



Università
Ca' Foscari
Venezia

Corso di Laurea Magistrale
(*ordinamento ex D.M. 270/2004*)
in Scienze Ambientali

Tesi di Laurea

—
Ca' Foscari
Dorsoduro 3246
30123 Venezia

Metodi e strumenti per la
costruzione di territori virtuali
per l'applicazione di modelli e
di scenari ambientali

Relatore
Ch.mo Prof. Carlo Giupponi

Correlatori
Dott. Animesh Gain
Dott. Vahid Mojtahed

Laureando
Michele Zen
Matricola 822947

Anno Accademico
2013 / 2014

*"Virtual reality is the first step in a grand adventure
into the landscape of the imagination."*

FRANK BIOCCHA, TAEYONG KIM, & MARK R. LEVY
Communication in the Age of Virtual Reality

Sommario

Acronimi	viii
Abstract	ix
1 Introduzione	1
1.1 Cambiamenti climatici	1
1.2 Cambiamento degli usi del suolo	2
1.3 Valutazione delle terre.....	4
1.4 Modellazione dei sistemi di usi del suolo	5
1.5 Obiettivi.....	7
2 Materiali e Metodi.....	8
2.1 I frattali	10
2.1.1 Proprietà dei frattali	10
2.1.2 Frattali come oggetti reali	11
2.1.3 I modelli frattali	12
2.2 Panoramica sui software.....	14
2.2.1 Software di graphic design.....	14
2.2.2 Desktop GIS	15
2.2.3 Strumenti di visualizzazione 3D	16
2.2.4 Ambienti di programmazione	17
2.3 Metodi per la generazione di una superficie a frattali	19
2.3.1 GRASS: r.surf.fractal	19
2.3.2 Funzioni di Matlab	20
2.3.3 Blender: ANT Landscape.....	22

2.4	Strumenti di conversione dati.....	23
2.5	Stima della dimensione frattale di un DEM esistente	24
2.6	Scelta del territorio da riprodurre e analisi della variabilità frattale.....	25
2.6.1	Analisi della variabilità frattale del territorio del Veneto	25
2.6.2	Scelta del territorio da riprodurre su base frattale.....	28
2.6.3	Classificazione morfologica della dimensione frattale in rapporto alla pendenza.....	31
2.7	Decomposizione di una superficie topografica nel dominio delle frequenze	34
2.8	Territori virtuali per la costruzione di scenari previsionali	36
2.8.1	RUSLE.....	36
2.8.1.1	Fattore R	38
2.8.1.2	Fattore K	39
2.8.1.3	Fattore LS	40
2.8.1.4	Fattore C	41
2.8.1.5	Fattore P	42
3	Procedure per la generazione di superfici frattali per la riproduzione delle caratteristiche morfologiche di un territorio.....	43
3.1	Generazione di paesaggi monofrattali con r.surf.fractal	43
3.2	Generazione di paesaggi multifrattali con Blender	46
4	Applicazione del modello RUSLE sul territorio virtuale.....	55
4.1	Costruzione dei <i>layer</i> raster corrispondenti ai fattori R, LS, C e K	55
4.1.1	Layer fattore R	55
4.1.2	Layer fattore LS	58
4.1.3	Layer fattore C	59
4.1.3.1	Analisi della distribuzione della copertura del suolo nel paesaggio esistente	60
4.1.3.2	Costruzione della mappa virtuale del fattore C	68
4.1.4	Layer fattore K	73

4.2	Applicazione del modello RUSLE	77
4.3	Calcolo della perdita di suolo annuo in termini volumetrici	78
4.4	Costruzione delle simulazioni	82
4.5	Costruzione di scenari	85
5	Risultati delle simulazioni.....	87
6	Discussione	102
6.1	Generazione di paesaggi a frattali	104
6.2	Generazione dei <i>layer</i> informativi del modello RUSLE	106
6.3	Simulazioni e scenari.....	108
7	Conclusione.....	112
	Bibliografia	114
	Sitografia.....	117
	Ringraziamenti	119
	Allegati.....	I
	Allegato 1	II
	Allegato 2	III
	Allegato 3	V
	Allegato 4	VII
	Allegato 5	XIX

Indice delle figure

Figura 2.1 Diagramma di flusso che illustra le procedure seguite per la costruzione di un territorio virtuale e la sua potenziale applicazione nell'ambito della modellazione degli usi del suolo e dei cambiamenti climatici.....	9
Figura 2.2 Costruzione della curva di von Kock (Falconer 2014).....	12
Figura 2.3 Rilievo costruito con una variante del Perlin's Noise chiamata ridge basis function (Ebert et al. 2003).....	13
Figura 2.4 fBm con diverse densità spettrali e i relativi H (Ebert et al. 2003)	19
Figura 2.5 Pannello di controllo di ANT Landscape: configurazione di default.....	22
Figura 2.6 Istogramma della mappa della dimensione frattale del Veneto.....	26
Figura 2.7 Istogramma della mappa della dimensione frattale delle aree montane del Veneto.	27
Figura 2.8 Localizzazione dell'area selezionata rispetto ai confini amministrativi del Veneto.....	28
Figura 2.9 Vista in 3D con Google Earth dell'area selezionata.	29
Figura 2.10 Ripartizione in layer vettoriali che identificano sei diverse fasce di pendenza: 0-3°, 3-7°, 7-11°, 11-15°, 15-25° e >25°	31
Figura 2.11 Istogramma della variabilità frattale nell'intera area di studio.	33
Figura 2.12 Istogrammi delle componenti reale (sinistra) e immaginaria (destra) delle immagini raster generate col modulo "i.fft" di GRASS. "Frequenza" indica il numero di pixel che nel raster assume lo stesso valore e non rappresenta la frequenza spaziale di queste componenti.	35
Figura 2.13 Immagine dello spettro di potenza del DEM utilizzato ("c0103014_DTM25")	35
Figura 3.1 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, dei DEM costruiti con "r.surf.fractal", poligonizzati e interpolati con "v.surf.rst", utilizzando i parametri di default.....	45
Figura 3.2 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, dei DEM costruiti con "r.surf.fractal", poligonizzati e interpolati con "v.surf.rst": superficie ottenuta riducendo la densità dei punti utilizzati nell'interpolazione.	45
Figura 3.3 Regressione lineare dei valori medi di pendenza, calcolati sulle superfici frattali generate.	48
Figura 3.4 Istogramma del raster dello spettro di potenza del paesaggio esistente (i valori di frequenza sulle ordinate rappresentano il numero di volte che un pixel assume il relativo valore	

sulle ascisse e non vanno confusi con le frequenze nelle quali è stato decomposto il raster originale).	50
Figura 3.5 Regressione lineare dei valori dello spettro di potenza medio, calcolati sulle superfici frattali generate.	51
Figura 3.6 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, del DEM virtuale generato con "ANT Landscape" a partire dalle caratteristiche morfologiche di un DEM esistente.	54
Figura 4.1 Mappa del fattore R (Mj^*mm/ha^*h^*yr).	57
Figura 4.2 Mappa del fattore LS (adimensionale)	59
Figura 4.3 Mappa virtuale dei poligoni di Voronoi, ritagliata per categorie di pendenza. Ogni poligono è definito da un codice a sei cifre che identifica una specifica AEZ.	70
Figura 4.4 Mappa del fattore C (adimensionale)	73
Figura 4.5 Triangolo tessiturale FAO (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000)	74
Figura 4.6 Mappa del fattore C (t^*ha^*h/ha^*Mj^*mm)	77
Figura 4.7 Perdita di suolo annuo calcolata con il modello RUSLE (t/ha^*yr)	78
Figura 4.8 Perdita di suolo annua rapportata alla risoluzione spaziale del DEM virtuale.	79
Figura 4.9 Spessore di suolo eroso nell'area di un pixel (cm/anno)....	82
Figura 5.1 DEM virtuale con l'overlay della mappa della profondità iniziale dei suoli e delle ombreggiature dei rilievi.	87
Figura 5.2 Mappa della profondità iniziale dei suoli, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.	89
Figura 5.3 Mappa della profondità dei suoli dopo 5 anni.	91
Figura 5.4 Mappa della profondità dei suoli dopo 25 anni.	92
Figura 5.5 Mappa della profondità dei suoli dopo 50 anni.	93
Figura 5.6 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni.	94
Figura 5.7 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni (precipitazioni: +0,07 mm/giorno).	99
Figura 5.8 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni (precipitazioni: + 0,16 mm/giorno). ..	100
Figura 6.1 Diagramma di flusso che illustra le procedure seguite per la costruzione di un territorio virtuale, la sua potenziale applicazione nell'ambito della modellazione degli usi del suolo e dei cambiamenti climatici e i potenziali miglioramenti esplorabili.	103

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Statistiche calcolate col modulo "r.univar" di GRASS, per il Veneto e separatamente per le aree di pianura collina e montagna.....	27
Tabella 2.2 Classi di pendenza in relazione alla fruibilità agricola dei suoli (Orshoven et al. 2012)	32
Tabella 2.3 Statistiche calcolate col modulo di GRASS "r.univar" per comprendere la variabilità frattale in relazione alla pendenza.....	33
Tabella 3.1 Valori moltiplicativi per ottenere la stessa scala verticale del DEM esistente	47
Tabella 3.2 Medie delle pendenze delle sei superfici frattali generate e relativo parametro "Dimension".....	48
Tabella 3.3 Spettro di potenza medio delle sei superfici frattali generate e relativo parametro "Dimension".....	50
Tabella 3.4 Tabella di confronto delle statistiche di quota e pendenza per i DEM virtuale ed esistente.....	53
Tabella 4.1 Precipitazioni annuali medie per sei stazioni di monitoraggio ambientale, localizzate nell'area da replicare.	55
Tabella 4.2 Medie delle precipitazioni annuali registrate dalle stazioni di monitoraggio ambientale (esclusa quella del comune di Crespadoro).....	56
Tabella 4.3 Criteri e classificazione delle limitazioni usate nelle AEZ per l'agricoltura dipendente dall'acqua piovana (Eliasson 2007).....	60
Tabella 4.4 Tabelle che riportano i valori degli attributi (pendenza, profondità, fertilità, tessitura, drenaggio e chimica del suolo) da attribuire alle unità cartografiche della mappa dei suoli, sulla base delle loro caratteristiche fisiche e chimiche.....	62
4.5 Distribuzione delle categorie del Corine Land Cover a due livelli rispetto alle AEZ, come quantità assoluta di pixel.....	66
Tabella 4.6 Ripartizione delle categorie di copertura del suolo in termini percentuali, rispetto alle AEZ definite in precedenza.....	67
Tabella 4.7 Tabelle di comparazione della distribuzione percentuale delle AEZ fra paesaggio virtuale ed esistente	69
Tabella 4.8 Valori del fattore C associati alle categorie di copertura del suolo a due livelli.....	71

Tabella 4.9 Composizione percentuale media delle classi tessiturali presenti nel territorio in esame.....	75
Tabella 4.10 Valori delle variabili per calcolare il fattore K per le classi tessiturali presenti nel paesaggio esistente.....	75
Tabella 5.1 Cross-tabulazione delle pendenze del DEM virtuale con i dati di output del modello RUSLE	88
Tabella 5.2 Ripartizione percentuale dei suoli in figura 5.2, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.	90
Tabella 5.3 Ripartizione percentuale dei suoli in figura 5.6, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.	95
Tabella 5.4 Perdita di suolo complessiva, espressa in tonnellate, risultante dall'azione dei processi erosivi per un arco temporale di 100 anni.	95
Tabella 5.5 Cross-tabulazione della mappa delle categorie di profondità iniziale dei suoli dei suoli (Figura 5.2), rispetto ad una riclassificazione a sei livelli delle limitazioni complessive degli usi del suolo per i criteri definiti dalle AEZ (* ev. con ridotta limitazione di pendenza).	97
Tabella 5.6 Cross-tabulazione della mappa della profondità dei suoli sottoposti a 100 anni di processi erosivi (Figura 5.6), rispetto ad una riclassificazione a sei livelli delle limitazioni complessive degli usi del suolo per i criteri definiti dalle AEZ (* ev. con ridotta limitazione di pendenza).	98
Tabella 5.7 Confronto delle ripartizione percentuale delle categorie di profondità con i dati di precipitazione reali e in accordo gli incrementi dei regimi pluviometrici previsti dalle RCP 2.6 e 8.5 del quinto report IPCC.	101
Tabella 5.8 Perdita di suolo complessiva, espressa in tonnellate, risultante da differenti scenari d'erosione.	101

Acronimi

ABM: *Agent-Based Modeling*

AEZ methodology: *Agro-ecological Zoning methodology*

ARPAV: Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto

AVHRR: *Advanced Very High Resolution Radiometer*

AWC: *Water Available Capacity*

CAD: *Computer-Aided Design*

DEM: *Digital Elevation Model*

ESRI: *Environmental System Research Institute*

FAO: *Food and Agriculture Organization*

fBm: *fractional Brownian motion*

FFT: *Fast Fourier Transform*

GHGs: *Greenhouse Gases*

GIS: *Geographic Information System*

GNU GPL: *GNU General Public License*

IDE: *Integrated Development Environment*

IIASA: *International Institute for Applied System Analysis*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*

OECD: *Organization for Economic Co-operation and Development*

PTRC: Piano Territoriale Regionale di Coordinamento

RCP: *Representative Concentration Pathways*

RMSE: *Root Mean Square Error*

RUSLE: *Revised Universal Soil Loss Equation*

SDK: *Software Development Kit*

SLE: *Seamless Landscape Explorer*

UCA: *Upslope Contributing Area*

USLE: *Universal Soil Loss Equation*

Abstract

La presente tesi vuole dimostrare la possibilità di costruire territori virtuali con idonei strumenti software, in modo tale che questi presentino caratteristiche morfologiche, ecologiche e di copertura del suolo statisticamente simili a territori esistenti. Un territorio virtuale è il risultato della costruzione di un'infrastruttura di *layer* informativi che costituiscono la base dati sulla quale sperimentare e testare fenomeni alla base dei cambiamenti climatici e degli usi del suolo, per costruire simulazioni e scenari. I vantaggi sono: la possibilità di modificare la componente informativa per costruire scenari; la flessibilità di questi strumenti rispetto alle potenziali applicazioni e variabili; l'indipendenza dai modelli preesistenti nell'ambito del cambiamento degli usi del suolo.

Keywords

Frattali, RUSLE, AEZ, GIS

1 Introduzione

I cambiamenti climatici, della copertura e degli usi del suolo, a diverse scale spaziali e temporali, possono determinare impatti sui socio-ecosistemi e sulla biochimica globale, compromettendo la capacità dei sistemi biologici di fornire risorse per la popolazione umana (Cian 2014; Claessens et al. 2009). In risposta a queste problematiche, la valutazione delle terre integra informazioni provenienti da diversi ambiti per favorire uno sfruttamento sostenibile delle risorse, mediando fra necessità delle società umane e conservazione dell'ambiente sul lungo termine (Eliasson 2007). In tempi recenti, il miglioramento delle tecnologie ha permesso di sviluppare strumenti software per monitorare lo stato delle risorse attuali e l'evoluzione dei sistemi di usi del suolo (Verburg and Steeg 2009). In particolare, l'approccio modellistico è divenuto uno strumento per esplorare differenti possibili scenari ed alternative e migliorare il processo decisionale in materia di gestione della copertura e degli usi del suolo e dei cambiamenti climatici (Verburg, Veldkamp, and Rounsevell 2006).

1.1 Cambiamenti climatici

Con il termine “cambiamenti climatici” si intende un cambiamento statistico nella media o nella variabilità di determinate proprietà (temperatura, umidità, precipitazioni, flussi dei venti) che identificano il clima di una data area. Tale cambiamento deve persistere per un lungo periodo di tempo, per lo meno dell'ordine delle decine di anni (Cubasch et al. 2013).

Il sistema climatico globale è governato principalmente dal bilancio energetico che si instaura fra la quantità di energia radiante assorbita e la frazione riflessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre o riemessa dalle stesse a lunghezze d'onda maggiori. La frazione di energia riemessa come radiazione infrarossa è responsabile dell'effetto serra, meccanismo che regola la temperatura superficiale terrestre e che è strettamente dipendente dalla concentrazione dei gas atmosferici particolarmente efficienti nell'assorbire radiazioni a onde lunghe. Questi gas, fra cui: vapore acqueo, anidride carbonica, metano, ossidi di azoto e altri gas "serra" (GHGs), riemettono l'energia assorbita in ogni direzione, con un contributo energetico positivo per l'atmosfera terrestre. La circolazione

generale delle correnti atmosferiche e delle masse oceaniche ripartisce l'energia sotto forma di calore ad ogni latitudine, mitigando le temperature estreme all'equatore e ai poli. L'alterazione del bilancio energetico terrestre può anche essere dovuta alla variazione dell'albedo, ossia la quantità di radiazione solare incidente riflessa dalla superficie terrestre, proprietà che dipende dalla superficie riflettente (Cubasch et al. 2013).

Pur considerando l'incertezza associata ai risultati dei numerosi studi statistici, sui set di dati climatici disponibili in un lungo arco temporale, linee multiple di evidenza supportano la tesi che dalla metà del ventesimo secolo stia avvenendo un progressivo e relativamente rapido riscaldamento globale. Prove tangibili di tale fenomeno si riscontrano con: l'aumento della concentrazione dei gas "serra" rispetto all'era pre-industriale (+40% di CO₂; +150% di CH₄; +20% di N₂O), il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani, lo scioglimento delle calotte polari e dei ghiacciai montani, l'incremento del livello globale medio del mare (+0.19 [± 0.2] m nel periodo 1901-2010) e la variazione dei cicli biogeochimici (Alexander et al. 2013).

L'attuale comprensione dei cambiamenti del sistema climatico è il risultato dalla combinazione di osservazioni, studi dei processi di *feedback* e simulazioni modellistiche. L'efficacia di tali simulazioni dipende dalla conoscenza di tutte le componenti dei sistemi e dalle forzanti naturali e antropogeniche impiegate. Sulle base delle conoscenze e delle tecnologie attuali, il quinto *report* di valutazione dei cambiamenti climatici, prodotto dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), definisce l'influenza umana come causa dominante più probabile del riscaldamento globale (Alexander et al. 2013).

1.2 Cambiamento degli usi del suolo

Il cambiamento della copertura e degli usi del suolo sono stati riconosciuti fra i principali responsabili del *global change*, determinando impatti sugli ecosistemi, sulla biochimica globale, sul clima e sulla vulnerabilità umana (Verburg and Steeg 2009). Al tempo stesso, una delle maggiori forzanti del cambiamento degli usi del suolo è proprio l'attività umana. L'uomo è pertanto dipendente, per la propria sopravvivenza, dai servizi ecosistemici ma è anche responsabile delle modificazioni condotte al fine di adattare l'ambiente alle proprie necessità, spesso senza considerare i rischi associati a tali cambiamenti. Modificazioni chimiche, fisiche e biologiche dei suoli possono compromettere sul lungo termine la capacità dei sistemi biologici di fornire risorse per la popolazione umana (Cian 2014).

Il cambiamento degli usi del suolo è influenzato da una serie di dinamiche, fra loro interagenti, che coinvolgono sia l'ambiente biofisico che i processi decisionali: può alterare le proprietà biofisiche dei paesaggi e gli equilibri socio-economici delle società umane, con conseguenze potenzialmente positive o, nella maggioranza dei casi, negative (Claessens et al. 2009).

Le interazioni fra *drivers* ed impatti del cambiamento degli usi del suolo sono chiamati meccanismi di *feedback* ed operano a diverse scale spaziali e temporali. Sulla base dei meccanismi di *feedback* dei cambiamenti degli usi del suolo è dunque possibile indirizzare il processo decisionale per prevenire conseguenze negative per l'uomo e per l'ambiente (Claessens et al. 2009).

Un meccanismo di *feedback* a scala globale è l'interazione fra usi del suolo e sistema climatico: dinamiche di cambiamento degli usi del suolo a scala locale possono influenzare il clima a livello globale e viceversa (Claessens et al. 2009). L'interdipendenza fra *global change* e cambiamento degli usi del suolo dipende da alcuni motivi principali: i suoli adibiti all'uso agricolo contribuiscono per un 10-12% alla produzione di gas “serra” (esclusa la CO₂), rispetto al totale delle emissioni antropogeniche, mentre la loro progressiva estensione a scapito delle aree boschive determina indirettamente un incremento della CO₂ atmosferica; il cambiamento degli usi del suolo può determinare un'alterazione delle proprietà della superficie terrestre condizionando i flussi delle masse d'aria ed altri fattori che influenzano il clima (ad esempio: albedo, rugosità ed evapotraspirazione); il cambiamento climatico può determinare una variazione dell'attitudine di un suolo rispetto a determinati usi (Cian 2014), della composizione in specie delle associazioni vegetali, della produttività dei suoli e della vulnerabilità all'erosione (Claessens et al. 2009). In molti casi le interazioni fra *global change* e cambiamento degli usi del suolo raggiungono una complessità tale da non permettere più la distinzione tra cause ed impatti (Cian 2014).

Secondo il quinto *report* dell'IPCC di valutazione dei cambiamenti climatici, lo scenario che si profila allo stato attuale rappresenta una realtà in cui i cambiamenti climatici hanno avuto un effetto negativo sulle coltivazioni e sulla produzione di cibo in molte aree del mondo, con conseguenze socio-economiche rilevanti (Porter et al. 2014).

