero di litologie all'interno dell'area e N_R = numero di litologie rappresentate in tutta l'isola.

Valutazioni:

- 1 (C) = $R \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < R \leq 66\%$;
- 3 (A) = $R > 66\%$.

❖ *Densità relativa* (Dr), numero di litologie presenti sull'area rispetto alla superficie dell'area stessa:

$$DR = N_L/A_{TOT}$$

dove A_{TOT} = superficie totale dell'area studiata.

Valutazioni:

$$\begin{aligned} 1 (C) &= x < \frac{\bar{N}_L - \sigma}{A_{TOT}}; \\ 2 (B) &= \frac{\bar{N}_L - \sigma}{A_{TOT}} < x < \frac{\bar{N}_L + \sigma}{A_{TOT}}; \\ 3 (A) &= x > \frac{\bar{N}_L + \sigma}{A_{TOT}}, \end{aligned}$$

In tab. 4.1 si riporta la griglia ottenuta per ciascuna unità di paesaggio, con la valutazione globale, calcolata come media aritmetica dei 3 parametri. In generale, l'analisi della diversità litologica non ha dato come risultati valori particolarmente elevati (fig. 4.2), soprattutto per quelle aree caratterizzate da omogeneità di affioramenti, come l'Unità del Monte Calamita, quasi interamente ricoperta dall'affioramento dello Gneiss di Calamita. A questo proposito in effetti si è concluso che gli indici di diversità litologica dovrebbero forse dare maggiore peso all'omogeneità di questo carattere, considerando che aree molto frammentate non sono spesso legate a un elevato pregio.

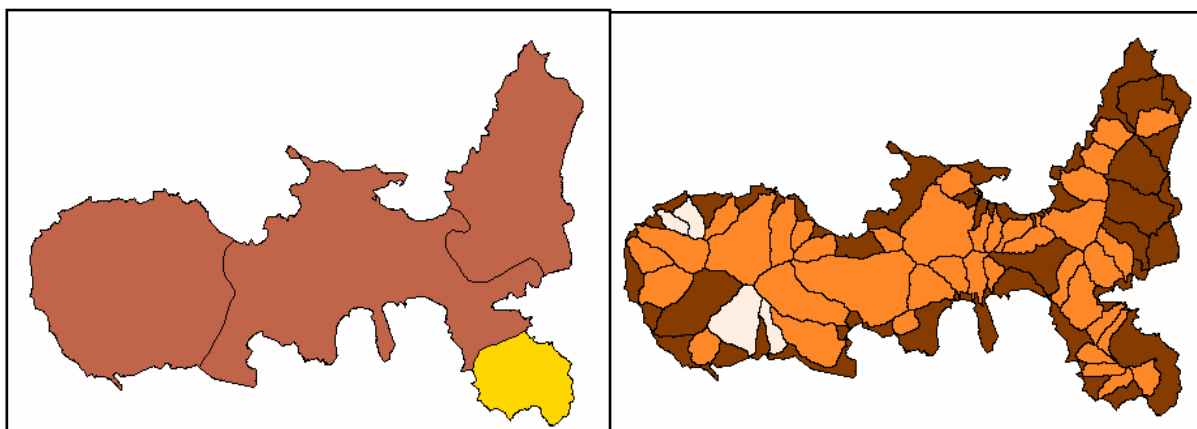


Fig. 4.3: diversità litologica (più elevata dove colori più scuri)

UNITA' di PAESAGGIO ->	Colline dell'Elba Nord-orientale				Colline e piane dell'Elba centrale e orientale				Monte Calamita				Monte Capanne			
litologie	S	R	Dr	VG	S	R	Dr	VG	S	R	Dr	VG	S	R	Dr	VG
SERPENTINE	2	3	2	2,3	1	3	2	2,0	1	1	1	1	2	2	2	2,00
ALLUVIONI	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
SILICATI_F	2	3	2	2,3	2	3	2	2,3	1	1	1	1	1	2	2	1,67
BRECCE_TET	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
ANFIBOLITI	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
DETRITO	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
GRUPPO_DEL	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FORMAZIONE	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
GABBRI	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	2	2	2	2,00
GNEISS_DI_	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	3	1	1	1,67	1	2	2	1,67
ALLUVIONI_	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
SABBIE_PIù	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
BRECCE_AD_	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	3	2	2	2,33
BRECCE_AD_	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	3	2	2	2,33
PORFIDI_GR	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CORNUBIANI	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	3	2	2	2,33
GRANODIORI	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	3	2	2	2,33
DIABASI_PR	2	3	2	2,3	2	3	2	2,3	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FLYSCH_CRE	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CORNUBIANI	1	3	2	2,0	2	3	2	2,3	1	1	1	1	2	2	2	2,00
MARMI_PIù_	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FRANE	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
DEPOSITI_E	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
ARGILLOSCI	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
ARENARIE_Q	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
DISCARICHE	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
QUARZOMONZ	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FLYSCH_PAL	1	3	2	2,0	3	3	2	2,7	1	1	1	1	1	2	2	1,67
PORFIROIDI	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FILLADI_CA	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
FORMAZIONE	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
RADIOLARIT	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
ANFIBOLITI	1	3	2	2,0	1	3	2	2,0	1	1	1	1	3	2	2	2,33
CALCESCIST	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
MARMO_BIAN	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CALCARI_A_	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CALCARI_CO	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CALCARE_MA	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67
CALCARI_RO	3	3	2	2,7	1	3	2	2,0	1	1	1	1	1	2	2	1,67

Tab. 4.1 Valutazione della geodiversità litologica

4.3 La diversità geomorfologica

In questo caso vengono analizzati i diversi processi da cui hanno origine le forme geomorfologiche che si trovano nelle aree studiate. Per questo ambito di studio è stata utilizzata la carta geomorfologica alla scala 1:10.000, elaborata presso il Servizio geologico del Dipartimento Difesa del suolo, digitalizzata in 3 strati informativi vettoriali, uno puntuale, uno lineare e uno poligonale, e semplificati in modo da contenere soltanto l'informazione dei processi che originano ciascuna forma, complessivamente 9:

- antropico
- carsico
- eolico
- fluvio-denudazionale
- gravitativo
- marino
- morfotettonico-strutturale
- poligenico

❖ *Rappresentatività (R)*, numero di classi di forme rappresentate nell'area rispetto al numero totale di classi considerate:

$$R = N_{Cf} / N_{Ctot} \%$$

dove N_{Cf} = numero di classi presenti nell'area e N_{Ctot} = numero totale delle classi considerate (9).

Valutazioni:

- 1 (C) = $R \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < R \leq 66\%$;
- 3 (A) = $R > 66\%$.

❖ *Densità relativa (Dr)*, numero di forme rispetto all'area studiata:

$$DR = N_F / A_{TOT}$$

dove N_F = numero di forme presenti nell'area e A_{TOT} = superficie totale dell'area studiata.

Valutazioni:

$$1 \text{ (C)} = x < \frac{\overline{N_F} - \sigma}{A_{TOT}};$$

$$2 \text{ (B)} = \frac{\overline{N_F} - \sigma}{A_{TOT}} < x < \frac{\overline{N_F} + \sigma}{A_{TOT}};$$

$$3 \text{ (A)} = x > \frac{\overline{N_F} + \sigma}{A_{TOT}};$$

dove N_F = media delle forme nell'area e σ = deviazione standard.

- ❖ *Densità specifica* (Ds), numero di forme legate alla litologia da cui si generano rispetto all'area occupata dalla litologia stessa:

$$Ds = N_F / A_{nL}$$

dove A_{nL} = superficie occupata dalla n-litologia nell'area studiata.

Valutazioni:

$$1 \text{ (C)} = x < \frac{\overline{N_F} - \sigma}{A_{nL}};$$

$$2 \text{ (B)} = \frac{\overline{N_F} - \sigma}{A_{nL}} < x < \frac{\overline{N_F} + \sigma}{A_{nL}};$$

$$3 \text{ (A)} = x > \frac{\overline{N_F} + \sigma}{A_{nL}}.$$

In tab. 4.2 si riporta la griglia ottenuta per ciascuna unità di paesaggio, con la valutazione globale, calcolata come media aritmetica dei 3 parametri.

	Ds	R	Dr	VG
Colline dell'Elba Nord-orientale	2,1	3	2	2,37
Colline e piane dell'Elba centrale e orientale	2,1	3	3	2,70
Monte Calamita	2,1	3	1	2,03
Monte Capanne	2	3	2	2,33

Tab. 4.2 La diversità geomorfologica

Essendo la carta geomorfologica dell'isola composta da 3 strati vettoriali di dati, l'analisi delle forme geomorfologiche si è rilevata più complessa delle altre analisi. I risultati mostrano valori alti per quasi tutta l'Isola (Fig. 4.4).

In particolare il terzo indice, densità specifica, mette in relazione le diverse forme con le litologie affioranti da cui esse si originano. Ha perciò richiesto l'analisi di una grande quantità di dati, dovendo mettere in relazione le più di 8000 forme geomorfologiche complessive dell'isola, classificate in base alle nove tipologie di processi che le hanno generate, con i 39 litotipi della carta geologica. Ne è risultata una tabella di conteggio delle

forme interne a ciascuna litologia, conteggio è schematizzato nella tabella 4.3, valida per tutta l'Isola d'Elba, ma il cui procedimento è stato ripetuto per ognuna delle quattro unità di paesaggio (le tabelle per le unità di paesaggio sono riportate in appendice, mentre si è omesso il procedimento per i 50 bacini idrografici). Nella valutazione globale della diversità geomorfologica si è inserito, per ogni unità di paesaggio, la media dei valori ottenuti per ciascuna forma.

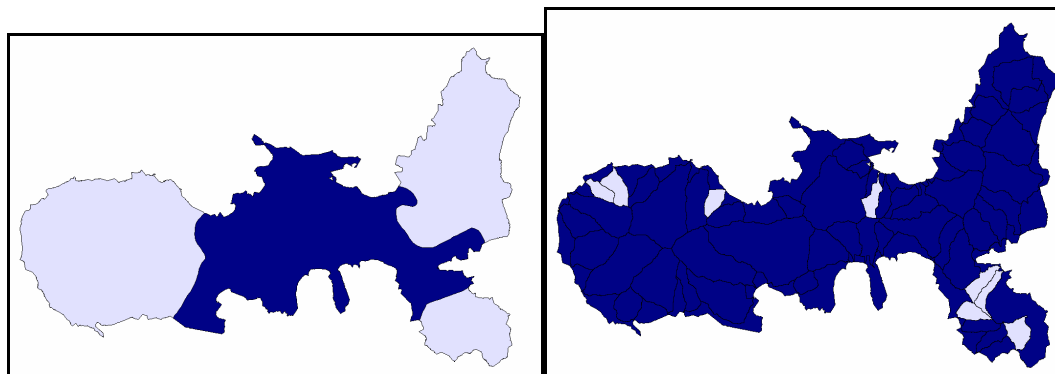


Fig. 4.4: diversità geomorfologica (colori più scuri indicano valori più alti)

DESCRIZION	Alterazione meteorica	Antropico	Carsico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marno	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	KM2	Ds	Ds
Alluvioni	0	32	0	20	202	25	75	4	0	358	14,62	24,49	2
Alluvioni antiche	0	29	0	3	342	79	33	2	0	488	12,33	39,58	2
Anfiboliti	0	1	0	6	2	0	18	0	0	27	0,33	82,03	2
Anfiboliti ad orneblenda - Diabasi con ialoclastiti associate	1	0	0	0	37	18	6	13	0	75	3,55	21,11	2
Arenarie quarzose e scisti arenacei con livelli conglomeratici	0	8	0	0	24	28	11	1	0	72	1,94	37,19	2
Argilloscisti soltosi con intercalazioni di calcari silicei	0	7	0	0	36	10	20	4	0	77	1,69	45,60	2
Brecce ad elementi di flysch	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0,05	40,62	2
Brecce ad elementi ofiolitici	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,02	45,55	2
Brecce tettoniche	0	3	0	0	0	0	2	0	0	5	0,14	36,85	2
Calcare massiccio	0	2	0	0	16	6	3	2	0	29	0,70	41,62	2
Calcari a liste di selce	0	2	0	0	2	4	0	0	0	8	0,19	42,14	2
Calcari con lenti e noduli di selce	0	1	1	0	6	0	2	0	0	10	0,24	41,47	2
Calcari rosei talvolta nodulari	0	17	0	0	36	41	3	3	0	100	3,11	32,17	2
Calcescisti e cipollini	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0,08	12,11	2
Cornubianiti calcarenitiche e marmi prevalentemente diopside	0	0	0	0	2	4	5	0	0	11	0,33	32,98	2
Cornubianiti, scisti cornubianitici e scisti biotitici	0	0	0	0	25	56	39	2	0	122	2,16	56,46	2
Depositi eolici	0	0	0	8	1	0	4	0	0	13	0,08	153,89	2
detrito	0	10	0	5	91	93	15	1	1	216	5,51	39,21	2
Diabasi prevalentemente in pillow e massicci con ialoclastite associate	0	7	0	5	188	159	57	6	32	454	11,69	38,82	2
discariche	0	9	0	0	11	6	5	0	0	31	0,88	35,33	2
Filladi calcariferi con lenti e banchi di calcescisti	0	1	0	0	34	14	14	1	0	64	2,13	29,99	2
Flysch cretaceo (Calcari marnosi e marne grigio scure alternati con argilloscisti sitosi)	2	42	1	1	420	358	131	43	15	1013	19,74	51,33	3
Flysch paleocenico (Argille e marne intercalate a calcari e brecce ofiolitiche)	0	1	0	0	19	4	10	3	0	37	1,10	33,65	2
Formazione a Posidonia alpina -argille	0	8	0	0	41	9	8	6	0	72	2,04	35,34	2

poco marnose													
Formazione evaporitica	1	46	0	0	26	25	7	8	0	113	4,38	25,82	2
Frane	0	0	0	0	19	9	0	0	0	28	0,52	54,16	2
Gabbri	0	0	0	0	8	10	18	1	0	37	0,92	40,25	2
Gneiss di Calamita	1	40	0	1	233	48	89	7	21	440	18,57	23,69	2
Granodiorite	69	7	0	0	552	546	79	245	12	1510	58,06	26,01	3
Gruppo del verrucano - Anageriti, quarziti, scisti quarzitici	1	2	0	4	8	2	16	0	0	33	0,90	36,71	2
Marmi più o meno ricchi in quarzo - Calcarei compatti con livelli di argille e marne	0	31	0	1	147	198	54	26	4	461	9,86	46,77	2
Marmo bianco giallastro massiccio	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0,08	24,90	2
Porfidi granodioritici e granitici	15	46	0	1	516	510	131	77	27	1323	24,51	53,98	3
Porfiroidi e scisti porfirici passanti a quarziti	0	0	0	0	12	8	17	0	0	37	1,32	27,94	2
Quarzomonzonite	0	0	0	0	3	1	3	0	0	7	0,17	40,02	2
Radiolariti calcifere	3	4	0	0	129	137	23	51	0	347	7,42	46,76	2
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	30	0	42	80	9	8	0	0	169	2,55	66,39	2
Serpentine lherzolitiche e harzburgitiche passanti a olivinit e Olivinit	2	7	0	0	119	125	69	10	3	335	8,39	39,92	2
Silicati ferro-calciferi in ammassi irregolari	0	23	0	0	11	24	19	5	0	82	1,23	66,89	2
Totale complessivo	95	417	2	97	3399	2568	996	521	115	8210			
												media	2,08

Tab. 4.3: densità specifica, Isola d'Elba

4.4 La diversità morfografica

Nel modello utilizzato, la diversità morfografica si scompone nell'analisi di tre aspetti: altimetria, acclività ed esposizione dei versanti.