Lo studio dei cambiamenti degli usi del suolo è dunque essenziale per garantire la fruibilità delle risorse naturali sul lungo termine. La gestione degli usi del suolo deve quindi integrare il concetto di adattamento ai cambiamenti climatici per prevenire gli effetti negativi ambientali e socio-economici sul territorio (Cian 2014).

1.3 Valutazione delle terre

Una delle principali sfide nell'ambito del monitoraggio e della modellazione del cambiamento delle terre è la comprensione delle relazioni tra copertura del suolo, usi del suolo e la fornitura di beni e servizi (Verburg and Steeg 2009). In questo contesto, la valutazione delle terre (*land evaluation*) ha un ruolo preponderante nella gestione sostenibile delle risorse naturali. Nel 1976 la *Food and Agriculture Organization* (FAO) ha definito la valutazione delle terre come:

“the process of assessment of land performance when used for a specified purpose, involving the execution and interpretation of surveys and studies of land forms, soils, vegetation, climate and other aspects of land in order to identify and make a comparison of promising kinds of land use in terms applicable to the objectives of the evaluation” (Eliasson 2007).

La valutazione delle terre integra informazioni relative a diversi ambiti e a diverse scale spaziali, fra cui: tipologia dei suoli, dati climatici, flora, morfologia del territorio, *drivers* di carattere economico e sociale, per mediare gli usi del suolo fra necessità delle società umane e conservazione dell'ambiente sul lungo termine. Dalla pianificazione del territorio per valutare specifici usi delle terre, al miglioramento della gestione di queste e alla prevenzione delle dinamiche di degradazione dei suoli, la valutazione delle terre è divenuta nel corso degli anni uno strumento indispensabile per garantire uno sfruttamento sostenibile del territorio e per preservarne le funzionalità (Eliasson 2007; Giordano 1999).

La valutazione delle terre affronta tematiche e questioni per le quali non esiste una soluzione univoca. La dinamicità delle società umane e delle condizioni di mercato insieme alla variabilità delle condizioni ambientali, a diverse scale, pone dei limiti alla nostra capacità di prevedere specifiche destinazioni d'uso per un dato territorio. La dimensione temporale introduce un margine di errore in qualunque valutazione. Inoltre, è necessario considerare che i concetti di uso ed idoneità non sono quantificabili in senso assoluto e che la nostra conoscenza spaziale del territorio non è perfetta (Giordano 1999).

Una valutazione delle terre razionale dovrebbe prevedere una prima fase di analisi della componente biofisica del territorio, per determinare l'attitudine del suolo in relazione ad utilizzazioni generiche, ad esempio agricole, forestali o naturalistiche (*land capability*) o ad usi specifici (*land suitability*), seguita da una seconda fase di definizione di possibili usi alternativi in considerazione di diversi scenari socio-economici (Giordano 1999).

Fin dagli anni sessanta sono state sviluppate diverse metodologie di valutazione delle terre. La più diffusa di queste è la *Agro-ecological Zoning* (AEZ) methodology, sviluppata dalla FAO in collaborazione con l'*International Institute for Applied System Analysis* (IIASA). Il progetto originale risale al 1978 ma solo negli ultimi vent'anni questa metodologia di valutazione si è diffusa in tutto il mondo, grazie alle potenzialità offerte dalle recenti tecnologie informatiche e in particolare dalla disponibilità di *database* spaziali delle risorse disponibili a scala globale (Eliasson 2007). Il metodo AEZ consiste nel suddividere il territorio in unità spaziali di ridotte dimensione e omogenee, al loro interno, per attitudine del suolo rispetto ad usi specifici, impatto ambientale e produzione potenziale (Eliasson 2007).

1.4 Modellazione dei sistemi di usi del suolo

Lo studio del cambiamento degli usi del suolo rappresenta un nuovo ambito di ricerca che si avvale di conoscenze multi-disciplinari e richiede lo sviluppo di nuovi strumenti e tecnologie per migliorare la capacità di monitorare nel tempo i cambiamenti della copertura e degli usi del suolo. Il miglioramento delle tecnologie di *remote sensing* e delle tecnologie informatiche, in grado di classificare e archiviare una grande quantità di *datasets* di informazioni geospaziali, ha permesso agli scienziati di studiare, in modo più efficace, lo stato attuale delle risorse disponibili, i processi che governano il cambiamento della copertura del suolo e di identificare gli *hot-spot* di tale cambiamento (Verburg and Steeg 2009).

L'utilizzo di modelli matematici è ormai un metodo consolidato negli studi del cambiamento degli usi del suolo perché ha permesso di migliorare la comprensione dei *drivers* che lo determinano, di esplorare differenti possibili scenari ed alternative e migliorare il processo decisionale (Verburg and Steeg 2009). Analogamente lo sviluppo di scenari è divenuto uno strumento molto diffuso per analizzare i sistemi di usi del suolo e le loro potenziali evoluzioni. Gli scenari non sono strumenti per fare previsioni ma piuttosto per orientare il processo decisionale rispetto alle possibili alternative, in un contesto dove le incertezze sono gestite sulla base di specifiche assunzioni. Gli scenari permettono quindi il confronto delle conseguenze potenziali che deriverebbero dalle scelte in materia di gestione della copertura e degli usi del suolo, ma anche nell'ambito dei cambiamenti climatici (Verburg, Veldkamp and Rounsevell 2006).

Nel tempo sono stati sviluppati numerosi modelli per analizzare la potenziale evoluzione dei sistemi di usi del suolo. La maggior parte di questi impiega dati a bassa risoluzione ($> 1 \times 1 \text{ km}$) a causa

della difficoltà nel reperire dati ad alta risoluzione. Si tratta di modelli validi per costruire scenari di usi del suolo da scala globale a nazionale. Pochi sono invece i modelli che impiegano come base dati mappe raster ad alta risoluzione, con dimensione del pixel minore di 1x1 km; fra questi, il più famoso è il CLUE-S. A differenza del CLUE, valido a scala globale o continentale, il CLUE-S non si basa su indagini a campione e dati censuari ma su mappe raster elaborabili in ambienti GIS per analizzare l'evoluzione dei sistemi di usi del suolo, secondo un approccio multi scala: sono sistemi complessi dotati di un'organizzazione gerarchica, costituita da una serie di scale spaziali interconnesse (Verburg et al. 2002). Il modello CLUE-S calcola la probabilità di appartenenza di ogni pixel ad una determinata classe di uso del suolo, sulla base di una regressione logistica, le cui variabili indipendenti sono le forzanti del cambiamento. I fattori chiave che governano i cambiamenti dei sistemi di usi del suolo sono demografici, economici, tecnologici, politici, istituzionali, culturali e biofisici (Verburg et al. 2002). Verburg et al. (2002) afferma che, dove possibile, è necessario distinguere fra forzanti del cambiamento quantitativo e spaziale degli usi del suolo. I fattori biofisici ad esempio pongono esclusivamente delle limitazioni rispetto a determinati tipi di usi del suolo in dipendenza della loro localizzazione sul territorio. Tuttavia negli esempi applicativi proposti da Verburg et al. (2002) le regressioni sono effettuate solo su alcune forzanti in dipendenza del tipo di uso del suolo e tali *driver* comprendono caratteristiche biofisiche generiche quali quote, pendenze, orientazione rispetto ai punti cardinali, tipo di rocce, tendenza all'erosione e distanza da certe aree. Ad esempio, nel caso delle risaie, la loro presenza nei sistemi di usi del suolo è modellata soltanto sulla base delle quote, delle pendenze, della distanza dalle città e della densità demografica. Verburg et al. (2002) non considerano in alcun modo le caratteristiche dominanti dei suoli come ad esempio tessitura, fertilità e profondità, proprietà che invece incidono sull'attitudine dei suoli rispetto ad usi agricoli specifici (Eliasson 2007).

Un altro modello che impiega basi dati a risoluzione inferiore ad 1x1 km è il Patuxent Landscape Model (PLM). Questo modello si focalizza sulla ricostruzione della componente ecosistemica (modulo ecologico) in rapporto a fattori economici e demografici (modulo economico), per garantire una migliore gestione degli usi del suolo al fine mantenere un buono stato di qualità delle acque, a scala di bacino. Nel modulo ecologico il modello integra informazioni quali successioni ecologiche, quantità e qualità delle acque superficiali, profondità delle falde, stato di salute e di crescita della vegetazione, stato di salute degli habitat e loro frammentazione. Le dinamiche economiche e demografiche, di usi del suolo e le pratiche agricole sono invece elaborate nel modulo

economico (Voinov et al. 1999). La componente informativa geomorfologica e biofisica dei suoli non è invece integrata nel modello.

A scala globale sono invece disponibili recenti modelli che integrano anche queste componenti. Tuttavia l'utilizzo di una base dati a bassa risoluzione spaziale (da ~10x10 km a ~55x55 km) può determinare un'eccessiva approssimazione dei risultati. Si tratta infatti di modelli non orientati alla modellazione dei sistemi di usi del suolo a piccola scala, ma alle dinamiche dei processi ambientali a scala globale (Meiyappan et al. 2014).

1.5 Obiettivi

L'obiettivo di questa tesi è quello di dimostrare la possibilità di costruire dei territori virtuali, replicando statisticamente le caratteristiche morfologiche, ecologiche e di copertura del suolo di ambienti reali, da utilizzare come laboratori modellistici sui quali simulare fenomeni alla base dei cambiamenti climatici e degli usi del suolo. Nella pratica, per territorio virtuale si intende una sequenza di *layer* informativi, fra i quali un modello 3D (*DEM - Digital Elevation Model*), costruiti con idonei strumenti software, che rappresentano le caratteristiche fisiche di un certo spazio esistente o generato *ex novo*. Il DEM virtuale rappresenta la base geomorfologica sulla quale sovrapporre altre matrici generate per emulare le caratteristiche ambientali e di copertura del suolo delle aree da replicare. Il risultato è un territorio virtuale che presenta una infrastruttura di dati fra loro coerenti e sul quale è possibile applicare modelli preesistenti o testare nuovi modelli, anche nell'ambito dei cambiamenti climatici. L'utilizzo dei modelli in un ambiente controllato può essere pensato come un esperimento "in serra" comparato con la loro applicazione "in campo", ossia sulla base dati di territori esistenti. Il territorio virtuale creato dovrà essere rappresentabile in forma di *layer* sovrapposti nei software GIS (*Geographic Information System*) e visualizzabile in 3D con i software disponibili. La possibilità di creare quest'architettura di *layer* virtuali dovrebbe rappresentare una base per la costruzione di scenari, identificati da una diversa combinazione di variabili, impiegando una base dati ad alta risoluzione (valida a scale da regionale a locale) nonché informazioni biofisiche e geomorfologiche, spesso non incluse nella modellazione dei sistemi di usi del suolo.

2 Materiali e Metodi

La trattazione che segue illustrerà innanzitutto il concetto di frattale come base teorica per la costruzione di un paesaggio virtuale. Sarà poi presentata una panoramica sui principali software utilizzabili per gli scopi di questa tesi. Saranno introdotti i metodi con i quali sviluppare concretamente un DEM virtuale e gli strumenti di conversione per poter usufruire delle funzioni di molteplici software. Saranno infine proposti una serie di metodi per l'analisi frattale dei territori reali e la base teorica per l'applicazione del modello RUSLE a scopo dimostrativo sul territorio virtuale.

Questa sezione introduce i concetti alla base delle procedure per la costruzione e l'utilizzo dei territori virtuali, presentate in figura 2.1.

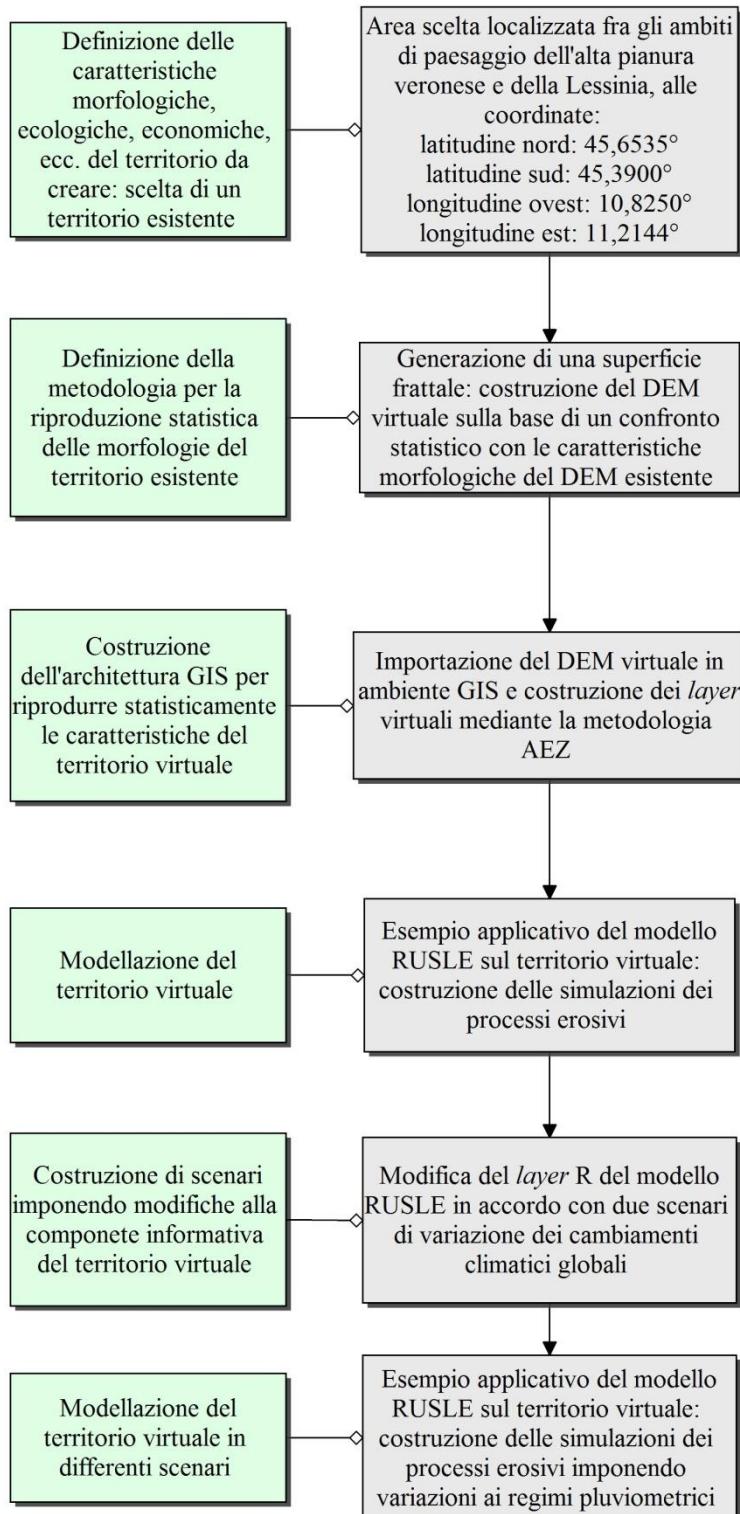


Figura 2.1 Diagramma di flusso che illustra le procedure seguite per la costruzione di un territorio virtuale e la sua potenziale applicazione nell'ambito della modellazione degli usi del suolo e dei cambiamenti climatici.

2.1 I frattali

I frattali sono oggetti geometrici complessi, la cui complessità deriva dalla ripetizione della stessa morfologia a diverse scale di grandezza. Risulta ampiamente dimostrato che l'ambiente e i processi naturali hanno evoluto forme e dinamiche di tipo frattale. Conseguentemente la riproduzione di queste forme e fenomeni può essere realizzata mediante la generazione procedurale di paesaggi, basata su algoritmi che generano superfici frattali. Si tratta di un processo computazionalmente impegnativo che può essere realizzato sfruttando la capacità di calcolo dei PC odierni (Ebert et al. 2003).

2.1.1 Proprietà dei frattali

La principale proprietà che caratterizza una superficie a frattali è la dimensione frattale (definita anche *roughness*). Dal punto di vista teorico, per tale superficie, essa è data della dimensione euclidea intera (es. 2) a cui è sommata una parte frazionaria (es. 0,3) definita incremento frattale. Tale incremento definisce la misura in cui la superficie frattale occupa la dimensione successiva all'intero precedente (Ebert et al. 2003).

Il tipo di morfologia che si ripete alle diverse scale è definita funzione di base, ed è una vera e propria funzione matematica. Una funzione di base ideale deve produrre morfologie non eccessivamente complesse e i valori di output devono variare entro un *range* compreso tra -1.0 e 1.0, con un valore medio di 0.0. In particolare, nell'ambito della generazione procedurale di superfici frattali, sono famose la funzione Ken Perlin's *noise* e le funzioni Steve Worley's Voronoi (Ebert et al. 2003).

La funzione di base *Perlin's noise*, proposta per la prima volta da Ken Perlin nel 1985, è la più veloce e adatta a costruire morfologie smussate e arrotondate.

La funzione di base *Voronoi*, anche chiamata "*cellular basis function*", è stata proposta per la prima volta da Steve Worley nel 1996. I valori di questa funzione sono calcolati, per un dato punto campionario, sulla base della distanza di questo rispetto ad un altro punto campionario a random nello spazio, chiamato "*seed*" e uno o più punti vicini (ne risulta un set di "*seeds*"). Per ogni coppia di punti si forma una cresta. Scegliendo diversi punti fra quelli del set di *seeds* si possono ottenere diverse morfologie. Il risultato è simile al modello *ridge multifractal* (paragrafo 2.1.3) ma le creste

sono più regolari e pertanto è necessario applicare una qualche distorsione per conferire un effetto più realistico (Ebert et al. 2003).

Oltre alla funzione di base, altri due parametri fondamentali sono ampiezza e frequenza spaziale. Se il tipo di morfologia dipende dalla funzione di base, risulta intuitivo definire questi parametri per un'ipotetica funzione seno (Ebert et al. 2003): per tale funzione periodica, l'ampiezza oscilla fra valori compresi tra 1 (picco d'onda) e -1 (ventre dell'onda) e la frequenza spaziale dipende dal periodo, che è l'intervallo di tempo dopo il quale il moto di un elemento di una corda oscillante comincia a ripetersi (Halliday et al. 2006). In questo modo la medesima morfologia si ripete a scale inferiori, ridotta di grandezza nella quantità definita da questi parametri (Ebert et al. 2003).

La misura con cui varia la frequenza spaziale fra una scala e l'altra è detta lacunarità, parametro che convenzionalmente è definito pari a 2.0: in questo modo la frequenza spaziale raddoppia e la grandezza di ogni parte del frattale dimezza ad ogni scala via via inferiore. Con una lacunarità pari a 2.0, ogni *step* successivo corrisponde esattamente ad un'ottava. Pertanto, il numero di volte in cui la grandezza della medesima morfologia viene dimezzata è pari al numero di ottave della superficie frattale generata. Di conseguenza, il livello di dettaglio di tale superficie dipende dal numero di ottave ed è limitato dalla capacità di calcolo del computer (Ebert et al. 2003).

2.1.2 Frattali come oggetti reali

Poiché la forma ripetuta a diverse scale dipende dalla funzione di base, non è possibile definire caratteristiche morfologiche precise che qualifichino gli oggetti frattali. In generale gli oggetti frattali reali possono presentare una medesima morfologia a diverse scale di grandezza ma non necessariamente a tutte: un oggetto può essere definito come frattale solo in un limitato *range* di scale. I frattali in natura sono pertanto definiti come "*band-limited*" in un'ampiezza di scale comprese fra la "*lower crossover scale*" e la "*upper crossover scale*" (Ebert et al. 2003). La conseguenza è che la stima della dimensione frattale di una superficie reale (ad esempio di un DEM) può dare risultati significativamente differenti a seconda della scala considerata (Gallant et al. 1994).

2.1.3 I modelli frattali

Musgrave nel libro "*Texturing and Modeling: a Procedural Approach*" presenta l'evoluzione dei codici che permettono di produrre superfici frattali, a partire dal più semplice modello frattale basato sul moto frazionario browniano verso morfologie più complesse ed eterogenee, ossia i multifrattali (Ebert et al. 2003).

La generazione di una superficie basata sulla logica frattale, all'atto pratico, consiste di un processo iterativo definito sulla base dei parametri precedentemente descritti nel paragrafo 2.1.1. Per un numero di cicli pari al numero di ottave, la morfologia, che dipende dalla funzione di base, viene aggiunta alla superficie frattale e riscalata. La scala varia nella misura definita dalla lacunarità: per un valore pari a 2.0, ad ogni ottava la scala della superficie raddoppia (Ebert et al. 2003).

Risulta intuitivo comprendere questo processo osservando la costruzione della curva di von Kock (Figura 2.2).

La relazione tra ampiezza e frequenza spaziale è ciò che definisce la dimensione frattale e, per una superficie multifrattale, essa è variabile. Infatti, la motivazione che ha spinto Musgrave a costruire il primo modello multifrattale è stata la necessità di riprodurre le superfici topografiche reali per le quali i processi erosivi determinano una minor rugosità a quote inferiori e una maggior acclività dei pendii a quote maggiori (quindi una diversa dimensione frattale). In seguito è stato sviluppato il modello *hybrid multifractal* per eliminare la dipendenza della rugosità dalla quota, pur mantenendo l'effetto dei processi erosivi non canalizzati. I vari modelli proposti seguono comunque la stessa procedura iterativa di base (Ebert et al. 2003).

In allegato 1 è riportato il codice scritto in C++ del modello *ridge multifractal*, definito da Musgrave come uno dei modelli multifrattali più efficaci. In questo modello è utilizzata una funzione di base nota come *ridge basis function*, che si ottiene sottraendo ad 1.0 i valori assoluti della funzione *Perlin's noise* (Ebert et al. 2003).

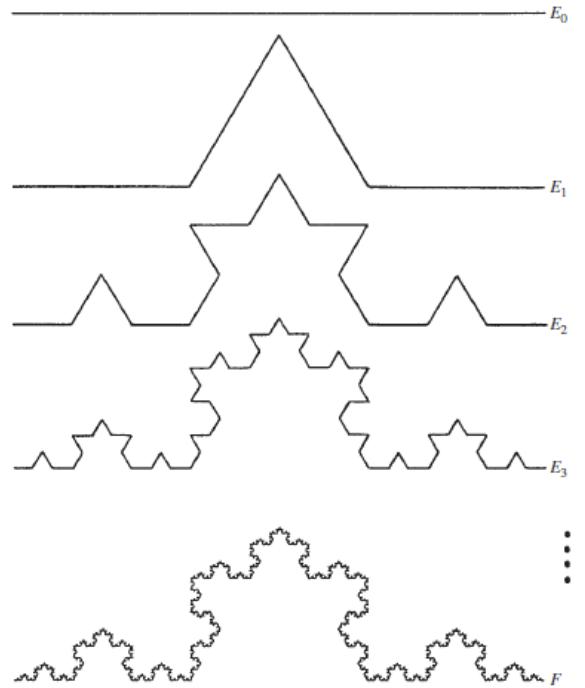


Figura 2.2 Costruzione della curva di von Kock (Falconer 2014)

Il codice richiede i seguenti valori di input: funzione di base (*ridge basis function*), dimensione frattale corrispondente alla massima rugosità, lacunarità (per convenzione 2.0), ottave, *offset* (1.0) e *gain* (2.0). Inoltre tutti i codici per generare superfici frattali necessitano di un generatore di numeri casuali. Il codice genera un *array* con i pesi per ciascuna frequenza, calcola la funzione di base per il primo punto generato a random e introduce una sequenza di calcoli propria di questo modello: il valore assoluto della funzione calcolata nel punto è sottratto all'*offset* ed elevato al quadrato. Il risultato nel codice è definito "*signal*" e ha un peso pari a uno, relativo alla prima ottava. Segue la procedura iterativa per generare la superficie frattale che si basa su un ciclo *for* ripetuto per un numero di volte pari al valore di input delle ottave. L'ottava successiva si calcola moltiplicando le coordinate dei valori x, y e z per la lacunarità. Il peso dell'ottava successiva è calcolato moltiplicando "*signal*" per il valore di input "*gain*" (è un fattore di scala). La procedura è poi analoga a quella per la prima ottava: il valore assoluto della funzione è sottratto all'*offset* ed elevato al quadrato. Dalla seconda ottava però il risultato, nuovamente definito "*signal*" è moltiplicato per il nuovo peso, precedentemente calcolato per quella ottava. Il risultato finale è una superficie frattale di tipo *ridge multifractal* (Figura 2.3) (Ebert et al. 2003).

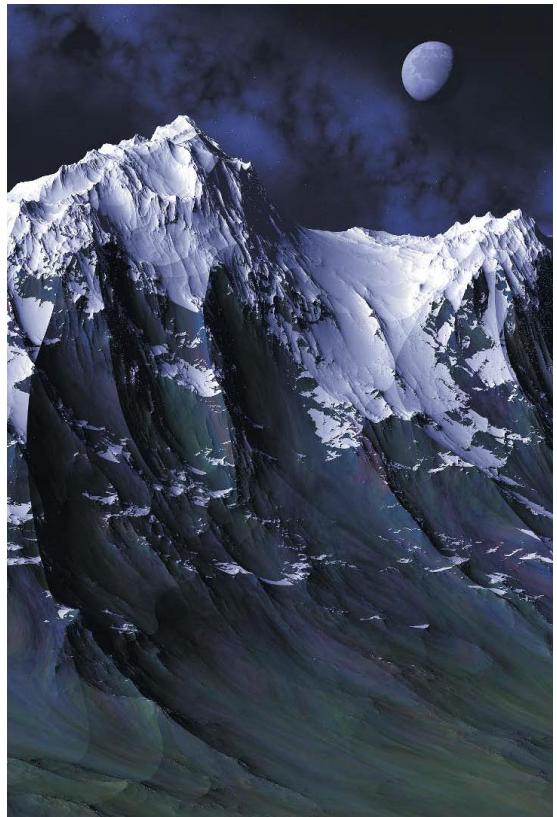


Figura 2.3 Rilievo costruito con una variante del Perlin's Noise chiamata ridge basis function (Ebert et al. 2003).

2.2 Panoramica sui software

Per gli scopi di questa tesi sono stati valutati diversi software, suddivisibili in quattro categorie: desktop GIS, ambienti di programmazione che integrano funzioni dei GIS, software di *graphic design* e strumenti utili alla sola visualizzazione 3D. In allegato 2 è riportata una tabella con le caratteristiche di alcuni software, potenzialmente utilizzabili, esclusi gli ambienti di programmazione, i software che non hanno strumenti di visualizzazione 3D, i desktop GIS e Google Earth.

2.2.1 Software di *graphic design*

La prima categoria di software presa in esame è quella degli ambienti grafici comunemente impiegati da artisti e *graphic designer* nell'ambito dell'industria videoludica o per la produzione di filmati in digitale, dedicati nello specifico alla creazione di paesaggio virtuali. Sono software sviluppati senza alcun tipo di supporto in relazione ai formati dei dati georiferiti. Generalmente non è possibile salvare i *file* in formati vettoriali o raster. Trattandosi di software per il *design* di oggetti 3D, i *file* sono salvati in formati tipici di quegli ambienti: ad esempio, molto diffuso è il formato obj per archiviare le *meshes*, oggetti grafici tridimensionali. Oltre a queste limitazioni si aggiunge il fatto che questi software sono in gran parte distribuiti con licenza commerciale e sono disponibili solo licenze *freeware* di versioni estremamente limitate nelle loro funzionalità: ad esempio le funzionalità di *import-export* sono quasi sempre disabilitate.

Fa eccezione un software di modellazione 3D denominato Blender. Si tratta di uno strumento di *graphic design* interamente *open source*, gestito e supportato dalla Fondazione Blender e paragonabile per funzionalità alle alternative commerciali. Non è un software dedicato nello specifico al *graphic design* di paesaggi ma alla grafica in generale: dalla modellazione di oggetti 3D, alla realizzazione di filmati, alla manipolazione di foto, fino alla costruzione di interazioni fra oggetti tipica delle dinamiche dei videogiochi o delle simulazioni virtuali. Trattandosi comunque di un software di *graphic design*, Blender non è stato programmato per la visualizzazione di mappe georiferite, né in 2D, né in 3D, né per la gestione di dati spaziali e attributi. Terze parti in modo autonomo hanno sviluppato e condiviso un *addon* mediante il quale è possibile importare dati raster georiferiti e shapefile e, dunque, usare le funzioni di *rendering* di Blender [1]. Eventualmente sarebbe possibile integrare le mappe con elementi 3D costruiti *ad hoc*.

Dal punto di vista pratico l'*addon* consente la visualizzazione di dati georiferiti e può essere utile in una fase finale di *rendering*. Manca invece delle funzionalità offerte dai comuni software GIS relativamente alla manipolazione della componente informativa delle immagini e dei *file* vettoriali. Un altro *addon* di Blender può essere impiegato per costruire una superficie 3D a frattali (ANT Landscape). All'atto della creazione dell'oggetto nell'interfaccia di Blender è possibile impostare determinati parametri (*dimension*, *octaves*, *noise size*, *lacunarity*, *sea level* e *offset*) e selezionare l'algoritmo per modellare la superficie (*type of fractal geometry*, *basic noise function*) [2]. L'oggetto 3D costruito non è georiferito, ma il principale limite è che tale superficie può essere esportata solo in formati tipici degli ambienti della grafica 3D, dunque non compatibili con i software GIS o altri strumenti di visualizzazione. In ambito GIS la proiezione in 2D di una superficie 3D reale è nota come DEM ed è l'immagine costruita con la matrice dei valori di elevazione di tale superficie 3D posta in un sistema di riferimento, sia esso cartesiano o polare sferico. Blender non ha la funzionalità di poter estrarre questa matrice da un oggetto 3D ma questa operazione può essere effettuata con altri software.

La versione di Blender impiegata è la 2.69.

2.2.2 Desktop GIS

L'*Environmental System Research Institute* (ESRI), società leader nello sviluppo di software GIS, definisce i desktop GIS come “*a mapping software that is installed onto and runs on a personal computer and allows users to display, query, update, and analyze data about geographic locations and the information linked to those locations*”. Ad oggi sono disponibili numerosi software GIS, alcuni distribuiti con licenza commerciale, altri disponibili con licenza GNU GPL (*General Public License*). Il più famoso software commerciale è ARC GIS, sviluppato e distribuito dalla stessa ESRI. Un altro software proprietario molto diffuso è IDRISI, distribuito da Clark Labs. Nel mondo dei software *open source*, sono riconosciuti otto desktop GIS equiparabili per funzionalità ai software proprietari: GRASS GIS, QGIS, ILWIS/ILWIS Open, uDig, SAGA, OpenJUMP, MapWindow GIS e gvSIG (Steiniger and Hunter 2013).

Nello specifico, Quantum GIS (QGIS) è un software completamente gestito e supportato da sviluppatori indipendenti, che affianca la capacità di gestire ed analizzare dati spaziali, immagini satellitari e foto aeree ai comuni strumenti tipici di un software CAD (*Computer-Aided Design*), per

elaborazioni in due dimensioni. QGIS è inoltre dotato di un *plug in*, scaricabile dal *repository* dedicato, che integra parzialmente le funzioni di GRASS GIS.

Esistono sul mercato software che integrano le funzionalità di uno strumento GIS ma che si configurano come veri e propri strumenti di visualizzazione 3D, per la costruzione di simulazioni dinamiche. Non sono tuttavia classificabili come desktop GIS. Sono strumenti molto sofisticati, spesso inclusi in un *software development kit* (SDK) per permettere ai clienti di sviluppare il proprio software in base alle proprie esigenze. Tra questi, sono da citare in particolare: Trian3DBuilder della *software house* Triangraphics e Landsim3D e Blueberry3D della Bionatics. Sono software molto costosi (anche dell'ordine delle decine di migliaia di euro) orientati all'uso da parte di pianificatori paesaggisti, enti governativi e in ambito militare. Le potenzialità che questi software offrono, vanno oltre gli scopi di questa tesi e, in ogni caso, non sono stati sviluppati nello specifico per scienziati e ricercatori. Per questo motivo Griffon et al. hanno deciso di sviluppare il proprio programma come *plug in* del noto QGIS, integrando così le funzionalità di un software di visualizzazione 3D in un ambiente GIS (Griffon, Nespolous and Cheylan 2011). Il *plug in* si chiama *Seamless Landscape Explorer* (SLE) e purtroppo, da alcuni anni, non è più supportato dagli sviluppatori e non è stata aggiornata la compatibilità con le più recenti versioni di QGIS.

Per la semplice visualizzazione 3D dei DEM (ed eventualmente di un raster sovrapposto) è funzionale il modulo "Fly Through" di IDRISI: proietta unicamente le mappe in 3D e non è uno strumento per generazione di *mesh* (case, alberi, ecc.) da inserire nel paesaggio virtuale (diversamente da Blender, Landsim3D, Blueberry 3D e il SLE).

Le versioni dei software GIS impiegati in questa tesi sono le seguenti:

- QGIS 2.0.1 "Dufour";
- IDRISI 16.02 "Taiga".

2.2.3 Strumenti di visualizzazione 3D

Google Earth è un “*virtual 3D visualization tool*” *freeware*. Non si configura come uno strumento per raccogliere dati ma rappresenta una base sulla quale caricare diversi *layer* per avere un riscontro visivo immediato della distribuzione delle informazioni mappate, in rapporto alla morfologia del paesaggio e al profilo altitudinale (è immediato vedere per esempio in un ambiente montano che la densità di popolazione è maggiore a quote minori, ossia nelle valli). Per contro, Google Earth non è uno strumento adatto ad interrogare i *layer* caricati per ottenere informazioni quantitative. Esiste

una versione commerciale chiamata Google Earth Pro, dotata di funzioni aggiuntive rispetto alla versione *freeware*.

Dal punto di vista pratico è possibile importare in Google Earth *file* vettoriali in formato kmz e immagini raster salvate nel sistema di coordinate WGS84 in formato tif o tiff. Nel caso in cui vi siano problemi nell'importazione delle immagini raster in Google Earth è possibile inserire manualmente le coordinate dei quattro angoli di ciascuna mappa, per ottenere il corretto georiferimento. Ciò è realizzabile mediante Osgeo4w, un insieme di librerie accessibili mediante *shell* in cui digitare righe di codice per utilizzarne le funzioni. È possibile estrarre le coordinate di un'immagine raster scrivendo il seguente comando:

```
listgeo -d ****.tif
```

****: percorso\nome del *file*

Le coordinate estratte possono essere inserite manualmente in Google Earth per ottenere il corretto georiferimento dell'immagine.

Mediante un *addon* [1] è possibile sfruttare anche Blender come strumento di visualizzazione in modo molto semplice. È sufficiente importare un'immagine raster di background e il relativo DEM per visualizzare un mappa in 3D. In questo caso la qualità della visualizzazione dipende unicamente da quella dei *file* raster originariamente impiegati e, a differenza di Google Earth, è possibile visualizzare anche superfici frattali virtuali. L'unico limite è che l'*addon* richiede che le immagini raster siano importate in formato tif o tiff associato a un secondo *file*: tiff world file (.tfw). Il *file* tfw può essere costruito a partire da un *file* tif o tiff originario usando un *plug in* di QGIS (Georeferenziatore Raster GDAL) o più semplicemente sfruttando un comando di Osgeo4w:

```
listgeo -tfw ****.tif
```

****: percorso\nome del *file*

Il *file* viene scritto allo stesso indirizzo come ****.tfw. In Blender viene dunque importata una semplice immagine in formato tif, cui è associato un *file* tfw che contiene le informazioni spaziali.

2.2.4 Ambienti di programmazione

Un approccio che sfrutta degli *Integrated Development Environment* (IDE) si basa sul principio che la maggior libertà offerta dalla programmazione dovrebbe essere in grado di superare i limiti imposti dai software preesistenti. Il ricorso agli IDE può quindi essere funzionale, anche se ciò richiede competenze specifiche: la conoscenza di un linguaggio di programmazione e dell'utilizzo

dell’interfaccia di un IDE. L’utilizzo degli IDE è stato valutato considerando la necessità di impiegare un linguaggio di alto livello, per facilitare e semplificare la scrittura degli script, e di sfruttare un software che già di per sé integrasse delle funzionalità grafiche e di calcolo geospaziale. Matlab (MATrixLABoratory) è un software sviluppato per l’esecuzione di calcoli ingegneristici e scientifici focalizzati, in particolare, sull’elaborazione di matrici di dati. È distribuito in varie versioni con licenza commerciale dalla MathWorks Inc. insieme a una serie di pacchetti aggiuntivi che ne ampliano le funzionalità, trasformandolo in un software idoneo alla risoluzione di moltissimi problemi tecnici. L’IDE Matlab si basa sul linguaggio di programmazione chiamato col medesimo nome. Questo linguaggio integra una serie di funzioni predefinite che semplificano il lavoro di programmazione e migliorano l’efficienza del risultato. In ambiente Matlab gli script sono archiviati in *file* con estensione “m”. Analogamente è possibile salvare le funzioni scritte dagli utenti e invocarle dalla finestra di comando di Matlab. Gli stessi utenti possono condividere le proprie funzioni sul sito della Mathworks Inc. [3] per favorire la risoluzione di problemi per i quali non esistono funzioni predefinite. Matlab può essere installato ed eseguito su diversi sistemi operativi e si basa su un approccio di tipo interpretato: in questo modo gli script in formato “.m” possono essere eseguiti senza essere compilati in un linguaggio alternativo (codice macchina). Un’altra caratteristica di Matlab è che le variabili scritte sono definite nel momento in cui vengono utilizzate per la prima volta e il loro tipo è dinamico ossia può cambiare durante l’esecuzione del programma (Campi et al. 2011).

Octave è un software distribuito con licenza GNU GPL e parzialmente compatibile con il linguaggio di Matlab. L’IDE Octave è stato scritto da John W. Eaton ed altri sviluppatori e la prima versione *alpha* del programma è stata rilasciata il 4 gennaio 1993. L’intento iniziale era quello di creare un programma per il calcolo tecnico basato su un linguaggio più semplice da apprendere per gli studenti, rispetto ai linguaggi preesistenti. Ad oggi Octave si è diffuso in tutto il mondo e viene quotidianamente utilizzato da studenti, scienziati ed anche per lo sviluppo di applicazioni commerciali [4]. Tale IDE è in grado di eseguire programmi scritti nel linguaggio di Matlab da cui differisce solo per poche incompatibilità a livello di sintassi (Campi et al. 2011).

In Matlab e Octave la disponibilità di funzioni per affrontare problemi specifici rappresenta il principale vantaggio derivante dall’utilizzo di questi software. Tuttavia, in Matlab il loro utilizzo dipende dall’acquisto di pacchetti aggiuntivi o dalla disponibilità di nuove funzioni scaricabili dal web. In Octave invece la disponibilità di nuove funzioni dipende unicamente dalla condivisione di

file nelle comunità di utenti di questo IDE. Oltre tutto le funzioni integrate in Octave sono archiviate in formato "m" e liberamente accessibili.

2.3 Metodi per la generazione di una superficie a frattali

2.3.1 GRASS: *r.surf.fractal*

Il modulo "r.surf.fractal" del *plug in* GRASS di QGIS permette di costruire il DEM di una superficie frattale, direttamente archiviabile nei formati compatibili con i software GIS. Per la costruzione di tale superficie il *plug in* richiede un unico parametro: la dimensione frattale. La funzione si basa sullo "*spectral synthesis method*", descritto nel libro *The Science of Fractal Images*, secondo cui sulla base di una precisa densità spettrale è possibile generare un fBm (moto Browniano frazionario) con un *Hurst Exponent* (H) compreso tra 0 e 1 (Figura 2.4) (Saupe 1988).

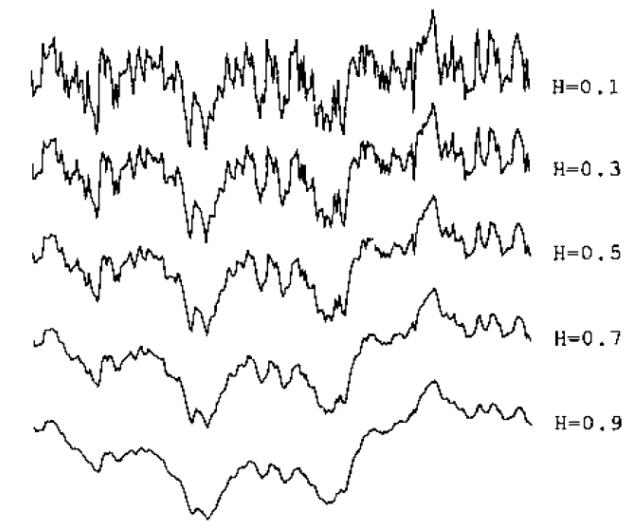


Figura 2.4 fBm con diverse densità spettrali e i relativi H (Ebert et al. 2003)

In particolare esiste una relazione di proporzionalità fra la densità spettrale $S(f)$ di una distribuzione $X(f)$ (con f = frequenza) e il temine che contiene l'esponente spettrale β , $1/f^\beta$ (Saupe 1988):

$$S(f) \propto 1/f^\beta$$

β è legato allo *Hurst Exponent* (H) e alla dimensione frattale (D_f) dalle seguenti equazioni (Saupe 1988):

$$\beta = 2H + 1$$

$$D_f = 2 - H$$

La densità spettrale è il contributo medio alla potenza totale suddivisa tra tutte le componenti della distribuzione di valori $X(f)$, calcolata fra le frequenze f ed $f + df$, che si ottiene dopo aver applicato la *Fast Fourier Transform* (FFT). Se la potenza totale è suddivisa equamente fra tutte le frequenze, si ottiene il cosiddetto "*white noise*". Se invece sussiste la relazione di proporzionalità precedentemente descritta, si ottiene un fBm con una ben definita dimensione frattale (Saupe 1988). All'atto pratico si applica il "*Fourier Filtering Method*": la distribuzione $X(f)$ è calcolata a partire dalla sommatoria di singoli coefficienti campionati ad intervalli regolari su una funzione di partenza e proporzionali a $1/f^{\beta}$ (per generare un fBm con una definita dimensione frattale). Viene poi applicata la trasformata inversa di Fourier per ottenere la distribuzione X nel dominio del tempo ($x(t)$) (Saupe 1988).