4.4.1 La diversità altimetrica

Per questo aspetto è stato utilizzato il DTM dell'Isola d'Elba, riclassificato in 11 fasce altimetriche con intervallo definito di 100m.

- ❖ *Coefficiente di variazione (Cv)*, che nel modello risultava come il rapporto tra la deviazione standard e lo scarto di ogni valore dalla media, ma che qui si è corretto come rapporto tra deviazione standard e media, per evitare di avere valori negativi, non considerati nella valutazione.

$$Cv = \sigma/\mu$$

Valutazioni:

- 1 (C) = $Cv \leq 0,3$;
- 2 (B) = $0,31 \leq Cv \leq 0,7$;
- 3 (A) = $0,71 \leq Cv \leq 1$.

- ❖ *Integrale ipsometrico (I)*, descrive lo stadio evolutivo di un rilievo. E' dato dall'equazione

$$1 = \int_{Q_m}^{Q_M} x dy$$

Area sottostante la funzione ipsometrica ($y=f(x)$)/area del quadrato di base A e altezza H poste pari ad 1.

Valutazioni:

- 1 (C) = $I < 35\%$;
- 2 (B) = $35\% \leq I \leq 60\%$;
- 3 (A) = $I > 60\%$

- ❖ *Rappresentatività (R)*: numero di classi altimetriche rappresentate nell'area rispetto al numero totale di classi presenti nell'isola:

$$R = N_{Ca} / N_{Ctot}$$

dove N_{Ca} = numero di classi altimetriche presenti nell'area e N_{Ctot} = numero totale delle classi considerate

Valutazioni:

- 1 (C) = $R \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < R \leq 66\%$;
- 3 (A) = $R > 66\%$.

In tab. 4.4 si riporta la griglia ottenuta per ciascuna unità di paesaggio, con la valutazione globale, calcolata come media aritmetica dei 3 parametri. Di seguito (fig. 4.6) gli integrali ipsometrici ottenuti per le quattro unità di paesaggio; non si riportano invece quelli ottenuti per i 50 bacini idrografici

	I	R	Cv	VG
Colline dell'Elba Nord-orientale	1	2	2	1,67
Colline e piane dell'Elba centrale e orientale	1	2	3	2,00
Monte Calamita	2	2	2	2,00
Monte Capanne	1	3	2	2,00

Tab. 4.4 La diversità altimetrica

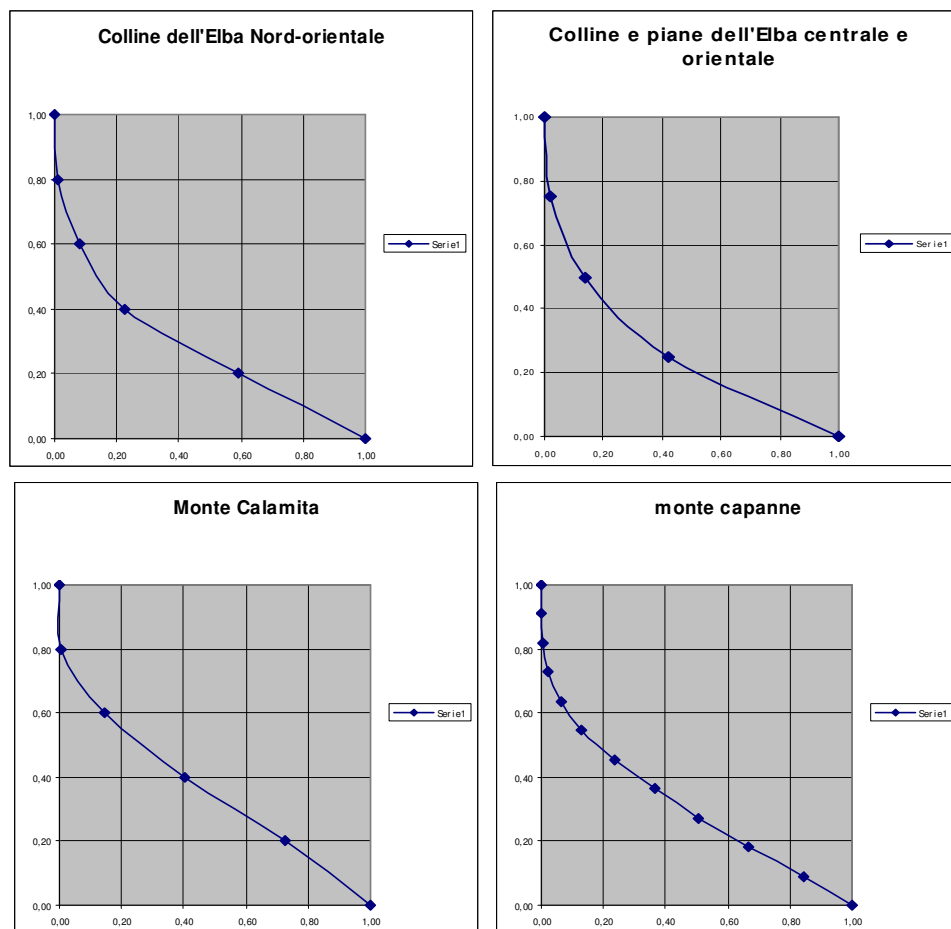


Fig. 4.6 Integrali ipsometrici delle 4 unità di paesaggio

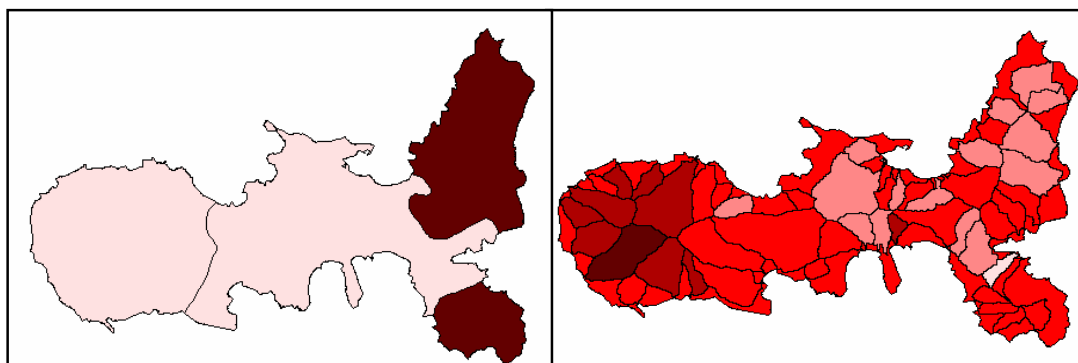


Fig. 4.7: diversità altimetrica (colori più scuri indicano valori più alti)

4.4.2 La variabilità di pendenza

Questo parametro viene studiato in base alla frammentazione delle classi in cui esso è rappresentato. Lo strato informativo rappresentante l'acclività è stato riclassificato in 7 classi di pendenza per poter individuare a quale classe appartiene il maggior numero di aree, così da individuare quella più frammentata.

- ❖ *Rappresentatività (R)*, numero di classi di pendenza rappresentate nell'area rispetto al numero totale di classi presenti sull'isola:

$$R = N_{Cp} / N_{Ctot} \%,$$

dove N_{Cp} = numero di classi presenti nell'area e N_{Ctot} = numero totale delle classi considerate ($N_{Ctot} = 5$ o 7).

Valutazioni:

- 1 (C) = $R \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < R \leq 66\%$;
- 3 (A) = $R > 66\%$.

- ❖ *Frammentazione totale (Ftot)*, esprime il livello di frammentazione totale delle classi nell'area oggetto di studio:

$$F_{TOT} = N_{subaree\ totali} / A_{TOT}$$

dove $N_{subareetotali}$ = media delle forme nell'area.