Il metodo descritto finora è valido per generare un fBm con una dimensione frattale compresa fra 1 e 2. Per ottenere una superficie a frattali il metodo deve quindi essere esteso a dimensioni superiori tali per cui (Saupe 1988):

$$D_f = 3 - H$$

Il metodo è analogo, ma per una superficie è necessario considerare che la densità spettrale dipende da due frequenze (u, v) nelle due direzioni x, y , secondo la seguente relazione (Saupe 1988):

$$S(u, v) = 1/(u^2 + v^2)^{H+1}$$

2.3.2 Funzioni di Matlab

Sul sito della Mathworks Inc. alla voce "*file exchange*" è possibile scaricare funzioni di Matlab condivise da altri utenti [3]. In particolare, è disponibile un algoritmo scritto dall'utente Tucker McClure che impiega le funzionalità grafiche di Matlab per costruire paesaggi realistici [5]. McClure propone tre differenti algoritmi. Le funzioni per invocare tali algoritmi nella finestra di comando di Matlab sono le seguenti:

1. `[zm, xm, ym] = generate_brownian_mesh(n, zm)`
2. `[hm, xm, ym, rm] = generate_brownian_tri(n, nm, r0, el, rr))`

3. `[x, y, h, hm, xm, ym] = generate_terrain(n, mesh_size, h0, r0, rr)`

Il primo e il secondo sono algoritmi sviluppati da Benoît Mandelbrot, matematico che per primo teorizzò il concetto di geometria frattale, ipotizzando che la natura stessa si sia ampiamente evoluta riproducendo le medesime geometrie a differenti scale (Ebert et al. 2003). Da ciò deriva la potenziale applicazione dei frattali nella riproduzione di elementi naturali. Entrambi questi algoritmi generano un fBm. Rispetto al terzo, producono un paesaggio meno realistico ma sono più veloci da eseguire dal punto di vista computazionale.

Il primo algoritmo richiede come parametri di input il numero di iterazioni ossia le ottave (`n`) e un *array* di elevazione iniziale (`zm`). I parametri di output `xm` e `ym` sono iterativamente calcolati ad ogni *step* mediante la funzione *meshgrid*. Tramite la funzione *interp2* vengono calcolati i nuovi valori di `zm` interpolando ad ogni ciclo i valori assunti dagli *array* `xm` e `ym`, sommati ad una componente di variazione casuale. Al termine del ciclo *for*, di lunghezza predefinita pari a `n`, è possibile visualizzare a video una superficie 3D mediante la funzione *surf*.

Il secondo algoritmo è più complesso e richiede come parametri di input il numero di iterazioni (`n`), la risoluzione della mappa finale (`nm`), un valore di elevazione iniziale (`el`), un valore di rugosità iniziale del terreno (`r0`) e un valore che definisce l'entità della variazione della rugosità (`rr`). L'algoritmo si basa sempre su un ciclo *for* da 1 a `n` iterazioni. Tanto maggiore è il parametro `n`, tanto più realistico sarà il risultato e tanto più tempo sarà richiesto per l'elaborazione. I parametri di output sono i valori di `x` corrispondenti al *mesh* (`xm`), i valori di `y` corrispondenti al *mesh* (`ym`) e una matrice con i valori di elevazione, detta *heightmesh* (`hm`). In grafica e modellazione 3D, per *mesh* si intende la maglia poligonale che definisce la forma di un oggetto 3D, nel nostro caso la superficie a frattali. Ad ogni ciclo l'algoritmo ricalcola elevazione e rugosità per ciascun punto e mediante le funzioni *meshgrid* e *surf* è possibile visualizzare a video la superficie in 3D.

Il terzo algoritmo proposto da McClure è il più sofisticato e computazionalmente impegnativo dei tre, ma garantisce un livello di realismo migliore. I parametri di input sono gli stessi del secondo algoritmo. Tuttavia per valori di $n > 7$, il tempo richiesto per l'elaborazione è circa tre volte maggiore ad ogni iterazione ed il miglioramento dei dettagli non è apparentemente visibile.

Questa funzione include anche due parametri di *default*, impostati dall'autore dello script: il numero di punti iniziali, compreso fra 1 e 5 (`n0`); il numero di nuovi punti (in questo caso `m=3`) generati da ogni vecchio punto, ad ogni successiva iterazione. Inizialmente l'algoritmo produce quattro matrici contenenti le coordinate `x`, `y`, i valori di elevazione (`h`) e quelli di rugosità (`r`). Anche in questo caso, il principio del metodo è un ciclo *for*. Ogni iterazione determina la generazione di nuovi punti sulla

base dei parametri iniziali, per i quali sono calcolate le matrici contenenti i nuovi valori di coordinate $x(new)$ e $y(new)$. Viene ricalcolata la rugosità $r(new)$ interpolando le matrici x , y , r , h e le nuove matrici, sommando una componente di variazione casuale. Analogamente viene calcolata la nuova matrice di elevazione $h(new)$, considerando però anche la matrice $r(new)$. Come per gli altri due algoritmi il risultato può essere visualizzato a video.

2.3.3 Blender: ANT Landscape

ANT Landscape è un *addon* di Blender scaricabile direttamente dal *repository* del programma. Questo *addon* alla voce "*add mesh*" aggiunge l'opzione "*Landscape*" che genera una superficie a frattali di *default* e apre un pannello (Figura 2.5) che permette di modificare determinati parametri per modellare il paesaggio secondo necessità. Il pannello di controllo è accessibile solo all'atto della costruzione del paesaggio stesso e permette il settaggio dei seguenti parametri:

- "*Subdivisions*" modifica il livello di dettaglio del paesaggio;
- "*Mesh size*" definisce la dimensione del *mesh* nel campo vettoriale di Blender;
- "*Basis*" e "*Type*" definiscono la funzione di base (fra cui le funzioni *Perlin's Noise* e *Voronoi*) e le sue modificazioni (dal menù a tendina è possibile selezionare varie possibili combinazioni per ottenere diversi effetti);
- "*Random seed*" produce un paesaggio a *random* sulla base dei valori numerici settati per gli altri parametri;
- "*Noise size*" rappresenta l'ampiezza della funzione di base;
- "*Depth*" rappresenta il numero di frequenze (iterazioni);
- "*Dimension*" rappresenta il complemento ad uno dell'incremento frattale fra la seconda e la terza dimensione (ossia rappresenta indirettamente la dimensione frattale);
- "*Lacunarity*" rappresenta il *gap* fra frequenze successive;

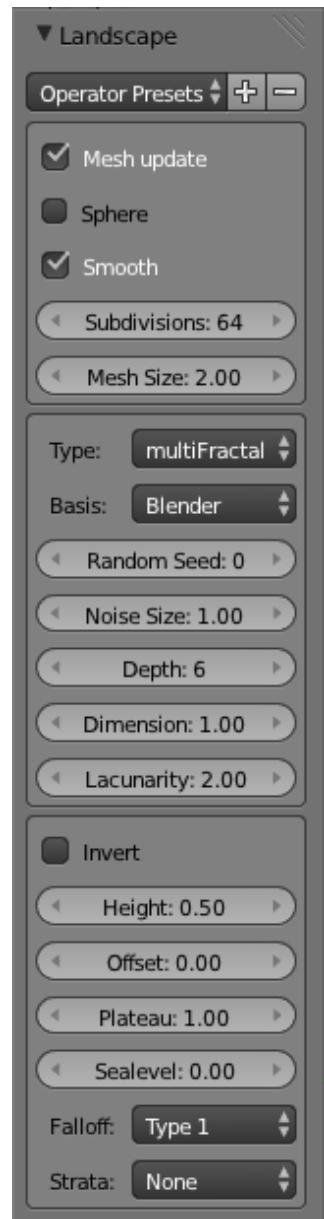


Figura 2.5 Pannello di controllo di ANT Landscape: configurazione di default.

- "*Height*", "*Offset*", "*Plateau*" e "*Sealevel*" sono parametri che pongono dei vincoli spaziali al *mesh*, in quanto oggetto 3D, senza agire sulle proprietà frattali del paesaggio;
- "*Falloff*" permette di modellare tutta la superficie del *mesh* o solo una parte (la parte centrale o centralmente lungo le direzioni x o y);
- "*Strata*" produce una stratificazione della superficie.

A seconda del tipo di frattale selezionato ("*Type*") è possibile aver accesso ad un numero maggiore o minore di parametri. Ad esempio selezionando il modello frattale di tipo ridge multifractal, sotto la voce "Lacunarity", sono aggiunti i parametri "*Offset*" (diverso dall'"*Offset*" presente nel pannello di controllo nella configurazione di *default*) e "*Gain*", descritti in precedenza nella spiegazione del modello *ridge multifractal* sulla base del codice di Musgrave.

2.4 Strumenti di conversione dati

Utilizzare programmi *open source* spesso comporta dei limiti in termini di capacità di importazione/esportazione dati. Per poter sfruttare al meglio differenti software, in mancanza di specifici strumenti di conversione dati, può essere necessario utilizzare degli IDE per realizzare il collegamento fra questi.

Con un codice di Matlab, disponibile in rete, è possibile estrarre i vertici di un oggetto 3D in formato obj [6] (ad esempio un paesaggio generato con Blender). Lavorando in ambiente Matlab, con la funzione *TriScatteredInterp* è possibile effettuare una triangolazione di delaunay interpolando i vertici precedentemente estratti. Con la funzione *meshgrid* è possibile costruire una griglia di coordinate x e y e, per ciascuna coppia di queste, ricalcolare il valore di elevazione z, ottenendo così un *heightfield*. Con la funzione *arcgridwrite*, disponibile per il *download* sul sito della Mathworks Inc. [7], si possono allocare i valori di x, y, z in un *file* in formato *Arc ASCII Grid Format*, accessibile alla maggior parte dei software GIS.

Alternativamente, nota la struttura di un *file*, è possibile estrarre manualmente le informazioni mediante un *editor* di testo: le coordinate spaziali (x, y, z) del *mesh* nel *file* obj possono essere ritagliate e incollate in un nuovo *file* di testo, salvato in un formato chiamato csv (*comma-separated values*). QGIS dispone poi degli strumenti per importare *layer* vettoriali a partire dalle coordinate spaziali riportate in questi *file*.

2.5 Stima della dimensione frattale di un DEM esistente

Gli oggetti reali possono esibire due diversi tipi di complessità: frattale e non frattale. La complessità non frattale è il risultato di una serie di eventi distinti e incorrelati che si sono susseguiti nel tempo. A causa della indipendenza di questi eventi, è difficile interpretare le caratteristiche che determinano tale complessità. Viceversa la complessità frattale caratterizza quegli oggetti che manifestano un'auto-similarità ossia una ripetizione della medesima morfologia a differenti scale.

Oggetti semplici non richiedono una geometria frattale per la loro riproduzione. Oggetti complessi non frattali, come ad esempio l'erba, per essere riprodotti richiedono strumenti differenti rispetto a quelli basati sulla logica frattale. Esistono tuttavia un'ampia varietà di fenomeni naturali che possono produrre oggetti con morfologie frattali: fra questi ad esempio fulmini, alberi e sistemi vascolari negli organismi viventi (Ebert et al. 2003).

I rilievi sono fra gli oggetti frattali maggiormente conosciuti e presentano auto-similarità statistica a differenti scale. Il termine statistica indica che le morfologie ripetute a differenti scale non sono geometricamente identiche ma statisticamente simili (Ebert et al. 2003). Questa caratteristica dei rilievi naturali può essere impiegata per descriverne la complessità mediante procedure di calcolo statistico.

In Allegato 3 è riportato un codice di Matlab in grado di stimare la dimensione frattale di un DEM per ogni pixel dell'immagine sulla base dell'*Hurst Exponent* (H) stimato per kernel di dimensione definita dai parametri di input della funzione. La stima di H si basa sulla funzione di Matlab wfbmesti [8]. L'algoritmo è valido nella stima di superfici monofrattali che presentano morfologie di tipo fBm, ma è carente nella stima di complessi DEM multifrattali, fra cui la gran parte dei paesaggi esistenti.

Una migliore stima della dimensione frattale locale può essere ottenuta utilizzando un metodo di calcolo impiegato da una software GIS proprietario chiamato IDRISI. Per stimare la dimensione frattale, a partire da una DEM esistente, mediante il comando "SURFACE" il software calcola la pendenza punto per punto, sulla base dei valori di quota dei pixel adiacenti. Questi possono essere selezionati impostando come comando di input la dimensione del *kernel* da utilizzare: 3*3, 5*5, 7*7 (Eastman 2009).

La formula per calcolare la pendenza è la seguente:

$$\tan_slope = \sqrt{\left(\frac{right - left}{res * 2}\right)^2 + \left(\frac{top - bottom}{res * 2}\right)^2}$$

res = risoluzione spaziale del DEM

right, left, top, bottom = valori di quota dei pixel adiacenti

Questa procedura di calcolo della pendenza è anche nota come *rook's case procedure*. La mappa delle pendenze generata può essere impiegata per stimare la dimensione frattale del DEM iniziale, mediante il comando "TEXTURE" di IDRISI, sulla base della seguente equazione (Eastman 2009):

$$Dimensione\ frattale = \frac{\log(2)}{\log(2) + \log\left(\sin\left(\frac{180 - Pendenza}{2}\right)\right)}$$

Il risultato è una mappa della stima della dimensione frattale locale, valida per caratterizzare la complessità frattale di un paesaggio eterogeneo (Eastman 2009).

2.6 Scelta del territorio da riprodurre e analisi della variabilità frattale

2.6.1 Analisi della variabilità frattale del territorio del Veneto

Per costruire un paesaggio basato sulla logica frattale è necessario innanzitutto comprendere qual è l'entità della variazione della dimensione frattale per le superfici naturali. Mediante il comando "TEXTURE" del software IDRISI è stata quindi generata una mappa della dimensione frattale locale del Veneto, sulla base del metodo descritto al paragrafo 2.5. Questa mappa è stata poi elaborata in QGIS per calcolare le statistiche di base e dunque comprendere la variabilità e la distribuzione della dimensione frattale nel territorio del Veneto.

L'istogramma della mappa (Figura 2.6) dimostra che, per superfici naturali eterogenee, la frequenza dei pixel associati a bassi valori di dimensione frattale è predominante, alla scala considerata. Per comprendere in che misura questo trend dipende dall'estensione delle aree pianeggianti sono state calcolate le statistiche di base separatamente per le fasce altimetriche 0-300 m, 300-600 m e oltre i 600 m. La procedura seguita in QGIS prevede innanzitutto la costruzione dei vettori che identificano queste diverse aree:

- è stato impiegato il "Calcolatore raster" per costruire 3 *layer* distinti, usando rispettivamente le espressioni "c0103014_DTM25@1 <= 300", "c0103014_DTM25@1 > 300 AND c0103014_DTM25@1 >= 600" e "c0103014_DTM25@1 > 600". Nelle maschere ottenute, le aree d'interesse sono contraddistinte dal valore 1;
- i tre *layer* vengono poligonizzati e per ciascuno, dalla tabella degli attributi, sono rimossi i poligoni associati a valori pari a 0;
- i tre *layer*, formati da numerosi poligoni con attributo 1, sono unificati in un singolo oggetto poligonale mediante un comando di QGIS chiamato "Da parti singole a parti multiple", nel menù a tendina relativo alla voce "Strumenti di geometria";

I vettori così ottenuti identificano le fasce altimetriche di pianura, collina e montagna e possono essere impiegati come vettori di ritaglio per selezionare le aree d'interesse nelle quali calcolare le statistiche sulla mappa della dimensione frattale.

Con la funzione "Clip", localizzata nel menù a tendina relativo alla voce "Estrazione", è possibile ritagliare la mappa della dimensione frattale imponendo una maschera vettoriale: vengono così prodotte tre mappe della dimensione frattale, distinte per fasce altimetriche.

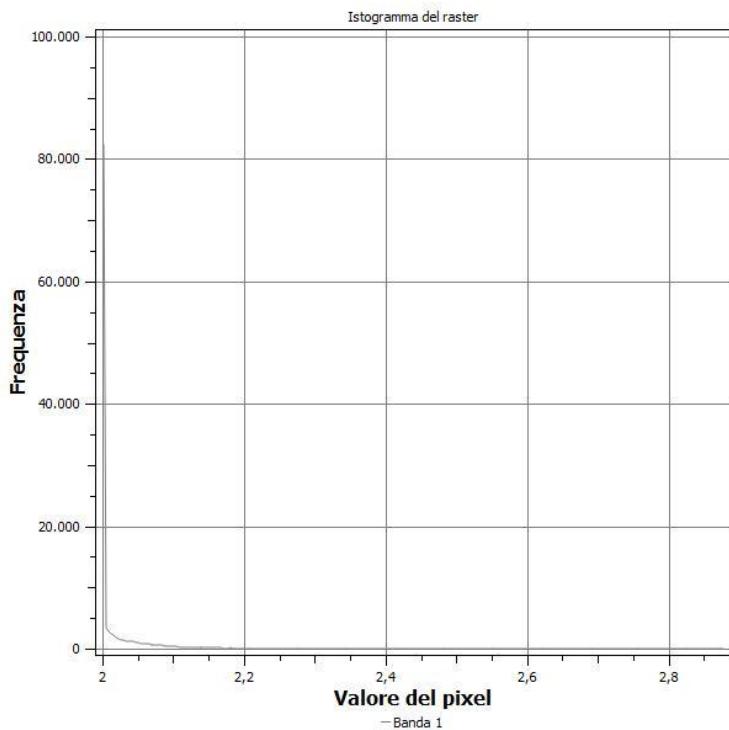


Figura 2.6 Istogramma della mappa della dimensione frattale del Veneto.

Per il calcolo delle statistiche di base per le celle non nulle delle immagini raster, il modulo "r.univar" del *plug in* GRASS è il più completo in ambiente QGIS. La tabella seguente (2.1) riporta le statistiche di base ottenute per le diverse fasce altimetriche e per l'intero territorio del Veneto.

Tabella 2.1 Statistiche calcolate col modulo "r.univar" di GRASS, per il Veneto e separatamente per le aree di pianura collina e montagna.

	Veneto	Pianura	Collina	Montagna
Minimo	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000
Massimo	2,879030	2,583970	2,666850	2,879030
Range	0,879035	0,583969	0,666853	0,879035
Media	2,018390	2,001280	2,028970	2,061450

In relazione all'istogramma della mappa della dimensione frattale del Veneto, è da notare che, nonostante l'ampio *range* di variazione, per tutte le immagini raster si registrano valori medi molto bassi. Pertanto anche le aree montuose che presentano una maggiore rugosità manifestano una dominanza di valori di dimensione frattale inferiore a 2,1, alla scala considerata, come dimostrato dal seguente istogramma (Figura 2.7) relativo alla mappa raster che identifica quote superiori a 600 m.

Le statistiche presentano anche una discrepanza fra incremento dei valori minimi e massimi con le fasce altimetriche. L'incremento dei valori massimi con la quota si attesta in conseguenza del fatto che le aree montane presentano una maggiore rugosità. L'eterogeneità del paesaggio può tuttavia manifestarsi determinando morfologie pianeggiate o vallive anche a quote relativamente alte. Pertanto la dimensione frattale non è strettamente correlata con la quota e l'eterogeneità spaziale garantisce una dominanza di aree a

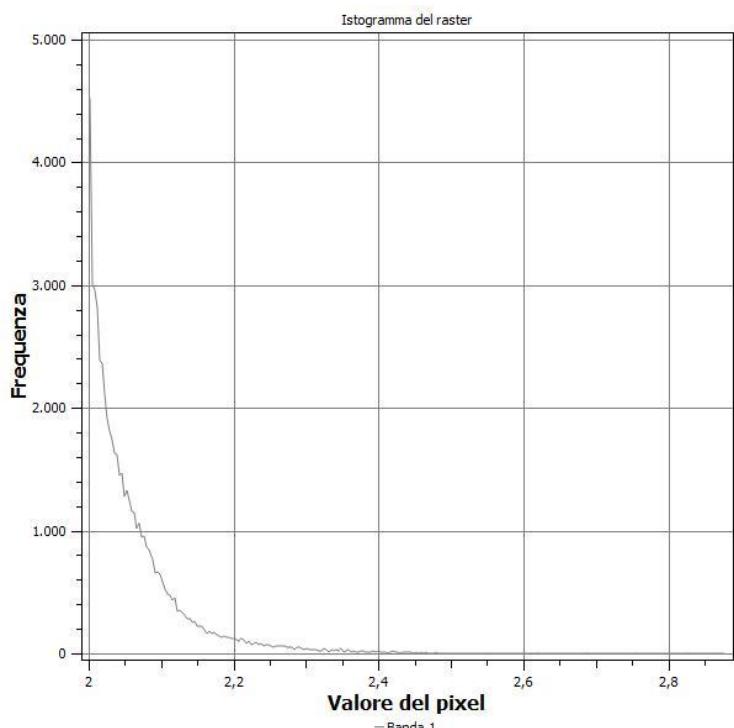


Figura 2.7 Istogramma della mappa della dimensione frattale delle aree montane del Veneto.

bassa dimensione frattale anche nelle aree montuose, dove si registra però la maggior variabilità.

Una misura comune dell'eterogeneità morfologica di un DEM in ambiente GIS è data dalla pendenza. Utilizzando il modulo "r.regression.line" è stato possibile effettuare una regressione lineare fra due mappe raster: una mappa delle pendenze del Veneto (derivata dal DTM "c0103014_DTM25" con lo strumento "DEM (analisi geomorfologica)") e quella della dimensione frattale. Il coefficiente di correlazione di Pearson ottenuto ($r = 0,915505$) indica l'elevato grado di correlazione positiva fra i parametri. La pendenza può quindi essere impiegata come metro di misura per definire una classificazione morfologica che segue la logica frattale.

2.6.2 Scelta del territorio da riprodurre su base frattale

La selezione di un'area del Veneto è finalizzata alla sua riproduzione al computer, basata sulla logica frattale. La motivazione è che l'intera estensione del Veneto presenta un'elevata variabilità morfologica e di copertura del suolo e, pertanto, la selezione di un'area a minor complessità può essere più efficace in questa prima indagine sulle possibilità di usufruire di strumenti software in grado di produrre territori virtuali. Seguirà quindi la definizione del campione di riferimento e la sua classificazione in fasce di pendenza.

Per questo studio è stata selezionata un'area che secondo il Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC) è localizzata fra gli ambiti di paesaggio dell'alta pianura veronese e della Lessinia. La figura 2.8 riporta il poligono di coordinate:
latitudine nord: 45,6535°,
latitudine sud: 45,3900°,
longitudine ovest: 10,8250°,
e longitudine est: 11,2144°,
che rappresenta il territorio oggetto di studio, rispetto alla Regione Veneto.

Legenda
■ Area selezionata
■ Confini amministrativi del Veneto

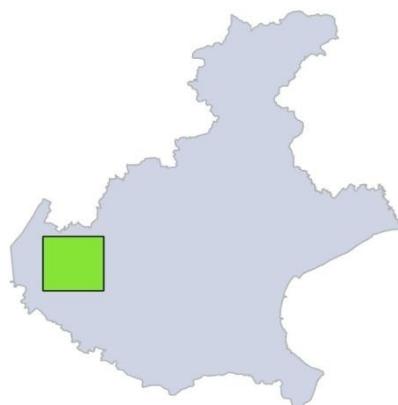


Figura 2.8 Localizzazione dell'area selezionata rispetto ai confini amministrativi del Veneto.

Nel suo complesso l'area presenta un gradiente di quota positivo da sud a nord, fino ad arrivare a circa 1549 m (Figura 2.9).

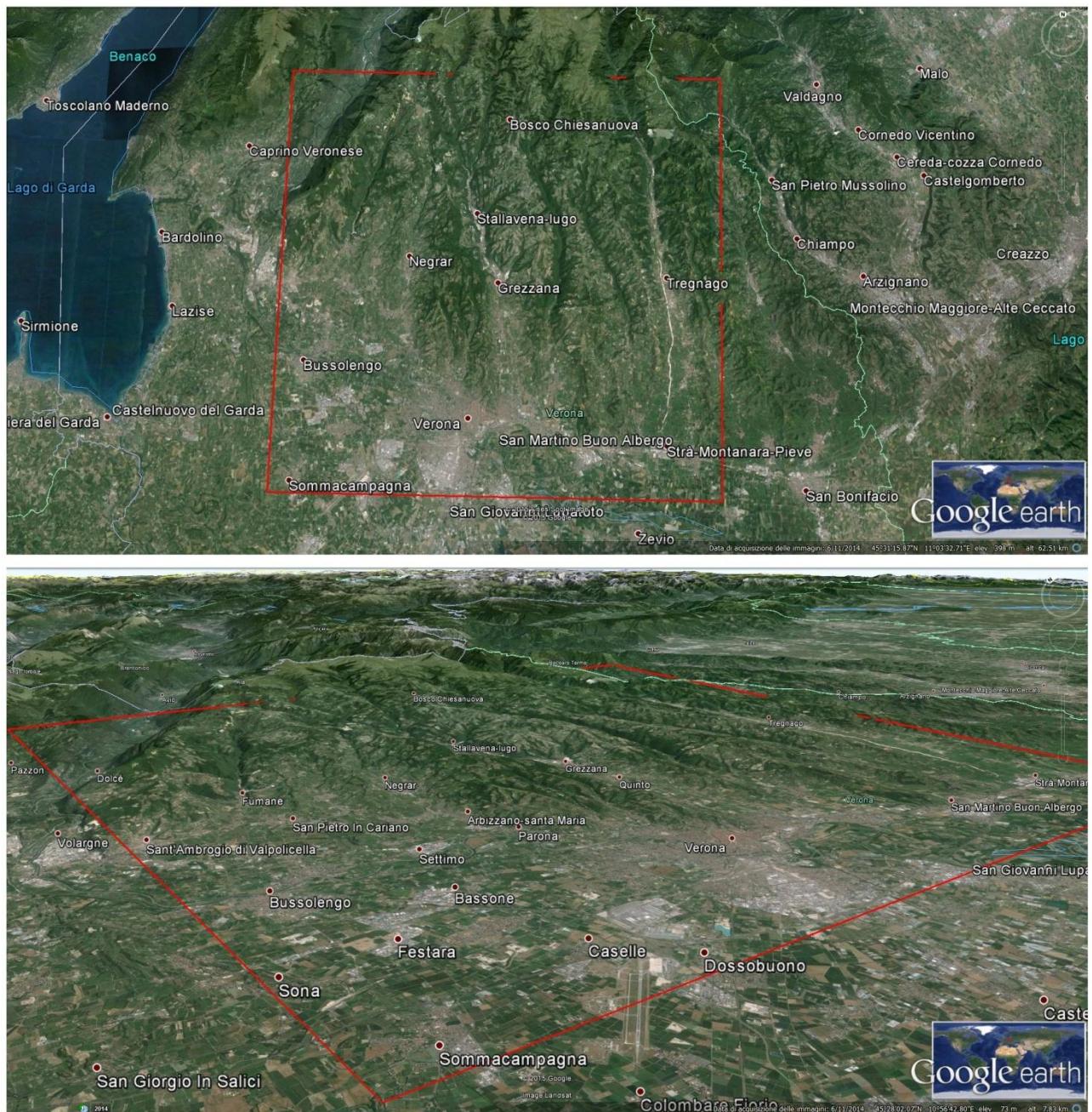


Figura 2.9 Vista in 3D con Google Earth dell'area selezionata.

L'area montuosa a nord rappresenta il tipico paesaggio Prealpino e comprende i sistemi collinari e montani dei monti della Lessinia. L'altopiano degrada verso valle dove si congiunge con l'alta pianura veronese (Regione Veneto 2013).

Il paesaggio montano e collinare è principalmente caratterizzato da copertura vegetale e usi del suolo in dipendenza delle fasce altitudinali e presenta un'alta densità di nuclei urbani di piccole dimensioni nelle valli, soprattutto nei primi 1000 metri di quota. A quote maggiori prevale il prato-pascolo, con sporadica presenza di faggete e aree boschive miste con conifere. A quote intermedie, sono presenti ostrio-querceti e castagneti, in particolare sui versanti a maggior pendenza. Alle quote più basse le aree coltivate sono spesso intervallate dai vigneti ed è frequente la copertura boschiva sui versanti più ripidi e nelle zone di abbandono dei coltivi. La morfologia del rilievo è influenzata sia dai movimenti tettonici che dall'azione erosiva e corrosiva delle acque meteoriche. Essendo l'area della Lessinia costituita prevalentemente da litotipi calcarei, l'elevata permeabilità delle rocce comporta la quasi completa assenza di idrografia superficiale (Regione Veneto 2013).

L'area di pianura invece contrappone le aree rurali dell'entroterra veronese alle zone densamente popolate ed urbanizzate nell'intorno della città di Verona o di altri centri urbani del territorio. Nelle aree non ancora compromesse dall'espansione urbana rivestono notevole importanza le colture seminative, orticole e i frutteti (Regione Veneto 2013).

2.6.3 Classificazione morfologica della dimensione frattale in rapporto alla pendenza

Una mappa delle pendenze è stata generata dal DTM "c0103014_DTM25". Da questa mappa, mediante la funzione "clip" di QGIS, con un *file* vettoriale che identifica le coordinate del territorio oggetto di studio, è stata selezionata l'area campione.

Con il metodo analogo a quello descritto per le quote in precedenza (al paragrafo 2.6.1), l'area campionata è stata suddivisa in sei *layer* vettoriali rappresentanti da diverse fasce di pendenze (Figura 2.10).

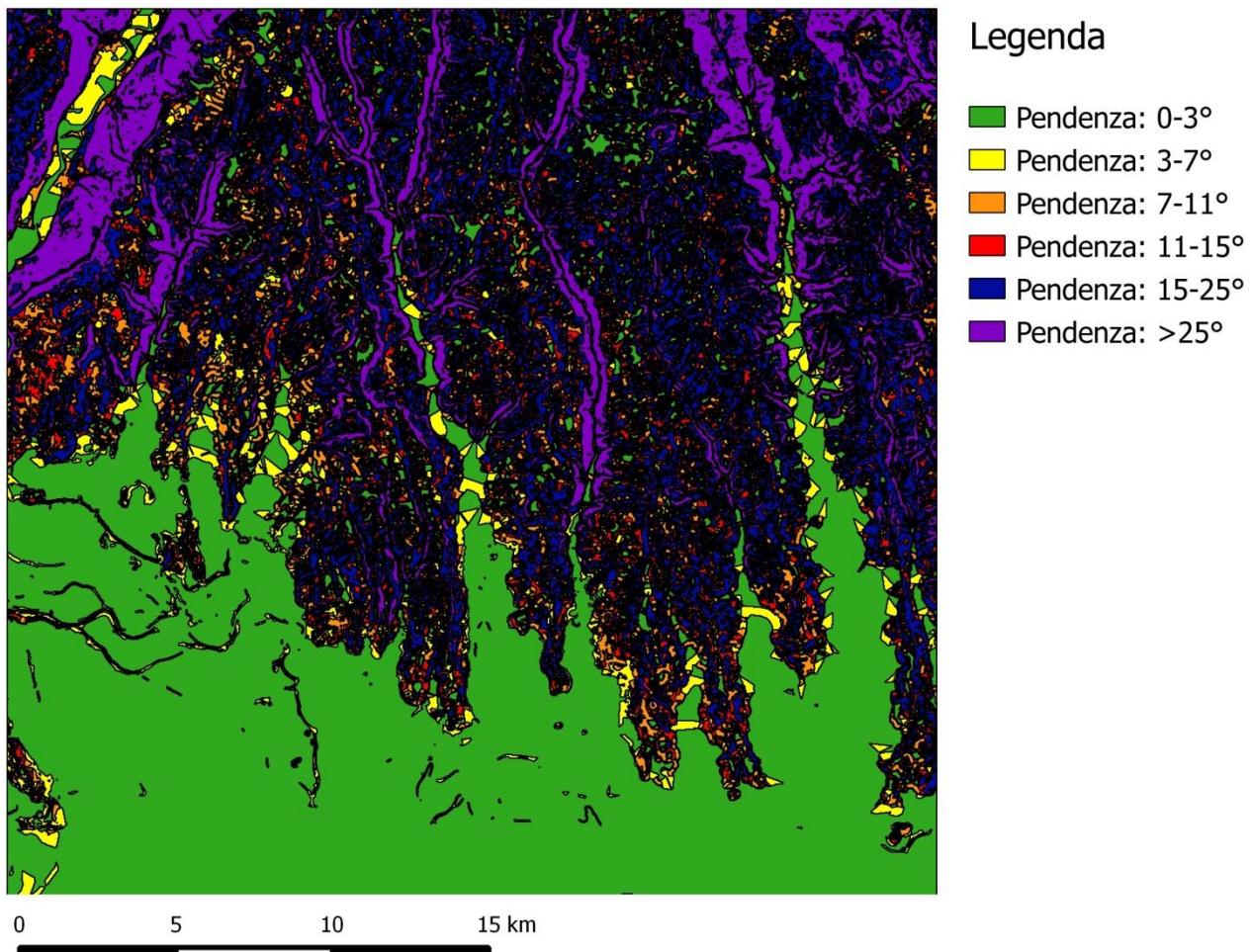


Figura 2.10 Ripartizione in layer vettoriali che identificano sei diverse fasce di pendenza: 0-3°, 3-7°, 7-11°, 11-15°, 15-25° e >25°.

Le fasce di pendenza sono state scelte in relazione all'idoneità dei suoli per uso agricolo, secondo la classificazione proposta in tabella 2.2.

Tabella 2.2 Classi di pendenza in relazione alla fruibilità agricola dei suoli (Orshoven et al. 2012)

Classi di pendenza in accordo con Bibby e Mackney, 1969.				
Pendenza (gradi)	Pendenza percentuale	Classi di pendenza	Problemi	Espressione calcolatore raster
0-3	0-5,2	Leggera pendenza	Nessuno	"c0103014_DTM25@1" <= 3
3-7	5,2-12,3	Moderata pendenza	Difficoltà nell'utilizzo di estirpatori, seminatrici di precisione e di alcune mietitrici meccaniche per coltivazioni	"c0103014_DTM25@1" > 3 AND "c0103014_DTM25@1" <= 7
7-11	12,3-19,4	Elevata pendenza	Uso limitato della mietitrebbia	"c0103014_DTM25@1" > 7 AND "c0103014_DTM25@1" <= 11
11-15	19,4-26,8	Moderata acclività	Uso limitato della mietitrebbia e dell'aratura bidirezionale (in dipendenza della configurazione del campo)	"c0103014_DTM25@1" > 11 AND "c0103014_DTM25@1" <= 15
15-25	26,8-46,6	Elevata acclività	Non adatto per coltivazioni che necessitano di aratura, essendo le pendenze oltre i 20° difficili da arare, da trattare con calce o fertilizzare	"c0103014_DTM25@1" > 15 AND "c0103014_DTM25@1" <= 25
>25	>46,6	Acclività molto elevata	Frequenti movimenti in massa, presenza tracce di animali sui versanti, impossibilità nell'utilizzo di macchine agricole senza strumentazione specializzata	"c0103014_DTM25@1" > 25

In seguito sono stati costruiti i raster della dimensione frattale, ritagliati mediante i vettori delle fasce di pendenza, a partire dalla mappa frattale del Veneto. Questa è stata precedentemente generata impiegando il modulo "TEXTURE" del software IDRISI a partire dal DEM "c0103014_DTM25". Per ridurre la variabilità legata al fatto che la correlazione pendenza-

dimensione frattale non è perfetta (ossia pari a 1), per ciascuno dei sei raster che identificano le diverse classi di pendenza, è stata calcolata la moda su *kernel* di dimensione 7x7 utilizzando il modulo "r.neighbors". In questo modo è stato possibile calcolare le statistiche univariate (Tabella 2.3), utilizzando il modulo "r.univar" di GRASS, sui valori più frequenti e rappresentativi della dimensione frattale di ciascuna classe di pendenza. .

Tabella 2.3 Statistiche calcolate col modulo di GRASS "r.univar" per comprendere la variabilità frattale in relazione alla pendenza.

Ripartizione per fasce di pendenza	Area con pendenza 0-3 gradi	Area con pendenza 3-7 gradi	Area con pendenza 7-11 gradi	Area con pendenza 11-15 gradi	Area con pendenza 15-25 gradi	Area con pendenza > 25 gradi
Minimo	2	2	2	2	2	2.00005
Massimo	2.01641	2.01427	2.0347	2.03608	2.05745	2.16004
Range	0.0164094	0.0142746	0.0346951	0.0360785	0.0574527	0.159996
Media	2.00004	2.00071	2.00324	2.00731	2.01368	2.03833

Sulla base di queste statistiche si possono trarre una serie di conclusioni per l'area in esame. Per pendenze inferiori a 15°, la dimensione frattale media è inferiore a 2,01. Si evidenzia un trend ascendente della dimensione frattale con la pendenza, dimostrando però che i valori più alti sono solo legati alla variabilità locale mentre il trend generale mantiene valori prossimi a 2. Dall'istogramma in figura 2.11, che rappresenta la variabilità frattale complessiva per l'area di studio, è evidente che le frequenze maggiori dei pixel si riscontrano per valori di dimensione frattale inferiori a 2,1.

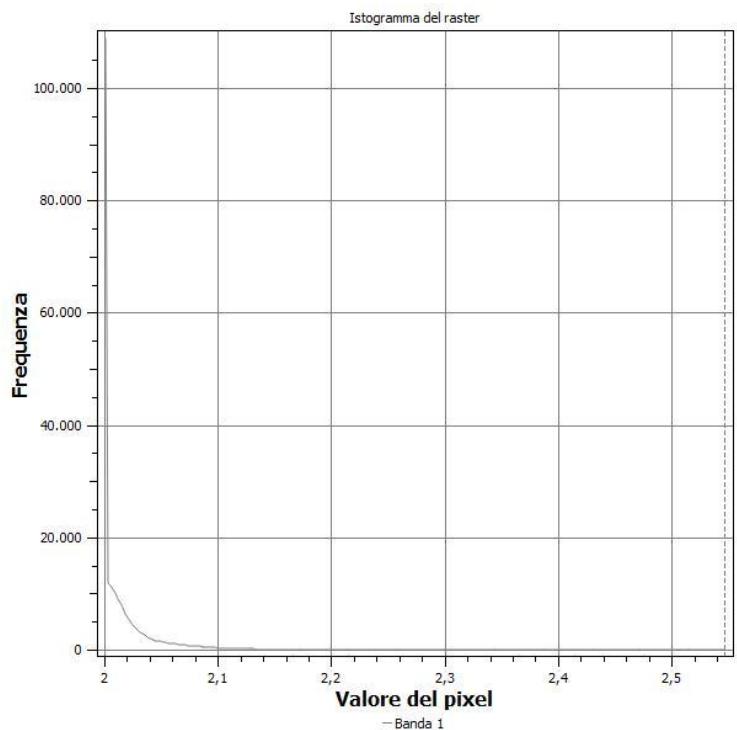


Figura 2.11 Istogramma della variabilità frattale nell'intera area di studio.

2.7 Decomposizione di una superficie topografica nel dominio delle frequenze

Si è già discusso della funzione della trasformata di Fourier nel paragrafo 2.3.1, per generare paesaggi a frattali col modulo "r.surf.fractal" di GRASS. Questa però può essere impiegata anche come strumento di analisi delle immagini. La 2D FFT può essere impiegata per scomporre una qualsiasi immagine raster nel dominio delle frequenze: la procedura consiste del calcolo di una funzione complessa (serie di Fourier) data dalla sommatoria delle componenti seno e coseno per ogni punto del raster originale. Queste componenti definiscono le nuove coordinate delle immagini generate nel dominio delle frequenze (Eastman 2009).

La 2D FFT permette quindi di scomporre una superficie topografica nelle sue singole componenti a differenti scale ed è utilizzata anche per caratterizzare i fenomeni che hanno prodotto tale superficie, nonostante ve ne siano alcuni non dipendenti dalla scala e dunque non correlati alle alte o basse frequenze. In ogni caso l'FFT si configura come un utile strumento di analisi per comprendere la struttura gerarchica delle componenti di un territorio (Florinsky 2012).

Il *plug in* GRASS di QGIS offre la possibilità di utilizzare i moduli "i.fft" per calcolare la 2D FFT e il modulo "i.ifft" per calcolare l'antitrasformata. L'output del primo modulo consiste di due mappe raster che includono reciprocamente le componenti reale (componenti coseno della serie di Fourier) e immaginaria (componenti seno della serie di Fourier) della trasformata. Il modulo "i.ifft" invece permette di ricostruire il raster originale a partire dalle due immagini precedentemente generate col modulo "i.fft". Qualsiasi alterazione di questi raster pregiudica la possibilità di utilizzare l'antitrasformata per riottenere il raster originale. L'unica alterazione ammessa consiste nella rimozione di una o più porzioni di frequenze, applicando il modulo "i.ifft" dopo aver generato una maschera che identifica le frequenze utili [9] (Eastman 2009).

In figura 2.12 sono riportati gli istogrammi per le immagini raster delle componenti reale e immaginaria del DEM utilizzato (derivato dal DEM "c0103014_DTM25").

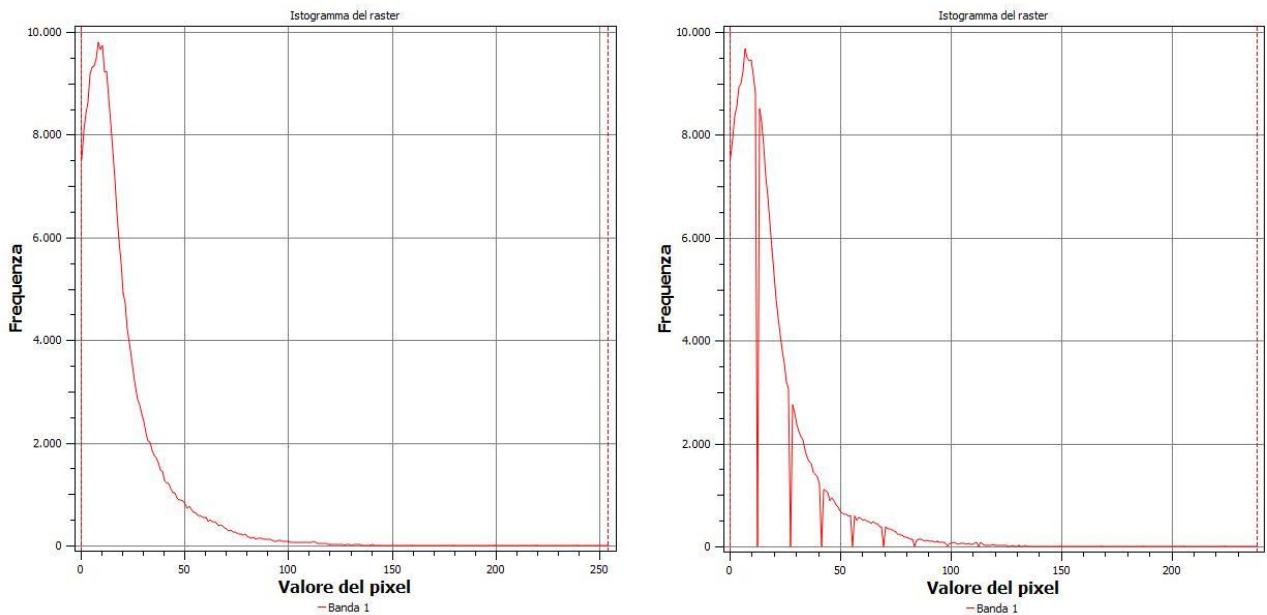


Figura 2.12 Istogrammi delle componenti reale (sinistra) e immaginaria (destra) delle immagini raster generate col modulo "i.fft" di GRASS. "Frequenza" indica il numero di pixel che nel raster assume lo stesso valore e non rappresenta la frequenza spaziale di queste componenti.