Valutazioni:

$$\begin{aligned} 1 (C) &= x < \frac{\overline{N}_{subareetotali} - \sigma}{A_{TOT}} ; \\ 2 (B) &= \frac{\overline{N}_{subareetotali} - \sigma}{A_{TOT}} < x < \frac{\overline{N}_{subareetotali} + \sigma}{A_{TOT}} ; \\ 3 (A) &= x > \frac{\overline{N}_{subareetotali} + \sigma}{A_{TOT}} , \end{aligned}$$

- ❖ *Frammentazione (F)*, esprime il livello di frammentazione di ciascuna classe:

$$F = n_i / N_{subaree\ totali} \%,$$

% dove n_i = numero di aree in cui è divisa la classe i-esima nell'area studiata.

Valutazioni:

- 1 (C) = $F \leq 33\%$;
- 2 (B) = $33\% < F \leq 66\%$;
- 3 (A) = $F > 66\%$.

In tab. 4.5 si riporta la griglia ottenuta per ciascuna unità di paesaggio, con la valutazione globale, calcolata come media aritmetica dei 3 parametri. Per l'indice di frammentazione si riporta la media dei valori ottenuti per ciascuna classe all'interno di ciascuna area.

UNITA' di PAESAGGIO	Colline dell'Elba Nord-orientale				Colline e piane dell'Elba centrale e orientale				Monte Calamita				Monte Capanne			
	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG
1 (0 - 10.221)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
2 (10.221 - 20.443)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
3 (20.443 - 30.664)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
4 (30.664 - 40.885)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
5 (40.885 - 51.107)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
6 (51.107 - 61.328)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33
7 (61.328 - 71.549)	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33	1	3	3	2,33

Tab. 4.5 La variabilità di pendenza.

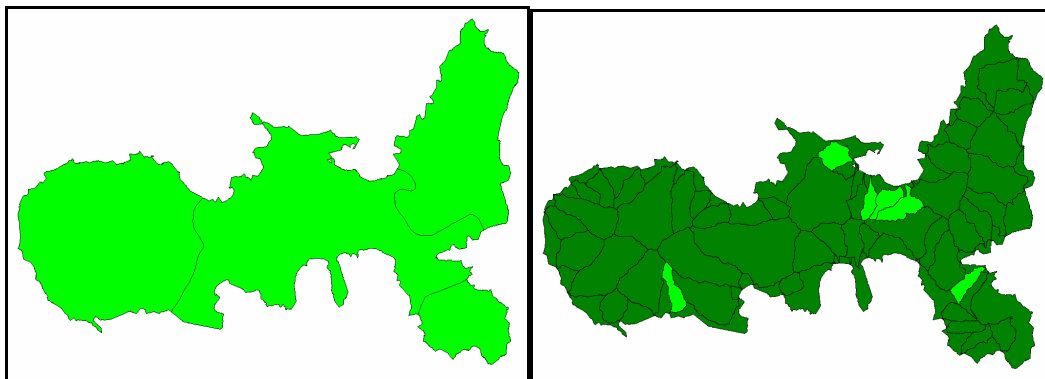


Fig. 4.8: diversità di pendenza (colori più scuri indicano valori più alti).

4.4.3 La variabilità dell'esposizione dei versanti

Per questo parametro vengono considerati gli stessi indici visti per la variabilità di pendenza, ma in questo caso le classi considerate sono 9: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, e una classe F per la zone pianeggianti con pendenza minore di 5° (Tab. 4.6).

UNITA' di PAESAGGIO	Colline dell'Elba Nord-orientale				Colline e piane dell'Elba centrale e orientale				Monte Calamita				Monte Capanne			
	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG	F	R	Ftot	VG
N	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
NE	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
E	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
SE	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
S	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
SW	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
W	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
NW	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33
F	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33	1	3	1	1,67	1	3	3	2,33

Tab. 4.6 La variabilità di esposizione dei versanti

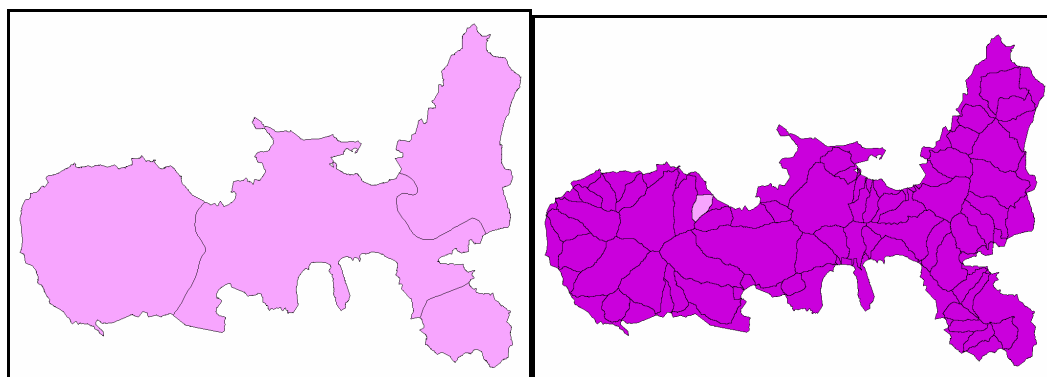


Fig. 4.9: diversità di esposizione dei versanti

L'acclività e l'esposizione dei versanti non sono risultati adatti allo studio della geodiversità delle aree, in quanto distribuiti ovunque in modo omogeneo in questa isola non molto estesa, e quindi non hanno portato a una distinzione all'interno dell'area studiata.

4.5 I geositi

La presenza di geositi è considerata un valore aggiunto e irrinunciabile nelle valutazioni di geodiversità, poiché risultano essere dei siti di particolare valore accertato, da considerare molto rilevante per indicazioni di tutela del territorio

Il peso dei geositi quindi viene valutato in una valutazione globale classificata nel modo seguente:

1 (C) = presenza di 1 geosito

2 (B) = presenza di 2 geositi

3 (A)= presenza di 3 o più geositi.

Nel caso siano presenti nell'area considerata più di 3 geositi, la VG sarà pari ad A ed inoltre tale situazione eccezionale verrà segnalata con un asterisco, ad indicare la maggiore vulnerabilità e l'elevata sensibilità della zona (tab. 4.7).

UNITA' di PAESAGGIO	N geositi	densità (N/area_km ²)	G
Colline dell'Elba Nord-orientale	23	0,47207	3*
Colline e piane dell'Elba centrale e orientale	25	0,28629	3*
Monte Calamita	8	0,511656	3*
Monte Capanne	23	0,323808	3*

Tab. 4.7 Presenza di geositi

Come è mostrato in tabella 4.7, a differenza di quanto descritto nel modello si è preferito prendere in considerazione, invece che il numero di geositi nell'area studiata, la densità di geositi nelle aree, considerando quindi la distribuzione e la diversa estensione sia dei bacini idrografici, che delle UdP. Lo studio dei bacini ha permesso di discriminare meglio tra aree maggiormente interessate dai siti e quelle con minore densità rispetto allo studio delle UdP, troppo grandi e comunque tutte ricche di geositi (fig. 4.10).