Nelle immagini raster i valori associati alle basse frequenze sono localizzati in prossimità del centro del raster mentre i valori che corrispondono a più alte frequenze sono allocati via via verso i bordi dell'immagine [9]. Le basse frequenze rappresentano le morfologie a piccola scala e le pendenze medie, mentre le alte frequenze rappresentano il micro-rilievo locale e sono più spesso associate a valori estremi di pendenza.

Quest'interpretazione è valida per la decomposizione dei DEM nel dominio delle frequenze (Toth et al. 2014).

Il software IDRISI, nell'applicare l'FFT, oltre ai raster forniti dai moduli di GRASS, genera come output anche una terza immagine definita "*power image*" (Figura 2.13), che permette il confronto dello spettro di potenza per unità di frequenza (Eastman 2009).

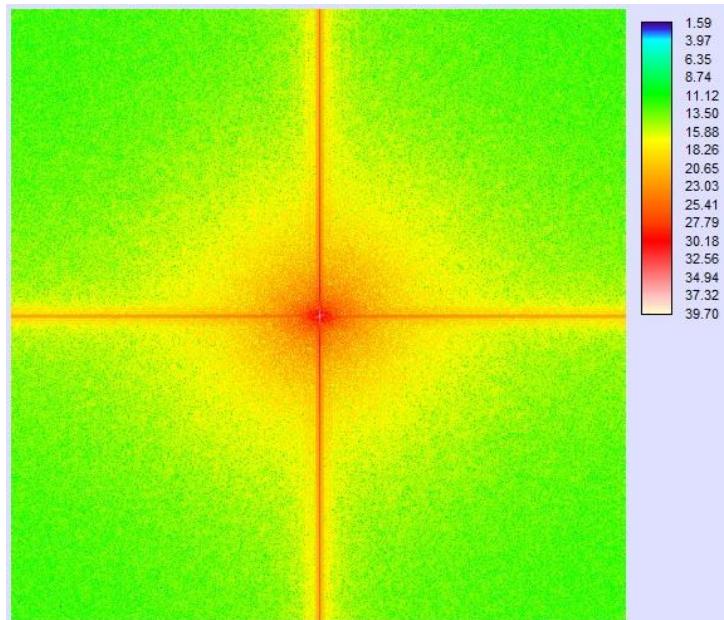


Figura 2.13 Immagine dello spettro di potenza del DEM utilizzato ("c0103014_DTM25")

2.8 Territori virtuali per la costruzione di scenari previsionali

La generazione di paesaggi virtuali è finalizzata alla capacità di utilizzarli come laboratori sperimentali nei quali testare modelli connessi ai cambiamenti climatici e degli usi del suoli. Alla costruzione del paesaggio virtuale seguirà quindi un esempio applicativo, basato su uno fra i modelli più utilizzati per la stima dell'erosione superficiale: il modello RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*).

2.8.1 RUSLE

Uno dei principali problemi ambientali riconosciuti nell'ambito del Settimo Programma d'Azione per l'Ambiente della Comunità Europea è la degradazione dei suoli per erosione idrica superficiale (EU 2014). Per erosione del suolo si intende il processo di rimozione e trascinamento di materiale dalla parte superficiale di un sedimento incoerente. L'erosione è un fenomeno naturale che dipende da molteplici fattori: fattori energetici (precipitazioni, deflusso superficiale, pendenza e lunghezza dei versanti), fattori di resistenza dipendenti dalle caratteristiche dei suoli (ad esempio tessitura, struttura, sostanza organica, salinità) e fattori antropici (uso dei suoli, attività agricole). Pertanto le precipitazioni rappresentano l'agente erosivo più importante ma il fenomeno è largamente dipendente dalla topografia, dalla copertura del suolo e dal clima (Bosco and Olivieri 2008).

La perdita dei suoli per degradazione prodotta dall'erosione si riscontra in particolare nelle aree fortemente alterate dall'azione umana, come conseguenza di pratiche agricole non sostenibili, deforestazione, sovrasfruttamento del pascolo e attività di costruzione (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000). L'azione umana può quindi favorire questo fenomeno ed è anche una forzante del cambiamento climatico (come descritto al paragrafo 1.1), il quale può aggravare a sua volta i processi erosivi. Attualmente più del 25% del territorio dell'Unione Europea è soggetto a degradazione dei suoli per erosione idrica, con conseguenze per la loro funzionalità e per la qualità delle acque dolci. L'OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*) stima che la progressiva degradazione dei suoli potrebbe compromettere due secoli di incremento degli standard di vita e determinare un aumento significativo dei costi (EU 2014).

L'erosione può produrre impatti a diverse scale spaziali: ad esempio può essere compromessa la fertilità di un suolo a scala locale, ma il processo erosivo, a scala più ampia, può determinare il trasporto di quantitativi di materiale tali da deviare il corso di un corpo idrico. Sono stati quindi

sviluppati diversi metodi per stimare l'impatto dell'erosione a diverse scale, sia dal punto di vista ingegneristico-ambientale che economico:

- metodologie di analisi qualitative si basano sull'osservazione delle forme erosive nell'ambito della foto-interpretazione e sulla base della cartografia disponibile;
- metodologie di analisi semiquantitative si basano sull'attribuzione di punteggi, ad opera di esperti, per quantificare il peso dei fattori che determinano l'erosione in proporzione alla loro importanza relativa nei processi erosivi;
- metodologie di analisi quantitative si basano sulla parametrizzazione dei fattori che determinano l'erosione (Bosco and Olivieri 2008).

In quest'ultimo gruppo rientrano i modelli empirici, che si basano su osservazioni e relazioni statistiche stabilite a partire dall'analisi di dati sperimentali (Bosco and Olivieri 2008). I più importanti modelli empirici sviluppati per stimare quantitativamente l'erosione dei suoli sono i modelli USLE (*Universal Soil Loss Equation*) di Wischmeier e Smith (1978) e RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*). La revisione del modello USLE nel 1987 ha portato allo sviluppo del modello RUSLE. Entrambi questi modelli si basano su equazioni che stimano quantitativamente la perdita di suolo in tonnellate per ettaro per anno, dovuta ad erosione superficiale per impatto delle acque meteoriche, per deflusso laminare e per rigagnoli. I modelli USLE e RUSLE condividono la stessa struttura di base ma il secondo è stato rivisto e migliorato per determinare i fattori d'erosione sfruttando le potenzialità offerte dai software GIS. Il modello RUSLE si basa sulla seguente equazione (Bosco and Olivieri 2008):

$$A = R * K * LS * C * P$$

con:

- A = perdita di suolo annuo per unità di superficie ($t/ha * yr$);
- R = fattore di erosività delle precipitazioni ($Mj * mm/ha * h * yr$);
- K = fattore di erodibilità dei suoli ($t * ha * h/ha * Mj * mm$);
- LS = fattore lunghezza-pendenza (adimensionale);
- C = fattore di copertura vegetale e del suolo (adimensionale);
- P = misure di controllo per prevenire l'erosione (adimensionale).

2.8.1.1 Fattore R

Il fattore R definisce l'influenza del clima sui fenomeni erosivi, unita all'effetto dell'azione meccanica delle precipitazioni, del deflusso superficiale sia laminare che per rigagnoli (Bosco and Olivieri 2008).

Per calcolare il fattore R sono disponibili diverse procedure. La procedura proposta da Wischmeier e Smith si basa sulla sommatoria, per ogni evento di precipitazione, del prodotto dell'energia cinetica per la massima intensità raggiunta in un intervallo di 30 minuti (Bosco and Olivieri 2008):

$$R = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n \left[\sum_{K=1}^{m_n} (E)_k * (I_{30})_k \right]$$

con:

n = numero di anni;

mm = numero di eventi meteorici nel range temporale (n) considerato;

EI₃₀ = prodotto delle energia cinetica associata ad un singolo evento meteorico (E), per la massima intensità raggiunta nell'intervallo di 30 minuti (I₃₀).

Vista la frequente scarsa disponibilità di dati pluviometrici con una risoluzione temporale estesa al singolo evento meteorico, sono state sviluppate altre equazioni semplificate per calcolare il fattore R a partire dalle precipitazioni annuali medie (P) nel periodo di tempo (n anni) (Bosco and Olivieri 2008):

$$P = \sum_{i=1}^n p_i / n$$

con:

- n = numero di anni;
- p_i = precipitazioni nell'i-esimo anno (mm).

Sulla base dei dati disponibili per la Regione Veneto, Bosco ed Olivieri (2008) hanno effettuato un'analisi di correlazione per confrontare le stime dei fattori R calcolati con le numerose equazioni disponibili in letteratura, basate sui regimi di precipitazione annuali, rispetto alla stima più accurata basata sull'equazione di Wischmeier and Smith, descritta in precedenza. Le equazioni proposte da Lo et al. (1985) e da Ferrari et al. (linear) (2005) sono le equazioni semplificate che risultano avere il maggior grado di correlazione con i risultati ottenuti dall'equazione di Wischmeier and Smith, per l'area oggetto di studio (Bosco and Olivieri 2008):

$$R = [38,46 * (3,48 * P)] \quad (\text{Lo et al. 1985})$$

$$R = [(4,0412 * P) - 965,53] \quad (\text{Ferrari et al. 2005})$$

2.8.1.2 Fattore K

Il fattore K (o fattore di erodibilità del suolo) definisce la tendenza di un suolo ad essere erosivo ad opera di agenti erosivi. Questo fattore è strettamente correlato alle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo: tessitura, struttura, permeabilità e contenuto di materia organica. Queste informazioni, anche a grande scala, spesso non sono disponibili, in contrapposizione alla crescente necessità di impiegare modelli empirici per stimare la perdita di suolo agricolo per processi erosivi.

Romkens et al. (1986) sulla base di una regressione condotta su un ampio *dataset* globale di valori del fattore K, ha prodotto la seguente equazione (rivista da Renard et al. (1997)):

$$K = 0,0034 + 0,0405 * \exp \left[-0,5 * \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]$$

con:

$$D_g = \exp \left[\sum f_i * \ln \left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) \right]$$

dove:

- D_g è il diametro medio pesato rispetto alle classi tessiturali dominanti (mm);
- d_i è il diametro massimo per ciascuna classe tessitrale (sabbia, limo e argilla) (mm);

- d_{i-1} è il diametro minimo per ciascuna classe tessiturale (mm);
- f_i è la frazione di ciascuna classe tessiturale.

2.8.1.3 Fattore LS

Il fattore LS (o *length-slope*) rappresenta l'area nella quale il runoff superficiale diverge o converge e definisce *l'Upslope Contributing Area* (UCA). Se il modello RUSLE è applicato in ambiente GIS, l'UCA rappresenta la direzione di flusso dell'acqua nell'area di un pixel.

Il fattore LS viene calcolato con la seguente equazione (Bosco and Olivieri 2008):

$$LS = \left(\frac{A}{22,13} \right)^m * \left(\frac{\sin \alpha}{0,0896} \right)^n$$

con:

- A = area di drenaggio del punto appartenente ad un certo pixel;
- α = pendenza;
- m = definito pari a 0,4 per convenzione da molti ricercatori;
- n = definito pari a 1,3 per convenzione da molti ricercatori.

Bosco e Olivieri (2008) hanno modificato quest'equazione per poter ottenere risultati migliori, in particolare per superfici che presentano un'elevata complessità topografica ed un'alta variabilità spaziale delle pendenze. L'equazione, applicabile in ambiente GIS, è la seguente:

$$LS = \left(\frac{Flowacc * cell_size}{22,13} \right)^{0,4} * \left(-1,5 + \frac{17}{1 + e^{2,3 - 6,1 * \sin \alpha}} \right)$$

con:

- Flowacc = flusso di accumulo, ovvero l'UCA (il numero di pixel tramite i quali l'acqua defluisce nell'area di preciso pixel);
- cell_size = dimensione del pixel;
- α = pendenza.

2.8.1.4 Fattore C

La copertura vegetale è una caratteristica molto importante per il controllo dell'erosione e, nell'equazione RUSLE, è incorporata nel fattore C, definito fattore di copertura vegetale e del suolo (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000). Il fattore C è dato dal rapporto tra la perdita di suolo in precise condizioni di copertura e l'erosione che si verificherebbe su un terreno privo di qualsiasi protezione. È il fattore più difficile da valutare in quanto può dipendere da molte variabili: cambiamenti ambientali, delle coltivazioni e delle attività agricole, alterazioni dovute al cambiamento degli usi del suolo per le attività umane e il naturale cambiamento della morfologia delle specie vegetali durante l'anno e nel corso della vita di queste (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000). Bosco e Olivieri (2008), a partire dai dati di copertura del suolo Corine Land Cover 2000 [10] e 1990 (per la copertura del suolo della Svizzera) [11], hanno attribuito i valori del fattore C per ciascuna delle 44 classi di copertura riconosciute, sulla base dei dati disponibili in letteratura.

Un metodo alternativo consiste nell'impiego di immagini satellitari ottenute mediante sensori AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Sono sensori passivi multicanale, in grado di produrre immagini satellitari ad altissima risoluzione dalla sovrapposizione delle informazioni registrate da 4 (AVHRR/1) o 5 (AVHRR/2) bande spettrali (canali). Queste bande sono incluse nell'intervallo spettrale compreso fra il visibile e il lontano infrarosso (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000).

Il fattore C si stima a partire dall'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*):

$$NDVI = \frac{(AVHRR2 - AVHRR1)}{(AVHRR2 + AVHRR1)}$$

con:

- AVHRR1 = valore di riflettanza del canale 1 (visibile).
- AVHRR2 = valore di riflettanza del canale 2 (vicino infrarosso).

L'indice NDVI può variare fra 1 e -1 ed è correlato positivamente con la copertura vegetale (verde). Bassi valori di NDVI sono associati ai corpi idrici, al suolo nudo e alle aree urbanizzate.

Il fattore C è quindi calcolato mediante la seguente equazione (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000):

$$C = \exp \left[-\alpha * \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right]$$

con

- α e β = parametri che definiscono la forma della curva NDVI-C (van der Knijff et al. (2000) affermano che per valori di α pari a 2 e β pari a 1, si ottengono risultati soddisfacenti).

L'utilizzo di questo metodo, in Italia, può fornire valori del fattore C troppo alti per aree boschive e praterie (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000). Per queste classi di copertura del suolo è quindi necessario attribuire dei valori in modo analogo a quanto fatto da Bosco e Olivieri (2008).

2.8.1.5 Fattore P

Il fattore P rappresenta le misure di controllo per prevenire l'erosione superficiale ed è un coefficiente adimensionale compreso fra 0 e 1. Include pratiche di gestione dei suoli quali terrazzamenti, drenaggio sub-superficiale, coltivazione secondo le linee di livello (*contouring*) e a strisce interrotte (*stripcropping*) (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000).

3 Procedure per la generazione di superfici frattali per la riproduzione delle caratteristiche morfologiche di un territorio

3.1 Generazione di paesaggi monofrattali con r.surf.fractal

Per loro natura, le superfici monofrattali presentano dimensione frattale costante: frequenza spaziale e ampiezza variano in modo costante con la scala e pertanto non è possibile costruire paesaggi eterogenei. Il metodo presenta la possibilità di generare paesaggi con rugosità variabile assemblando, in ambiente GIS, dei DEM generati imponendo una dimensione frattale diversa, di volta in volta.

Con il modulo "r.surf.fractal" di GRASS (il cui funzionamento è descritto al paragrafo 2.3.1) sono stati generati sei DEM con dimensione frattale rispettivamente pari alla media per le fasce di pendenza riportate in tabella 2.3. Non vi è un modo univoco per definire la procedura per ripartire la dimensione frattale di un DEM. In questo caso, considerando l'alta correlazione fra dimensione frattale e pendenza, è stata scelta una ripartizione per classi di pendenza in rapporto alla fruibilità agricola dei suoli (Tabella 2.2).

Il primo punto generato dal modulo di GRASS per generare una superficie è casuale. Questo è il motivo per cui ogni superficie prodotta è diversa, anche a parità di dimensione frattale. È quindi consigliabile provare a generare più volte tali superfici, per ottenere il miglior accordo tra le morfologie dei diversi DEM.

I valori dei pixel delle superfici generate oscillano intorno al valore di quota 0. Per ottenere gradienti di quota positivi è quindi necessario sommare ai valori di ciascun DEM una quantità pari al valore più grande e negativo dello stesso.

Il modulo "r.surf.fractal" genera le superfici alla medesime coordinate. Il risultato è che queste risultano sovrapposte. Al fine di disporre le superfici in una sequenza ordinata, per assemblarle in un unico *file raster*, sono state effettuate una serie di operazioni nell'ambiente QGIS e nel *plug in* GRASS. Nel caso specifico le superfici generate erano comprese fra le coordinate:

- angolo sud-ovest: $x = -1,73$ e $y = -1$;
- angolo nord-est: $x = 1,73$ e $y = 1$;

nel sistema di riferimento "Monte Mario / Italy zone 1" (EPSG: 3003).

I sei DEM generati sono stati vettorizzati mediante lo strumento "poligonizzazione" di QGIS (shapefile contenenti elementi puntuali) e traslati nell'asse y del sistema di coordinate cartesiane di una quantità incrementale definita, mediante il modulo "v.transform". Il DEM in formato vettoriale con dimensione frattale minore non è stato traslato. Gli altri sono stati traslati, da quello con dimensione frattale minore a quello con dimensione frattale maggiore, di 2, 4, 6, 8 e 10 punti, sull'asse y.

I sei *file* vettoriali sono stati fusi in un unico shapefile mediante la funzione di QGIS "Unisci shapefile" alla voce "Strumenti di gestione dati".

Si è potuto quindi procedere alla costruzione del raster finale mediante una procedura di interpolazione. In questo caso è stata usata un'interpolazione *spline* regolarizzata con tensione basata su punti vettoriali. Si tratta del tipo di interpolazione più generale e accurato, disponibile in GRASS. È il metodo migliore per interpolare dati ad una risoluzione significativamente diversa o per dati che presentano grandi *gap* (in questo caso, la differenza fra i punti quotati ai confini delle singole superfici assemblate). Principalmente è necessario selezionare il campo di attributi del *file* vettoriale relativo alle quote, la densità dei punti da utilizzare (distanza minima e massima) nell'interpolazione e il parametro tensione.

La distanza minima tra i punti definisce la densità massima, al di sotto della quale i punti vengono scartati in quanto considerati identici. La distanza massima definisce invece la minima densità oltre la quale devono essere aggiunti dei punti per costruire l'interpolazione [12].

Il parametro tensione è utile per controllare il peso dei punti nell'interpolazione: alti valori di tensione implicano un effetto limitato ai punti più vicini; bassi valori di tensione implicano un effetto maggiore anche nei punti più distanti. Per valori eccessivamente alti ogni punto genera una cuspide. All'opposto bassi valori producono una superficie di trend, smussata e con un basso livello di dettaglio [12].

Il modulo propone dei valori di *default* per effettuare l'interpolazione, sulla base della densità dei punti del *file* vettoriale di input:

- tensione = 40;
- distanza minima = 0,005998;
- distanza massima = 0,029991.

L'output del modulo "v.surf.rst" è un DEM (Figura 3.1) di risoluzione 1000 x 289.

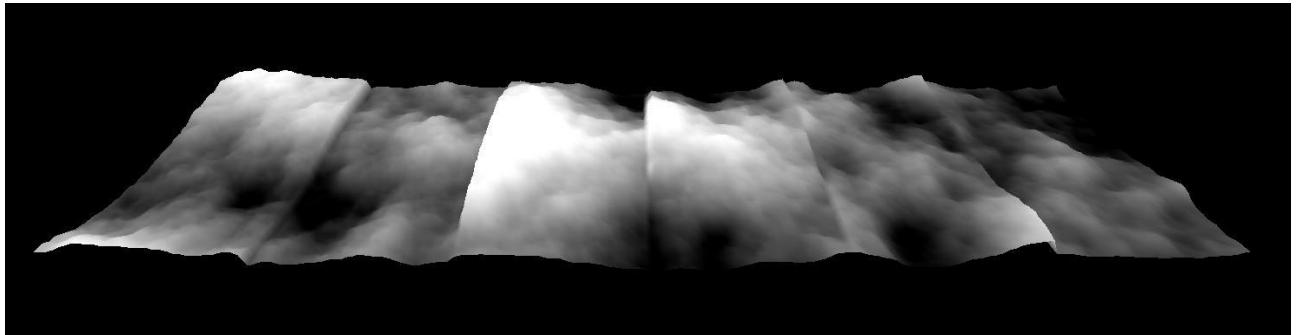


Figura 3.1 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, dei DEM costruiti con "r.surf.fractal", poligonizzati e interpolati con "v.surf.rst", utilizzando i parametri di default.

Con questi parametri l'interpolazione non riesce a ricostruire un DEM privo del dislivello fra le superfici assembrate.