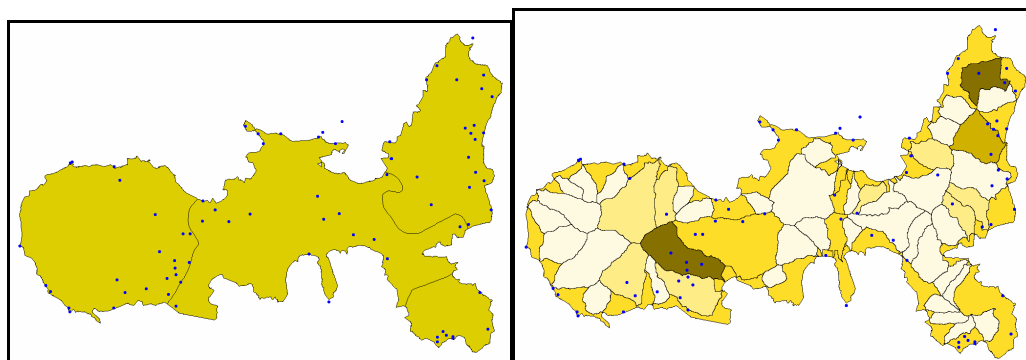


Fig. 4.10: densità di geositi

4.6 Valutazione globale media

A fine studio è stato possibile realizzare una valutazione complessiva media, che costituisce un parametro riassuntivo di tutti gli indici, ognuno dei quali era stato classificato in Eccellente (3), Buono (2) o Sufficiente (1), a seconda di prestabiliti range di variazione. Nella valutazione complessiva dei bacini idrografici si è deciso però di dare un peso maggiore all'indicatore che tiene conto della densità di geositi, costituendo essi un valore aggiunto già validato su base scientifica e condivisa. I risultati sono visualizzati nelle fig. 4.11 e 4.12.

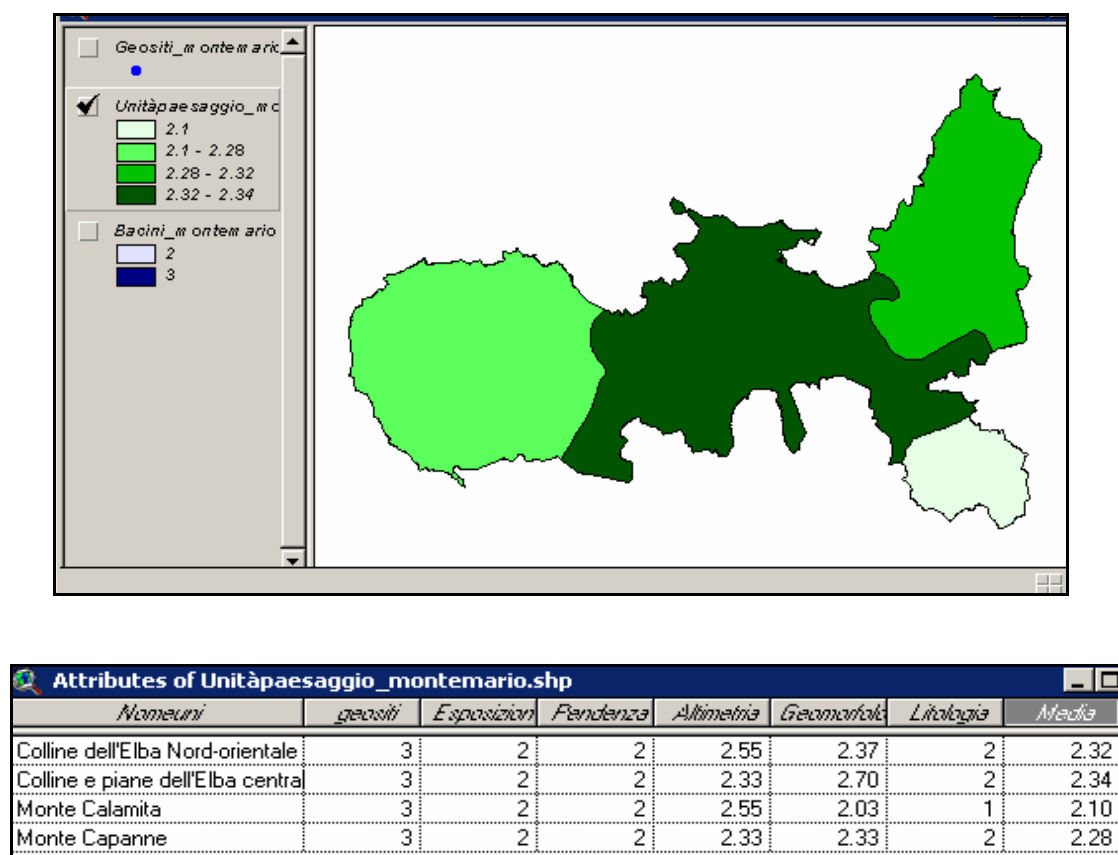


Fig. 4.11: valutazione globale delle unità di paesaggio e relativa tabella

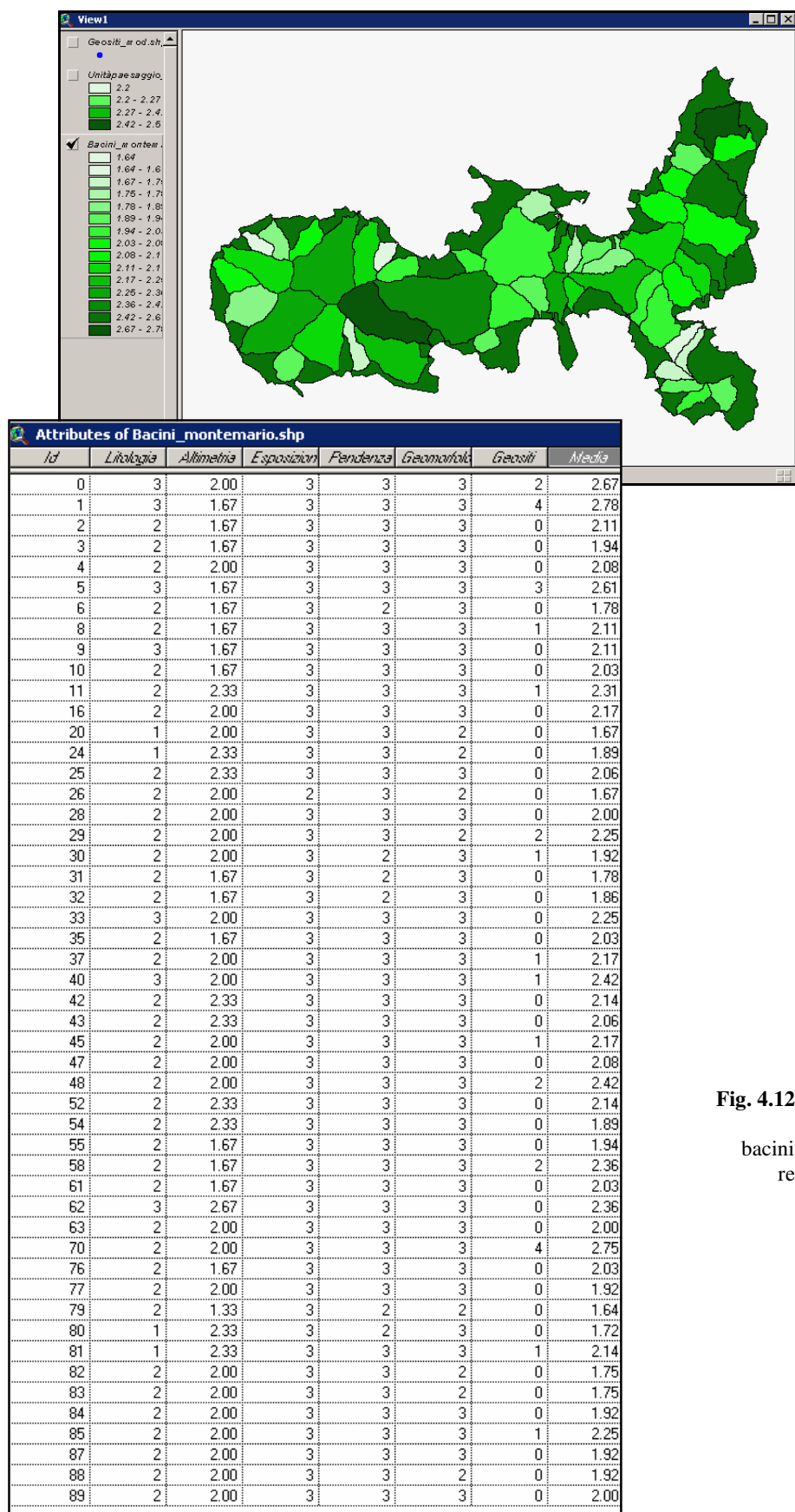


Fig. 4.12: valutazione globale dei bacini idrografici e relativa tabella

Non potendo sottoporre intere unità di paesaggio a tutela, si sono scelte all'interno di esse alcune aree di particolare pregio, come risultato dell'analisi. In particolare è stato messo in evidenza il valore dell'area del bacino con il geosito Torre S. Giovanni, compresa nell'UdP del M. Capanne, che ha mostrato valori degli indici medio-alti, oltre che un elevato numero di geositi (la parte di bacino compresa nell'UdP Colline e Piane dell'Elba Centrale e Orientale risulta invece densamente edificata per la presenza dell'abitato Marina di Campo).



Fig. 4.13: bacino idrografico con Torre S. Giovanni

Inoltre è risultato necessario compiere l'analisi per le aree costiere comprese tra bacini, che precedentemente erano state unite in un unico poligono e valutate come unica area. Ma date le dimensioni dell'Isola tale metodo non permetteva di tenere in debito conto la diversificazione tra le diverse parcelle di terreno costiere comprese tra bacini. Tra esse è risultata di grande pregio l'area di Punta Calamita, che comprende un'elevatissima densità di geositi.

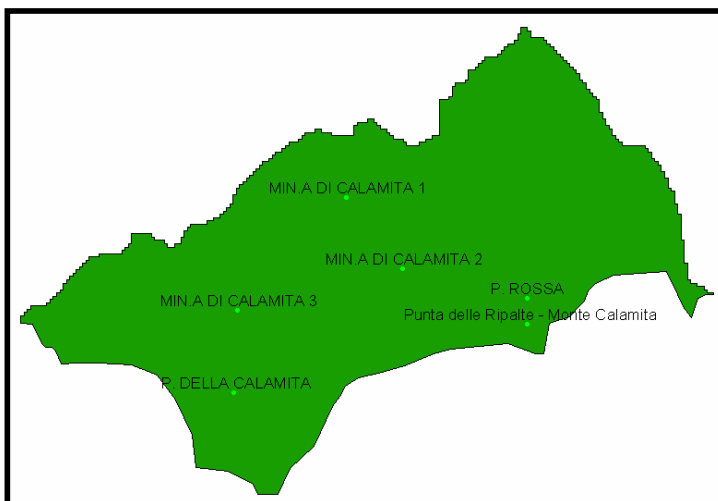


Fig. 4.14: area di Punta Calamita

CONCLUSIONI

Questa prima applicazione del modello di valutazione quantitativa della geodiversità tramite analisi multistrato ha permesso, in primo luogo, di mettere in luce gli aspetti positivi e quelli da migliorare di esso.

In particolare si è mostrata l'efficacia degli indici nel caratterizzare la componente abiotica del territorio, fornendo utili informazioni in maniera più o meno approfondita a seconda delle necessità. Infatti la metodologia di analisi multistrato consente la possibilità di analizzare le componenti della geodiversità separatamente o prendendo insieme solo quegli strati di volta in volta necessari, o, infine, analizzarne in maniera complessiva tutti gli ambiti studiati.

Per alcuni indici, nonostante conducano a informazioni preziose sul territorio, è stata però notata una minore capacità di sintesi, come quelli che per ogni area studiata davano non un solo valore ma tanti valori quante erano le litologie (superficie relativa), le forme geomorfologiche (densità specifica) o le classi di pendenza o di esposizione dei versanti (per entrambi i casi, la frammentazione).

Inoltre è emersa la necessità di affiancare all'analisi, di volta in volta, osservazioni specifiche riguardanti l'area di studio, considerando che spesso l'omogeneità di alcuni dei caratteri considerati comporta un elevato pregio del territorio. Ad esempio l'analisi della diversità litologica ha mostrato valori bassi per l'unità di paesaggio Monte Calamita, poiché essa risulta quasi completamente occupata dall'affioramento dello gneiss di Calamita. Ovviamente gli indici hanno prodotto valori bassi di diversità, ma in questo caso l'omogeneità si traduce nell'alto pregio di questo territorio, caratterizzato dalla presenza dei giacimenti minerari unici della magnetite di Calamita.

In secondo luogo si vuole evidenziare l'utilità di utilizzare due diverse basi cartografiche per i calcoli di geodiversità nel comprendere l'applicabilità del metodo e nel poter fornire delle comparazioni conclusive.

L'utilizzo dei bacini idrografici per le valutazioni ha creato alcuni problemi nello studio dell'Isola. La delimitazione lasciava infatti scoperte le aree costiere tra bacini, che sono dovute essere successivamente suddivise e studiate separatamente, per tenere conto della variabilità dei caratteri in esse. Tale inconveniente è dovuto al fatto che il metodo si è applicato a un'isola non molto estesa, in cui l'effetto bordo è particolarmente forte, e per cui non si poteva tralasciare l'analisi dei settori più vicini alla costa.

D'altronde con ciò non si vuole escludere che l'analisi sia efficiente per lo studio di bacini idrografici in aree con minore estensione del settore costiero, di cui non si è trattato nella tesi, e anzi si vuole qui suggerire l'utilizzo di indicatori aggiuntivi che prevedano l'analisi geomorfica quantitativa dei reticoli idrografici (studiando la densità di drenaggio, gli ordini fluviali e la lunghezza delle aste fluviali), come già accennato nella relazione dell'Università degli Studi di Genova.

Lo studio delle unità di paesaggio si è rivelato molto interessante nella caratterizzazione dell'Isola d'Elba. Si vuole infatti proporre come base di studi futuri, su cui applicare gli indicatori, le unità di paesaggio, la cui caratterizzazione in termini di geodiversità è molto interessante in tutti gli ambiti che prevedono strumenti di valutazione dello stato dell'ambiente naturale e finalizzati a fornire delle basi decisionali nella salvaguardia dei paesaggi e della diversità naturale, come ad esempio la Carta della Natura, o per l'applicazione della Convenzione europea del paesaggio (Firenze, 2000), ratificata e resa esecutiva in Italia solo recentemente (nel gennaio del 2006)⁸.

⁸ Legge 9 gennaio 2006, n. 14

BIBLIOGRAFIA

Libri:

M. D'ANDREA, A. LISI, T. MEZZETTI, *Patrimonio geologico e geodiversità, esperienze ed attività dal Servizio Geologico d'Italia all'APAT*, APAT, 2005

DIPARTIMENTO DIFESA DELLA NATURA, *Carta della Natura dell'Isola d'Elba*, atti d'ufficio, APAT, 2006

D. MAIDMENT, D. DJOKIC, *Hydrologic and Hydraulic. Modeling Support with Geographic Information System*, ESRI, 2000

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA, Dipartimento POLIS, *Convenzione finalizzata all'archiviazione informatizzata dei siti di interesse geologico, ad incremento della banca dati APAT sui Geositi attraverso gli strumenti già acquisiti con la precedente convenzione (rif. Dstn 193/2001) e all'analisi dei dati territoriali e cartografici finalizzata alla definizione di un modello per la valutazione della Geodiversità, Relazione finale, Rif.n. 36296/2003*, atti d'ufficio, APAT, 2006

Riferimenti normativi:

Legge 6 dicembre 1991, n. 394, "Legge quadro sulle aree protette"

Convenzione Europea del Paesaggio, adottata dal Comitato dei Ministri della Cultura e dell'Ambiente del Consiglio d'Europa il 19 luglio 2000, 20 ottobre 2000

Decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 – "Codice dei beni culturali e del paesaggio" (c. d. *Codice Urbani*), ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137

Siti internet:

<http://ceprofs.tamu.edu/folivera/GIS-CE/Exercises/HydrologicParameters/gis2hms.htm>

www.apat.it

www.esriitalia.it

APPENDICE

DESCRIZIONE	Alterazione meteorica	Antropico	Carsico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marino	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	Area km ²	Ds	Ds
Alluvioni	0	32	0	20	202	25	75	4	0	358	14,62	24,49	2
Alluvioni antiche	0	29	0	3	342	79	33	2	0	488	12,33	39,58	2
Anfiboliti	0	1	0	6	2	0	18	0	0	27	0,33	82,03	2
Anfiboliti ad orneblenda - Diabasi con ialoclastiti associate	1	0	0	0	37	18	6	13	0	75	3,55	21,11	2
Arenarie quarzose e scisti arenacei con livelli conglomeratici	0	8	0	0	24	28	11	1	0	72	1,94	37,19	2
Argilloscisti soltosi con intercalazioni di calcari silicei	0	7	0	0	36	10	20	4	0	77	1,69	45,60	2
Brecce ad elementi di flysch	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0,05	40,62	2
Brecce ad elementi ofiolitici	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,02	45,55	2
Brecce tettoniche	0	3	0	0	0	0	2	0	0	5	0,14	36,85	2
Calcare massiccio	0	2	0	0	16	6	3	2	0	29	0,70	41,62	2
Calcari a liste di selce	0	2	0	0	2	4	0	0	0	8	0,19	42,14	2
Calcari con lenti e noduli di selce	0	1	1	0	6	0	2	0	0	10	0,24	41,47	2
Calcari rosei talvolta nodulari	0	17	0	0	36	41	3	3	0	100	3,11	32,17	2
Calcescisti e cipollini	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0,08	12,11	2
Cornubianiti calcarenitiche e marmi prevalentemente diopside	0	0	0	0	2	4	5	0	0	11	0,33	32,98	2
Cornubianiti, scisti cornubianitici e scisti biotitici	0	0	0	0	25	56	39	2	0	122	2,16	56,46	2
Depositi eolici	0	0	0	8	1	0	4	0	0	13	0,08	153,89	2
detrito	0	10	0	5	91	93	15	1	1	216	5,51	39,21	2
Diabasi prevalentemente in pillow e massicci con ialoclastite associate	0	7	0	5	188	159	57	6	32	454	11,69	38,82	2
discariche	0	9	0	0	11	6	5	0	0	31	0,88	35,33	2
Filladi calcarifere con lenti e banchi di calcescisti	0	1	0	0	34	14	14	1	0	64	2,13	29,99	2
Flysch cretaceo (Calcari marnosi e marne grigio scure alternati con argilloscisti sitosi)	2	42	1	1	420	358	131	43	15	1013	19,74	51,33	3
Flysch paleocenico (Argille e marne intercalate a calcari e brecce ofiolitiche)	0	1	0	0	19	4	10	3	0	37	1,10	33,65	2
Formazione a Posidonia alpina - argille poco marnose	0	8	0	0	41	9	8	6	0	72	2,04	35,34	2
Formazione evaporitica	1	46	0	0	26	25	7	8	0	113	4,38	25,82	2
Frane	0	0	0	0	19	9	0	0	0	28	0,52	54,16	2
Gabbri	0	0	0	0	8	10	18	1	0	37	0,92	40,25	2
Gneiss di Calamita	1	40	0	1	233	48	89	7	21	440	18,57	23,69	2
Granodiorite	69	7	0	0	552	546	79	245	12	1510	58,06	26,01	3
Gruppo del verrucano - Anageriti, quarziti, scisti quarzitici	1	2	0	4	8	2	16	0	0	33	0,90	36,71	2
Marmi più o meno ricchi in quarzo - Calcari compatti con livelli di argille e marne	0	31	0	1	147	198	54	26	4	461	9,86	46,77	2
Marmo bianco giallastro massiccio	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0,08	24,90	2
Porfidi granodioritici e granitici	15	46	0	1	516	510	131	77	27	1323	24,51	53,98	3
Porfiroidi e scisti porfirici passanti a quarziti	0	0	0	0	12	8	17	0	0	37	1,32	27,94	2
Quarzomonzonite	0	0	0	0	3	1	3	0	0	7	0,17	40,02	2
Radiolariti calcarifere	3	4	0	0	129	137	23	51	0	347	7,42	46,76	2
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	30	0	42	80	9	8	0	0	169	2,55	66,39	2
Serpentine lherzolitiche e harzburgitiche passanti a olivinit e Olivinit	2	7	0	0	119	125	69	10	3	335	8,39	39,92	2
Silicati ferro-calciferi in ammassi irregolari	0	23	0	0	11	24	19	5	0	82	1,23	66,89	2
Totale complessivo	95	417	2	97	3399	2568	996	521	115	8210			
												media	2,08

TAB. 1 Densità specifica dell'Isola d'Elba

LITOLOGIE	Alterazione meteorica	Antropico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marino	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	Area km ²	Ds	Ds
Alluvioni	0	0	1	13	0	4	0	0	18	0,8875	20,28	2
Alluvioni antiche	0	0	0	14	3	0	0	0	17	0,983	17,29	2
Anfiboliti ad orneblenda - Diabasi con ialoclastiti associate	1	0	0	34	15	6	10	0	66	3,4409	19,18	2
Brecce ad elementi di flysch	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0,047	42,55	2
Brecce ad elementi ofiolitici	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,0217	46,08	2
Cornubianiti calcarenitiche e marmi prevalentemente diopside	0	0	0	0	3	1	0	0	4	0,1017	39,33	2
Cornubianiti, scisti cornubianitici e scisti biotitici	0	0	0	15	46	30	1	0	92	1,6309	56,41	2
detrito	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0,0291	68,73	2
Flysch cretaceo (Calcarei marnosi e marne grigio scure alternati con argilloscisti sitosi)	0	2	0	5	3	2	4	0	16	0,4123	38,81	2
Gabbri	0	0	0	2	7	4	0	0	13	0,4002	32,48	2
Granodiorite	63	7	0	485	489	76	236	10	1366	55,4341	24,64	3
Marmi più o meno ricchi in quarzo - Calcarei compatti con livelli di argille e marne	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0,1159	17,26	2
Porfidi granodioritici e granitici	4	1	0	33	41	23	11	0	113	3,4107	33,13	2
Radiolariti calcarifere	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0,1166	34,31	2
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,0012	833,33	2
Serpentine lherzolitiche e harzburgitiche passanti a olivinita e Olivinita	2	3	0	41	103	51	7	3	210	3,7299	56,30	2
Totale complessivo	70	13	2	642	718	200	269	13	1927		media ->	2

TAB. 2: densità specifica dell'unità di paesaggio Monte Capanne

LITOLOGIE	Alterazione meteorica	Antropico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marino	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	Area km ²	Ds	Ds
Alluvioni	0	0	0	9	0	6	0	0	15	0,1314	114,16	2
Alluvioni antiche	0	6	0	0	1	1	0	0	8	0,047	170,21	2
Anfiboliti	0	1	0	1	0	7	0	0	9	0,0711	126,58	2
Brecce tettoniche	0	2	0	0	0	1	0	0	3	0,0396	75,76	2
detrito	0	1	0	0	2	1	0	0	4	0,0266	150,38	2
Formazione evaporitica	0	39	0	0	4	3	0	0	46	0,7821	58,82	2
Gneiss di Calamita	1	37	1	184	33	45	4	14	319	13,9068	22,94	3
Gruppo del verrucano - Anageriti, quarziti, scisti quarzitici	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0,1447	13,82	2
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	1	5	14	1	0	0	0	21	0,2218	94,68	2
Silicati ferro-calciferi in ammassi irregolari	0	12	0	0	0	1	0	0	13	0,1904	68,28	2
Totale complessivo	1	99	6	208	41	67	4	14	440		media -- >	2,1