Aumentando la distanza minima e massima l'interpolazione approssima la superficie con un numero minore di punti vettoriali. Per la costruzione del DEM in figura 3.1 sono stati interpolati 961109 punti su 3450000. Aumentando la distanza minima a 0,200998 e la distanza massima a 0,209991 è stato possibile generare una superficie approssimata in cui il dislivello fra le superfici è meno evidente.

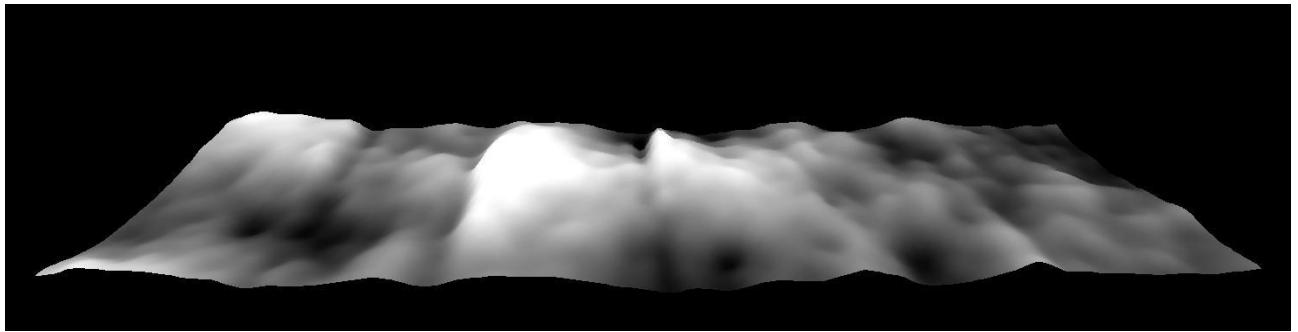


Figura 3.2 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, dei DEM costruiti con "r.surf.fractal", poligonizzati e interpolati con "v.surf.rst": superficie ottenuta riducendo la densità dei punti utilizzati nell'interpolazione.

Il DEM in figura 3.2 è stato generato interpolando 1326 punti su 3450000 del file vettoriale iniziale. Le immagini generate da "r.surf.fractal" hanno una scala verticale estremamente elevata rispetto a quella orizzontale. Per poterle visualizzare è necessario impostare un valore di "*exaggeration*" dell'ordine di 0,001 (o inferiore). Eventualmente è possibile ottenere una scala compatibile col territorio esistente (c0103014_DTM25) utilizzando lo strumento di QGIS "georeferenziatore".

3.2 Generazione di paesaggi multifrattali con Blender

I vantaggi dell'utilizzo dei multifrattali e le potenzialità offerte dal *plug in* di Blender "ANT Landscape" sono già state discusse in precedenza. Il problema principale dell'utilizzo di Blender consiste nell'elevato numero di parametri (descritti al paragrafo 2.3.3) che, dal punto di vista della modellazione 3D, conferiscono un maggior controllo sulla generazione della superficie ma, dal punto di vista modellistico, rendono complessa la definizione di una relazione quantitativa fra i parametri stessi e le caratteristiche di un territorio. In questo caso si è quindi operato un confronto a posteriori per costruire un'equazione il cui output è un valore (1 - incremento frattale), da inserire fra i parametri di Blender per generare il paesaggio virtuale.

Le superfici frattali sono state quindi generate mediante "ANT Landscape". I parametri modificati rispetto alle impostazioni di *default* sono i seguenti:

- *Subdivisions*: 1024 (la matrice risultante ha una risoluzione di 1024 x 1024, per un totale di 1048576 gruppi di coordinate x,y e z, che è anche il numero massimo di righe ammissibili in un foglio di Excel, software necessario per la conversione del *file*);
- *Basis*: perlin;
- *Type*: ridgemultifractal;
- *Random Seed*: 49 (scelta puramente soggettiva del primo punto generato);
- *Depth*: 7 (fino a 6/7 si ha un incremento significativo dei dettagli del paesaggio);
- *Dimension e Height*: rispettivamente 0,20-0,30-0,40-0,41-0,50-0,60-0,70 (H) e 0,12 (questa coppia di valori definisce la morfologia: la dimensione frattale massima può essere scelta in seguito ad un'analisi frattale del territorio da riprodurre, tuttavia il risultato è dipendente dalla scala ovvero il secondo valore);
- *Offset e Gain*: pari rispettivamente a 0,80 e 2,00 (ottimi parametri di partenza per costruire superfici realistiche)
- *Falloff*: *none*.

Le superfici generate con Blender sono esportabili in formato obj. Questo tipo di *file* contiene informazioni sulle coordinate x, y e z dei vertici di cui è composto il *mesh*. Centrando la superficie nell'origine del sistema di coordinate cartesiane e imponendo un valore di "mesh size" pari a 2,00, le coordinate x e y variano fra -1 e 1. Il *file* obj può essere aperto da un comune *editor* di testo, come Word Pad, e le colonne contenenti le coordinate dei vertici possono essere selezionate e copiate in un foglio di Excel.

Utilizzando le funzioni di Excel è possibile manipolare i dati in modo da rimuovere la lettera "v" riportata per ogni gruppo di coordinate, modificare il segno di separazione decimale e separare i gruppi di coordinate in colonne distinte. Queste modifiche sono finalizzate alla costruzione di un *file* in formato csv (*comma-separated values*), importabile in QGIS come *layer* di testo delimitato. Importando un *file* csv in QGIS è necessario assicurarsi che il software identifichi in modo corretto il segno di separazione decimale e il delimitatore e, in caso contrario, selezionare manualmente tali impostazioni. Inoltre è necessario indicare le colonne che contengono le coordinate spaziali x e y. Con questo metodo è dunque possibile produrre un *file* vettoriale i cui punti conservano l'informazione spaziale delle coordinate x, y e z che inizialmente definivano la superficie 3D nello spazio di coordinate di Blender. Rasterizzando il *file* vettoriale si ottiene un DEM di risoluzione 1024 x 1024.

A questo punto è necessario modificare la scala del DEM con gli strumenti di QGIS. Per ottenere la medesima scala orizzontale il raster è stato georiferito sull'ampiezza dell'area del DEM esistente (derivato dal DEM "c0103014_DTM25"), con lo strumento di QGIS "Georeferenziatore". Dall'istogramma del raster dell'area campione si ricava che la quota massima raggiunta dal rilievo è di 1549 m. Per ottenere la stessa scala verticale, questo valore è stato diviso per il valore massimo del DEM virtuale e il risultato è stato moltiplicato ad ogni pixel della medesima mappa, mediante lo strumento di QGIS "Calcolatore raster".

Il procedimento fin qui descritto è stato quindi eseguito per costruire sei superfici per le quali è stato fatto variare solo il parametro di Blender "Dimension": 0,20-0,30-0,40-0,50-0,60-0,70.

La tabella 3.1 riporta i valori moltiplicativi calcolati per ottenere la stessa scala verticale del DEM esistente.

Tabella 3.1 Valori moltiplicativi per ottenere la stessa scala verticale del DEM esistente

Dimension (H)	Valore moltiplicativo
0,7	17268,6734
0,6	15694,0223
0,5	14107,4681
0,4	12431,7817
0,3	11032,7635
0,2	9181,9798

Con il comando di QGIS "DEM (analisi geomorfologica)", alla voce "Analisi", per ciascuno dei sei DEM virtuali è stata generata una mappa delle pendenze, espresse in gradi. Mediante il modulo

"r.univar" sono state calcolate le statistiche univariate. Dal momento che Eastman (2009) stima la dimensione frattale locale a partire dalla pendenza e che, effettivamente, è stato evidenziato un alto grado di correlazione fra questi parametri (paragrafo 2.6.1), è stata effettuata una regressione lineare (Figura 3.3) fra valori di "Dimension" (complemento a 3 della dimensione frattale massima del multifrattale) e pendenze medie, sulla base dei dati disponibili (Tabella 3.2) calcolati dai sei paesaggi virtuali generati.

Tabella 3.2 Medie delle pendenze delle sei superfici frattali generate e relativo parametro "Dimension".

Media delle pendenze (gradi)	Dimension
9,06594	0,7
9,60801	0,6
10,29200	0,5
11,05120	0,4
12,15680	0,3
12,87800	0,2

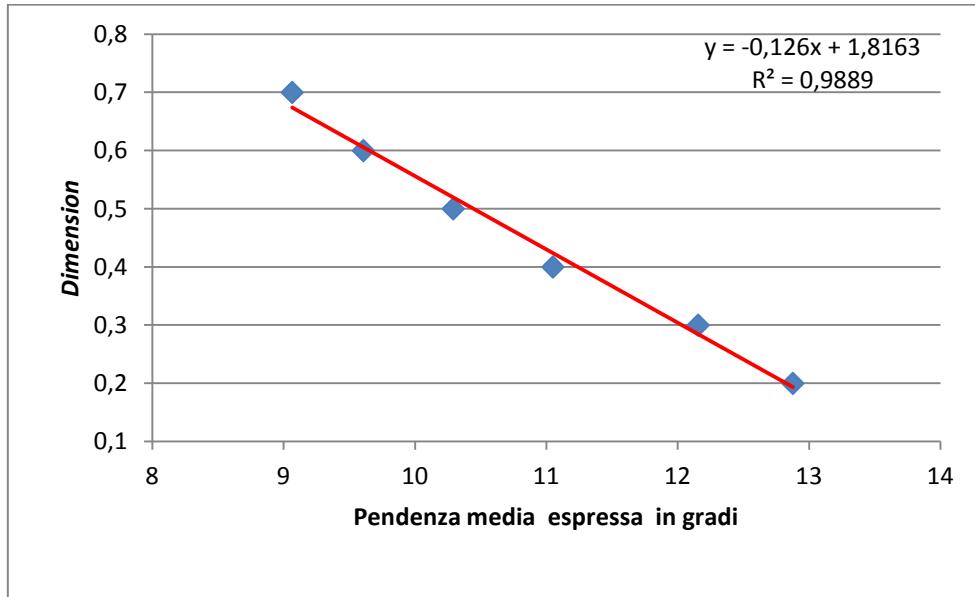


Figura 3.3 Regressione lineare dei valori medi di pendenza, calcolati sulle superfici frattali generate.

Mantenendo costanti i parametri di Blender descritti in precedenza, è quindi possibile generare un nuovo paesaggio virtuale con un definito valore di "Dimension", stimato inserendo nell'equazione della retta di regressione la pendenza media calcolata per il paesaggio esistente.

La pendenza media è quindi un mezzo pratico per definire una semplice relazione quantitativa ma la sua variabilità spaziale fra i paesaggi diversi è la causa dell'impossibilità di operare un confronto oggettivo a posteriori, fra DEM virtuale ed esistente. Viene quindi proposto un secondo approccio che si basa sulla scomposizione dei DEM nel dominio delle frequenze mediante la trasformata veloce di Fourier in 2D. In particolare, come descritto al paragrafo 2.7, il modulo "FOURIER" di IDRISI fornisce anche l'immagine raster dello spettro di potenza oltre alle immagini che rappresentano le componenti seno (immaginaria) e coseno (reale) nelle quali è scomposto il DEM originale. La 2D FFT può essere applicata solo su immagini la cui risoluzione è una potenza di 2. Diversamente la risoluzione viene modificata in automatico da QGIS o mediante il modulo "ZEROPAD" in IDRISI, aggiungendo celle di valore nullo, fino a raggiungere la potenza di 2 più vicina (separatamente per le righe e per le colonne). Alternativamente è possibile modificare la risoluzione con il modulo di GRASS "r.resample". Con il modulo "FOURIER" di IDRISI, i sei DEM virtuali e quello esistente sono stati scomposti nel dominio delle frequenze per generare i raster dello spettro di potenza. Questi possono essere interpretati nel modo seguente:

- l'informazione separata fra le componenti reale (coseno) e immaginaria (seno), è conservata nel quadrato dell'ampiezza d'onda che è lo spettro di potenza;
- il valore del pixel definisce lo spettro di potenza secondo la seguente relazione (il logaritmo naturale viene calcolato per questioni di visualizzazione a video):

$$\text{Spettro di potenza} = \ln(1 + \text{ampiezza}^2)$$

- la localizzazione di ogni pixel rispetto al punto centrale dell'immagine definisce la frequenza;
- il pixel centrale corrisponde ad una frequenza pari a zero mentre le righe e le colonne più esterne corrispondono alla massima frequenza (frequenza di Nyquist) e alla minima lunghezza d'onda (Eastman 2009).

Qualunque sia il DEM originale la 2D FFT permette di generare queste immagini, con una distribuzione dei pixel ben precisa e il cui significato è interpretabile in base a quanto scritto relativamente alle frequenze al paragrafo 2.7.

In figura 3.4 è rappresentato l'istogramma del raster dello spettro di potenza del paesaggio esistente.

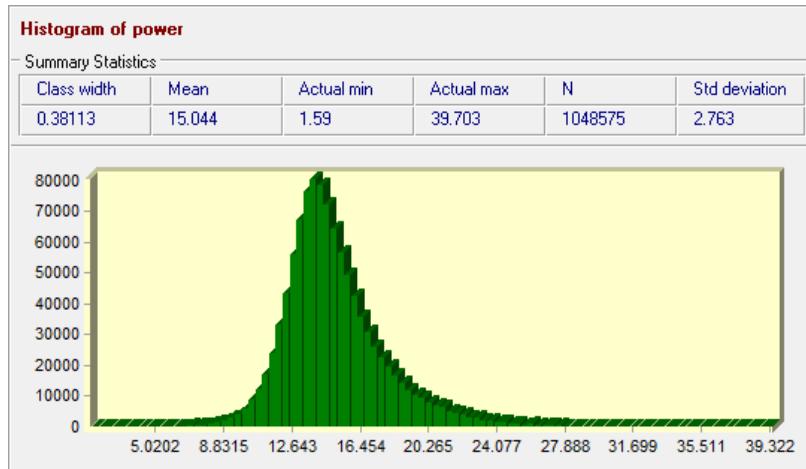


Figura 3.4 Istogramma del raster dello spettro di potenza del paesaggio esistente (i valori di frequenza sulle ordinate rappresentano il numero di volte che un pixel assume il relativo valore sulle ascisse e non vanno confusi con le frequenze nelle quali è stato decomposto il raster originale).

Considerando che i DEM virtuali e quello esistente (derivato dal DEM "c0103014_DTM25") presentano la medesima scala e risoluzione, l'ipotesi di lavoro è che il valore dei pixel degli spettri di potenza varia in una certa misura rispetto alla morfologia e dunque alla dimensione frattale. In particolare, dagli istogrammi dei sei paesaggi virtuali generati è stato riscontrato un aumento dello spettro di potenza medio con la riduzione del parametro "*Dimension*" (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 Spettro di potenza medio delle sei superfici frattali generate e relativo parametro "*Dimension*".

Spettro di potenza medio (adimensionale)	<i>Dimension</i>
14,393	0,7
14,499	0,6
14,692	0,5
14,958	0,4
15,328	0,3
15,632	0,2

Ciò significa che, a dimensioni frattali maggiori (per esempio $H = 0,2$), vi saranno mediamente un più alto numero di pixel con spettro di potenza maggiore alle diverse frequenze, dove le basse frequenze rappresentano le morfologie a piccola scala e le pendenze medie, mentre le alte frequenze rappresentano il micro-rilievo locale.

Sulla base dei dati relativi ai DEM virtuali (Tabella 3.3), è stata quindi effettuata una regressione lineare (Figura 3.5) per definire una relazione matematica in grado di legare il parametro "Dimension" allo spettro di potenza medio, dove quest'ultimo rappresenta il valor medio della distribuzione del quadrato delle ampiezze delle onde relative alle diverse frequenze.

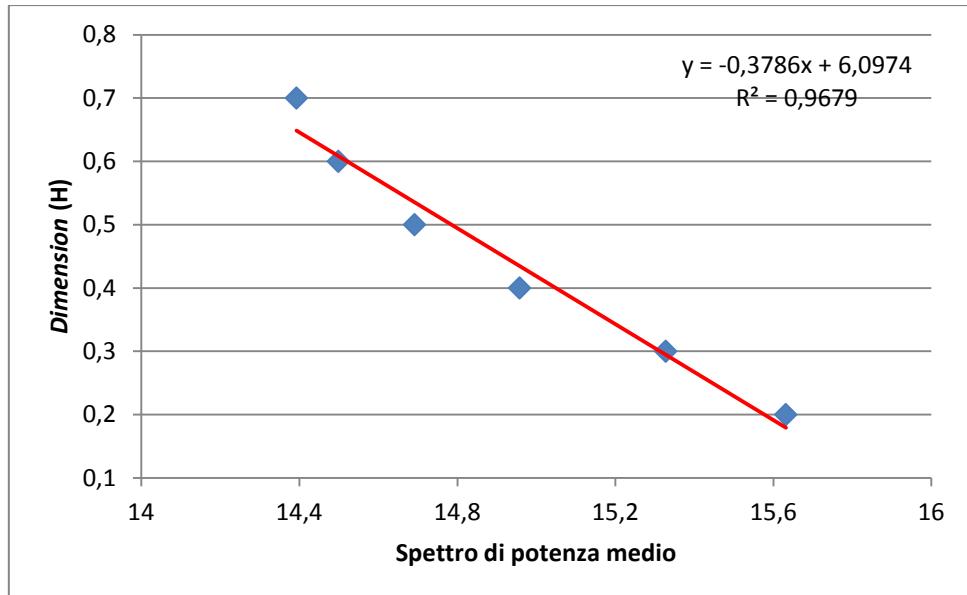


Figura 3.5 Regressione lineare dei valori dello spettro di potenza medio, calcolati sulle superfici frattali generate.

Per costruire questa relazione è stato necessario impiegare DEM che avessero la medesima risoluzione spaziale e numero di celle. Il confronto è stato effettuato fra immagini dello spettro di potenza costruite col modulo di IDRISI "FOURIER", nelle quali ogni pixel si trova ad una distanza dal centro (frequenza = 0) pari a (Eastman 2009):

$$Frequenza = \frac{(\pm \text{Distanza del pixel dal centro})}{(\text{Numero di righe o colonne}) * (\text{Risoluzione spaziale})}$$

fino alla massima frequenza (sia positiva che negativa) pari a (Eastman 2009):

$$Frequenza di Nyquist = \frac{\frac{1}{2} * (\pm \text{Numero di righe o colonne})}{(\text{Numero di righe o colonne}) * (\text{Risoluzione spaziale})}$$

Il simbolo "±" indica l'orientazione rispetto ai quattro quadranti di cui è composto il raster dello spettro di potenza (Figura 2.13). Il quadrante in alto a destra contiene soltanto le frequenze positive, gli altri invece descrivono onde per le quali almeno una dimensione, nello spazio di coordinate x e y, è negativa (Eastman 2009).

Dal momento che i pixel di ciascun raster utilizzato identificano le medesime frequenze, ciò ha permesso di costruire la regressione a partire da una sequenza di mappe che presentano una distribuzione confrontabile: qualunque sia il DEM di partenza l'immagine dello spettro di potenza dispone di una precisa distribuzione delle frequenze che rappresentano una misura dell'entità delle oscillazioni delle componenti di un territorio.

In conclusione è quindi possibile stimare il valore di "*Dimension*" (corrispondente alla dimensione frattale massima), utile in Blender per costruire un paesaggio virtuale a partire da uno esistente, calcolando la media dello spettro di potenza per quest'ultimo e inserendola nella retta di regressione (un relazione matematica stabilita sulla base dati disponibile).

Il paesaggio esistente deve però avere la stessa risoluzione dei DEM virtuali impiegati per costruire la retta di regressione o, in caso contrario, la risoluzione del DEM esistente deve essere modificata. Dalla media delle pendenze del paesaggio esistente e dalla media del suo spettro di potenza, calcolato nel dominio delle frequenze, impiegando le equazioni ottenute in precedenza dalle regressioni lineari, si può ottenere un valore di "*Dimension*" da inserire fra i parametri di input di "ANT Landscape".

Considerando la pendenza media del territorio esistente ($11,4331^\circ$ - derivato dal DEM "c0103014_DTM25") si ottiene un valore di "*Dimension*" pari a 0,38. Considerando invece solo il suo spettro di potenza medio (15,044) l'equazione fornisce un valore pari a 0,41.

Sulla base del procedimento descritto in precedenza, è stato quindi costruito un DEM con dimensione frattale massima pari a 2,59 (3 - "*Dimension*"). Il DEM virtuale è stato georiferito sull'ampiezza dell'area da riprodurre ed i valori dei pixel sono stati moltiplicati per 12728,0197, per raggiungere una scala orizzontale e verticale comparabile col DEM esistente.

Poiché la retta di regressione è stata costruita sui DEM virtuali (una base dati costruita *ad hoc*), per avere un riscontro sull'effettivo livello di successo nella riproduzione del paesaggio esistente, si possono confrontare le immagini dello spettro di potenza del DEM reale e del DEM virtuale definitivo: è possibile calcolare la radice dell'errore quadratico medio (RMSE) inteso come misura della differenza fra gli spettri di potenza dei territori virtuale ed esistente. Considerando lo spettro di potenza del territorio esistente come valori osservati e quello del territorio virtuale come valori

"stimati", l'RMSE rappresenta una misura dell'errore commesso nel tentativo di produrre virtualmente la stessa distribuzione dei valori di potenza (quindi simili oscillazioni dei rilievi nel dominio dello spazio). La sommatoria del quadrato della differenza fra spettri di potenza può essere calcolata in ambiente IDRISI con l'"*Image calculator*" e con il modulo "EXTRACT". In un foglio di calcolo di Excel, il valore ottenuto deve essere diviso per il numero di pixel e deve esserne calcolata la radice quadrata. L'RMSE dato dal confronto fra i raster è 1,83. Minore è il valore, tanto maggiore è il grado di successo del tentativo di riprodurre morfologie statisticamente simili.