TAB. 3: densità specifica dell'unità di paesaggio Monte Calamita

LITOLOGIE	Alterazione meteorica	Antropico	Carsico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marino	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	Area km ²	Ds	Ds
Alluvioni	0	29	0	19	125	18	58	1	0	250	11,7976	21,19	2
Alluvioni antiche	0	20	0	3	302	71	30	1	0	427	10,2785	41,54	3
Anfiboliti	0	0	0	6	1	0	9	0	0	16	0,2202	72,66	2
Anfiboliti ad orneblenda - Diabasi con ialoclastiti associate	0	0	0	0	3	3	0	2	0	8	0,1016	78,74	2
Arenarie quarzose e scisti arenacei con livelli conglomeratici	0	0	0	0	7	8	7	0	0	22	0,6032	36,47	2
Argilloscisti soltosi con intercalazioni di calcari silicei	0	1	0	0	8	3	17	0	0	29	0,2994	96,86	2
Brecce tettoniche	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0,0873	22,91	2
Cornubianiti calcarenitiche e marmi prevalentemente diopside	0	0	0	0	2	1	3	0	0	6	0,1269	47,28	2
Cornubianiti, scisti cornubianitici e scisti biotitici	0	0	0	0	10	10	9	1	0	30	0,4886	61,40	2
Depositi eolici	0	0	0	8	1	0	4	0	0	13	0,0833	156,06	2
detrito	0	1	0	4	26	21	5	0	0	57	1,5479	36,82	2
Diabasi prevalentemente in pillow e massicci con ialoclastite associate	0	4	0	5	129	129	57	0	32	356	6,8957	51,63	2
discariche	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0,0392	51,02	2
Filladi calcarifere con lenti e banchi di calcescisti	0	0	0	0	13	1	10	0	0	24	0,3728	64,38	2
Flysch cretaceo (Calcari marnosi e marne grigio scure alternati con argilloscisti sitosi)	2	40	1	1	391	338	128	39	15	955	18,2424	52,35	3
Flysch paleocenerico (Argille e marne intercalate a calcari e brecce ofiolitiche)	0	1	0	0	16	2	10	3	0	32	0,9573	33,43	2
Formazione a Posidonia alpina -argille poco mamose	0	1	0	0	4	0	2	2	0	9	0,257	35,02	2
Formazione evaporitica	1	1	0	0	7	2	4	1	0	16	0,682	23,46	2
Gabbri	0	0	0	0	3	2	12	0	0	17	0,1955	86,96	2
Gneiss di Calamita	0	3	0	0	48	15	44	3	7	120	4,4033	27,25	2
Granodiorite	6	0	0	0	67	57	3	9	2	144	2,5355	56,79	2
Gruppo del verrucano - Anageriti, quarziti, scisti quarziticci	1	2	0	4	5	2	14	0	0	28	0,6775	41,33	2
Marmi più o meno ricchi in quarzo - Calcari compatti con livelli di argille e marne	0	12	0	0	5	6	12	6	0	41	0,8355	49,07	2
Porfidi granodioritici e granitici	11	43	0	1	468	456	108	66	24	1177	20,1313	58,47	3
Porfiroidi e scisti porfirici passanti a quarziti	0	0	0	0	6	2	9	0	0	17	0,323	52,63	2
Quarzomonzonite	0	0	0	0	3	1	3	0	0	7	0,1747	40,07	2
Radiolariti calcarifere	0	2	0	0	5	8	13	0	0	28	0,4678	59,85	2
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	28	0	28	59	6	7	0	0	128	2,0343	62,92	2
Serpentine lherzolitiche e harzburgitiche passanti a olivinita e Olivinita	0	0	0	0	39	9	18	0	0	66	1,6695	39,53	2
Silicati ferro-calciferi in ammassi irregolari	0	11	0	0	7	16	17	5	0	56	0,5646	99,19	2
Totale complessivo	21	200	1	79	1760	1187	616	139	80	4083		MEDIA ->	2,1

TAB. 4: densità specifica dell'unità di paesaggio Colline e piane dell'Elba centrale e orientale

LITOLOGIE	Alterazione meteorica	Antropico	Carsico	Eolico	Fluvio-denudazionale	Gravitativo	Marino	Morfotettonico-strutturale	Poligenico	Totale complessivo	Area km ²	Ds	Ds
Alluvioni	0	3	0	0	55	7	7	3	0	75	1,641	45,70	2
Alluvioni antiche	0	3	0	0	26	4	2	1	0	36	1,012	35,59	2
Anfiboliti	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0,017	117,65	2
Anfiboliti ad orneblenda - Diabasi con ialoclastiti associate	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0,005	208,33	2
Arenarie quarzose e scisti arenacei con livelli conglomeratici	0	8	0	0	17	20	4	1	0	50	1,315	38,02	2
Argilloscisti soltosi con intercalazioni di calcari silicei	0	6	0	0	28	7	3	4	0	48	1,380	34,77	2
Calcare massiccio	0	2	0	0	16	6	3	2	0	29	0,697	41,62	2
Calcare a liste di selce	0	2	0	0	2	4	0	0	0	8	0,183	43,62	2
Calcare con lenti e noduli di selce	0	1	1	0	6	0	2	0	0	10	0,234	42,79	2
Calcarei rosei talvolta nodulari	0	17	0	0	36	41	3	3	0	100	3,102	32,24	2
Calcescisti e cipollini	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0,082	12,15	2
Cornubianiti calcarenitiche e marmi prevalentemente diopside	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,011	95,24	2
detrito	0	8	0	1	65	69	8	1	1	153	3,875	39,49	3
Diabasi prevalentemente in pillow e massicci con ialoclastite associate	0	3	0	0	59	30	0	6	0	98	4,713	20,79	2
discariche	0	9	0	0	11	6	3	0	0	29	0,808	35,90	2
Filladi calcarifere con lenti e banchi di calcescisti	0	1	0	0	21	13	4	1	0	40	1,737	23,03	2
Flysch cretaceo (Calcarei marnosi e marne grigio scure alternati con argilloscisti sitosi)	0	0	0	0	24	17	1	0	0	42	0,980	42,87	2
Flysch paleocenico (Argille e marne intercalate a calcari e breccie ofiolitiche)	0	0	0	0	3	2	0	0	0	5	0,142	35,29	2
Formazione a Posidonia alpina -argille poco marnose	0	7	0	0	37	9	6	4	0	63	1,766	35,68	2
Formazione evaporitica	0	6	0	0	19	19	0	7	0	51	2,877	17,73	2
Frane	0	0	0	0	19	9	0	0	0	28	0,509	55,06	2
Gabbri	0	0	0	0	3	1	2	1	0	7	0,288	24,31	2
Gneiss di Calamita	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,014	70,42	2
Gruppo del verrucano - Anageriti, quarziti, scisti quarzitici	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0,064	47,10	2
Marmi più o meno ricchi in quarzo - Calcarei compatti con livelli di argille e marne	0	19	0	1	142	190	42	20	4	418	8,824	47,37	3
Marmo bianco giallastro massiccio	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0,080	24,97	2
Porfidi granodioritici e granitici	0	2	0	0	15	13	0	0	3	33	0,788	41,86	2
Porfiroidi e scisti porfirici passanti a quarziti	0	0	0	0	6	6	8	0	0	20	0,953	21,00	2
Radiolariti calcarifere	3	2	0	0	124	125	10	51	0	315	6,819	46,20	3
Sabbie più o meno cementate eoliche	0	1	0	8	7	2	1	0	0	19	0,257	74,07	2
Serpentine lherzolitiche e harzburgitiche passanti a olivinit e Olivinit	0	4	0	0	39	13	0	3	0	59	2,931	20,13	2
Silicati ferro-calciferi in ammassi irregolari	0	0	0	0	4	8	1	0	0	13	0,401	32,39	2
Totale complessivo	3	105	1	10	789	622	113	109	8	1760		media	2,09

TAB. 5: densità specifica dell'unità di paesaggio Colline dell'Elba Nord-orientale