Un ulteriore confronto può essere effettuato con il modulo "r.regression.line" del *plug in* GRASS di QGIS, il quale restituisce un coefficiente di correlazione di Pearson di 0.79 fra le mappe degli spettri di potenza.

La tabella 3.4 seguente riporta alcune statistiche di confronto dei DEM virtuale ed esistente, calcolate col modulo "r.univar" di GRASS.

Tabella 3.4 Tabella di confronto delle statistiche di quota e pendenza per i DEM virtuale ed esistente.

		DEM Esistente derivato da "c0103014_DTM25"	DEM Virtuale
Quote	Minima	24,1996	4,87483
	Media	398,932	453,595
	Massima	1551,74	1594,39
	Range	1527,55	1589,51
Pendenze	Minima	0	0,00444245
	Media	11,4331	11,2852
	Massima	74,3675	71,9162
	Range	74,3675	71,9118

Il DEM virtuale generato è presentato in figura 3.6.

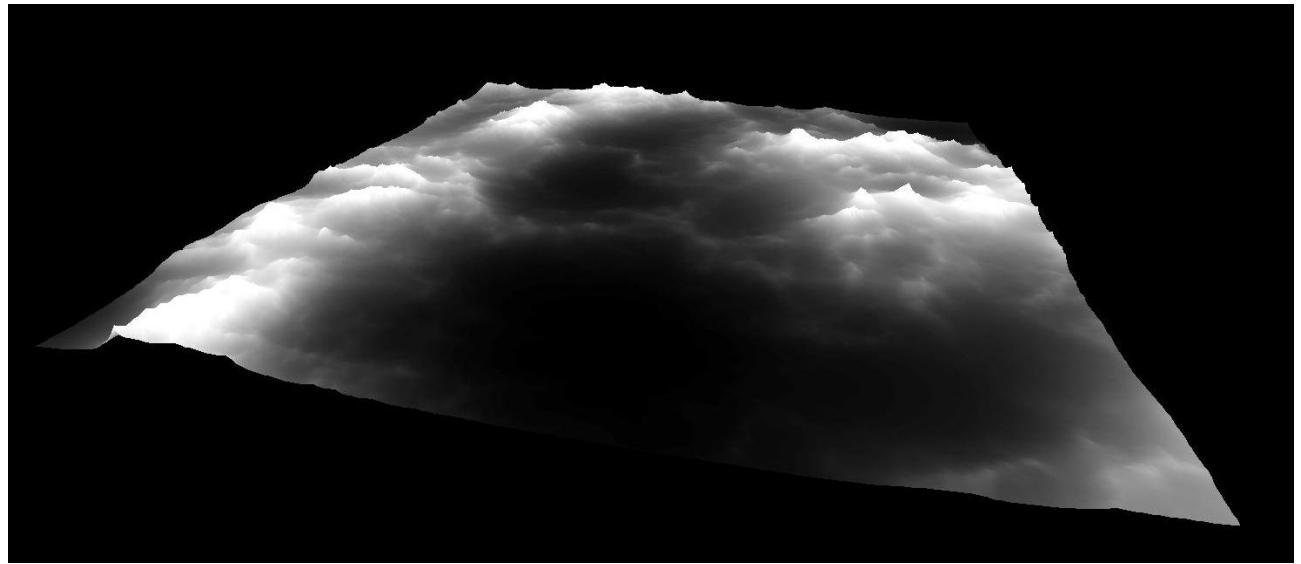


Figura 3.6 Rappresentazione 3D, in SAGA GIS, del DEM virtuale generato con "ANT Landscape" a partire dalle caratteristiche morfologiche di un DEM esistente.

4 Applicazione del modello RUSLE sul territorio virtuale

4.1 Costruzione dei *layer* raster corrispondenti ai fattori R, LS, C e K

4.1.1 Layer fattore R

Il calcolo del fattore R è stato effettuato sulla base dell'equazione proposta da Ferrari et al. (2005), a partire dai dati pluviometrici mensili (c0306010_DatiMeteo) registrati nell'arco di 19 anni (1994 - 2012) da sei stazioni di monitoraggio ambientale localizzate nei comuni di Crespadoro, Dolcé, Grezzana, Illasi, Marano di Valpolicella e San Pietro in Cariano (Tabella 4.1). Queste sei stazioni sono state selezionate in quanto sono quelle che presentano *dataset* completi nel più lungo arco temporale, fra tutte quelle situate nell'area da replicare.

Tabella 4.1 Precipitazioni annuali medie per sei stazioni di monitoraggio ambientale, localizzate nell'area da replicare.

Precipitazioni in mm/anno	Stazioni					
	Anno	Crespadoro	Dolcé	Grezzana	Illasi	Marano di Valpolicella
1994	1295,2	887,4	789,2	742,8	732,4	791,8
1995	1670,4	1281,4	890,4	1032,0	903,8	861,8
1996	1510,2	1181,0	942,8	1025,2	1062,0	979,8
1997	1242,0	877,2	707,8	727,2	661,6	634,6
1998	1116,4	861,4	731,4	853,4	759,6	708,4
1999	1548,4	1058,6	1070,8	1091,6	1042,0	1005,4
2000	1691,8	1132,0	1054,6	978,8	979,2	955,8
2001	1342,8	910,6	890,2	799,0	1033,2	881,6
2002	1958,4	1160,0	1132,4	1209,6	1310,4	1031,8
2003	1108,8	946,4	614,2	635,0	752,6	598,8
2004	1804,6	1190,6	882,8	1056,0	1101,4	872,0

2005	1362,2	905,8	889,4	1111,0	873,4	843,8
2006	1309,4	643,6	711,0	838,4	774,0	670,2
2007	1374,2	890,6	752,4	581,8	815,4	637,6
2008	2214,4	1329,4	935,6	1022,8	1153,0	891,8
2009	2205,6	1072,6	857,8	839,6	973,6	775,2
2010	2592,6	1401,0	1410,8	1319,2	1338,2	1169,0
2011	1497,4	771,2	833,4	909,0	730,0	715,8
2012	1596,4	922,2	859,0	829,6	924,8	859,8

Nelle stazione del comune di Crespadoro, localizzata nelle Prealpi a nord-est, si osservano valori delle precipitazioni medie annue significativamente maggiori rispetto a quelli delle altre stazioni. Per le aree di pianura e collina, per definire valori unici di precipitazioni medie annuali, è stata calcolata la media per le restanti stazioni, situate sulle aree collinari e pianeggianti che congiungono l'alta pianura veronese alle Prealpi (Tabella 4.2).

Tabella 4.2 Medie delle precipitazioni annuali registrate dalle stazioni di monitoraggio ambientale (esclusa quella del comune di Crespadoro).

Anno	Media delle precipitazioni annuali registrate delle stazioni di monitoraggio, per le aree di pianura e collina
1994	788,72
1995	993,88
1996	1038,16
1997	721,68
1998	782,84
1999	1053,68
2000	1020,08
2001	902,92
2002	1168,84
2003	709,4
2004	1020,56
2005	924,68
2006	727,44
2007	735,56
2008	1066,52
2009	903,76
2010	1327,64
2011	791,88
2012	879,08

L'equazione per il calcolo del fattore R richiede le precipitazioni annuali medie calcolate su un esteso arco temporale. Tale media nel periodo 1994 - 2012 si attesta a:

- 924,07 mm/anno nelle aree pianeggianti e collinari;
- 1602,2 mm/anno nelle aree montane (calcolata sui dati della stazione del comune di Crespadoro).

Il parametro R, calcolato con l'equazione di Ferrari et al. (2005), risulta pari a:

- 2768,8196 ($Mj * mm/ha * h * yr$) ;
- 5509,1530 ($Mj * mm/ha * h * yr$).

Per costruire il *layer* del fattore R (Figura 4.1), da impiegare in un ambiente GIS per l'applicazione del modello RUSLE, è possibile utilizzare il "Calcolatore raster" di QGIS, scrivendo il codice seguente:

```
(("DEM virtuale @1" < 600) * 2768.8196) + ("DEM virtuale @1" >= 600) * 5509.1530)
```

In questo modo si utilizza il DEM virtuale per attribuire i valori del fattore R in funzione delle quote.

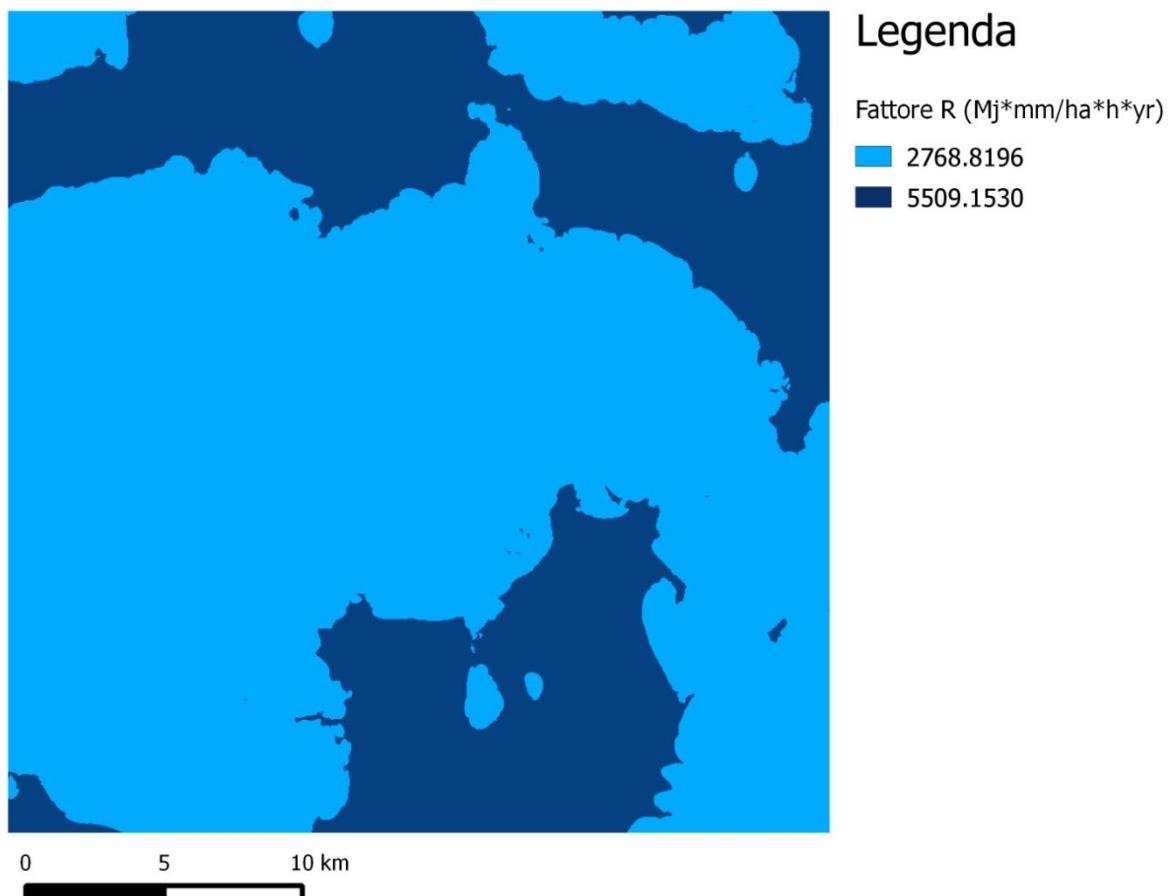


Figura 4.1 Mappa del fattore R ($Mj * mm/ha * h * yr$).

4.1.2 Layer fattore LS

Il fattore LS è stato calcolato in ambiente GIS direttamente a partire dal DEM virtuale. Mediante il modulo "r.watershed" del *plug in* GRASS di QGIS è stata prodotta la mappa che riporta, per ciascun pixel, il parametro "Flowacc", ossia l'UCA. Tale parametro è stato calcolato in modalità "*single flow direction*", considerando otto possibili direzioni di flusso per ogni pixel del DEM virtuale in input. È stato necessario impiegare la *shell* di GRASS per usare il *flag* "-a" in modo tale da ottenere solo valori di output positivi. La presenza di valori negativi è spiegata dal fatto che il flusso, per alcune regioni dell'area considerata, potrebbe essere sottostimato in quanto non verrebbe considerato il contributo delle ipotetiche aree esterne alla mappa [13]. In questo caso, il DEM virtuale generato non ha aree contigue pertanto l'UCA non viene sottostimata.

Nel modulo "r.mapcalc" è stata quindi ricostruita l'equazione descritta al paragrafo 2.8.1.3, inserendo i seguenti parametri:

- Flowacc = Mappa dell'UCA generata con il modulo "r.watershed";
- cell_size = 29,0142, dimensione dei pixel della mappa dell'UCA;
- α = Mappa delle pendenze generata a partire dal DEM virtuale.

In questo modo è stato possibile ottenere la seguente mappa del fattore LS (Figura 4.2):

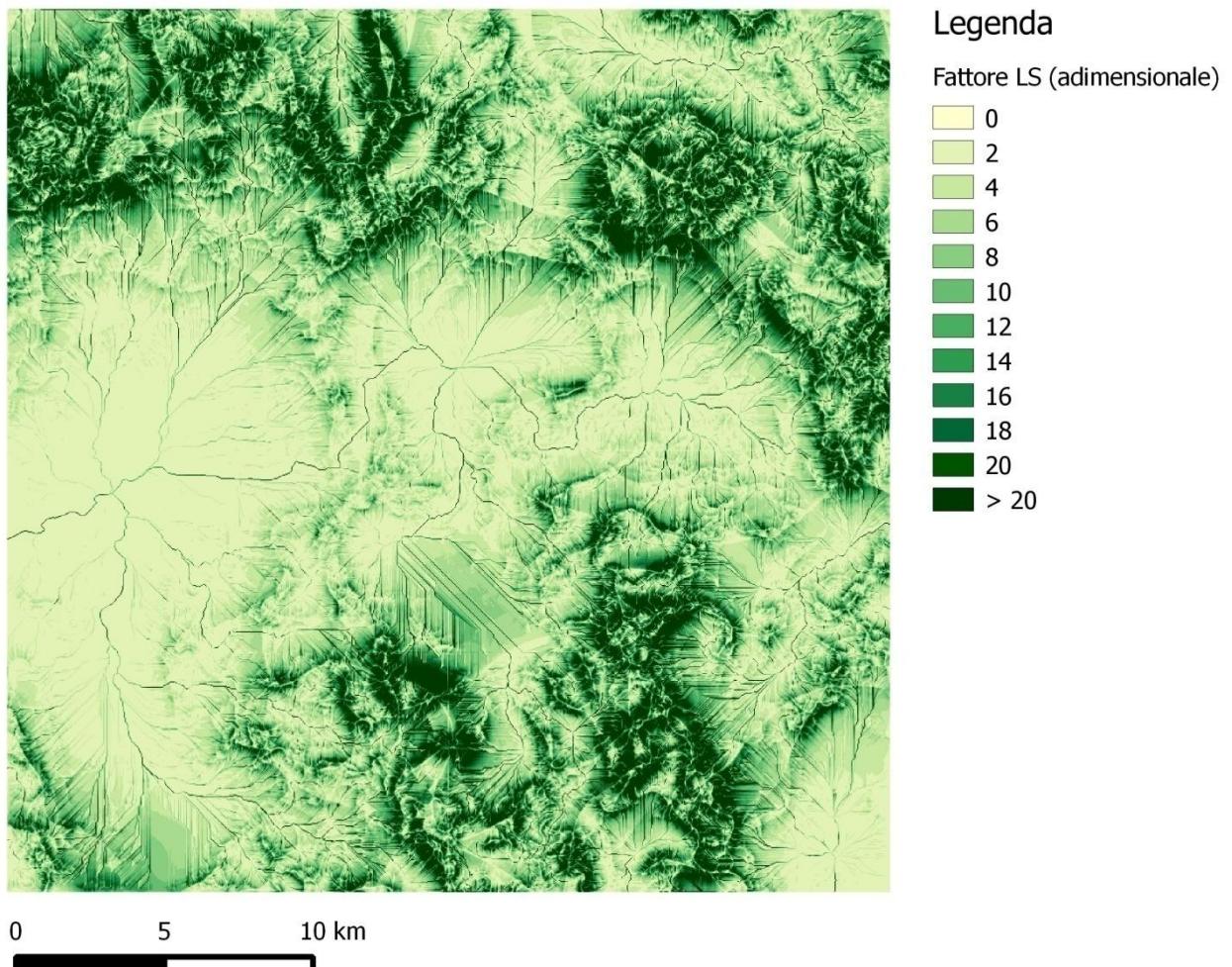


Figura 4.2 Mappa del fattore LS (adimensionale)

4.1.3 Layer fattore C

Generare una mappa del fattore C per il paesaggio virtuale rappresenta una fase critica per l'applicazione della RUSLE, dal momento che la distribuzione della copertura del suolo non dipende strettamente dalle caratteristiche fisiche del territorio. L'obiettivo iniziale, pertanto, dovrebbe essere quello di comprendere tale distribuzione nel paesaggio reale, ricercando delle relazioni topografiche che permettano in seguito la costruzione di una mappa virtuale di copertura del suolo, sulla cui base attribuire i valori del fattore C.

4.1.3.1 Analisi della distribuzione della copertura del suolo nel paesaggio esistente

L'indagine mira a ricercare una relazione spaziale tra la distribuzione della copertura del suolo nell'area in esame e le caratteristiche topografiche. In particolare, l'ipotesi di lavoro è che suoli diversi possano determinare un diverso tipo di uso del suolo. Non sempre questo è coerente con le relative attitudini e, in questa sede, non si vuole razionalizzare la dislocazione degli usi del suolo, quanto piuttosto riprodurre la distribuzione esistente in una mappa virtuale. Per far ciò, il territorio è stato classificato in unità cartografiche sulla base di criteri (Tabella 4.3) impiegati per definire le AEZ per l'agricoltura dipendente dall'acqua piovana (*rainfed*).

Tabella 4.3 Criteri e classificazione delle limitazioni usate nelle AEZ per l'agricoltura dipendente dall'acqua piovana (Eliasson 2007).

Criteri	Limitazione elevata	Limitazione significativa	Limitazione ridotta	Nessuna limitazione
LGP	< 60 giorni con clima arido e iperarido	120-190 giorni con clima secco e semi arido / 365 giorni in condizioni umide	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio
LGPt	< 120 giorni	< 180 giorni	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio
Pendenza	> 30%	16-30%	8-16%	< 8%
Profondità del suolo	< 50 cm	50-100 cm	Classe non usata per questo criterio	> 100 cm
Fertilità del suoli	Suoli con bassa fertilità naturale	Suoli con media fertilità naturale	Classe non usata per questo criterio	Suoli con alta fertilità naturale
Drenaggio del suolo	Suoli con drenaggio scarso o mediocre	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio	Suoli eccessivamente o ben drenati
Tessitura del suolo	Tessitura grossolana o pietre, massi o rocce affioranti in corrispondenza della superficie	Suoli con argille fessurate	Classe non usata per questo criterio	Suoli con tessitura media o fine
Chimica del suolo	Suoli con elevata salinità, alcalinità o limitazioni gipsiche. Suoli con fasi saline o alcaline	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio	Tutti gli altri suoli
Specifiche unità di terre	Dune sabbiose, saline, detriti di roccia, detriti in aree desertiche, ghiacciai e calotte di ghiaccio	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio	Classe non usata per questo criterio

Nei paesaggi della Lessinia e dell'alta pianura veronese si assume non vi sia variabilità climatica (esclusivamente clima temperato) e che quindi i criteri LGP ed LGPt non siano limitanti l'agricoltura *rainfed*.

Non sono state considerate le unità di terre che, per loro natura, possono rappresentare delle limitazioni: considerata la localizzazione dell'area e la quota massima dei rilievi non dovrebbero comunque esservi limitazioni specifiche.

I restanti criteri, per la loro applicazione, si basano sulle "*pedotransfert rules*" disponibili all'appendice III di uno studio condotto dalla IIASA e dalla FAO sulla metodologia AEZ [14].

In particolare, al paragrafo due sono disponibili le "*pedotransfert rules*" per la classificazione dei suoli FAO'90.

Le informazioni relative all'area in esame, necessarie per quantificare i criteri sulla cui base costruire le AEZ, sono state ottenute dalla carta dei suoli del Veneto "c0507021_CartaSuoliVeneto". Si tratta di una mappa in formato vettoriale contenente quattro livelli gerarchici (regione, provincia, sistema e sottosistema di suoli) nel quale sono organizzate le informazioni: le singole unità cartografiche costituiscono i sottosistemi di suoli e identificano specifiche associazioni di suoli nelle quali ciascuno di questi è presente secondo un certo intervallo di frequenze. I singoli suoli sono definiti secondo la classificazione WRB: è stato quindi necessario confrontare i nomi delle classificazioni WRB e FAO'90 per poter applicare i criteri della tabella 4.3 alle informazioni disponibili.

In ambiente GIS, costruire un'AEZ concretamente vuol dire generare una serie di *layer* informativi la cui sovrapposizione restituisce un codice numerico. Quest'ultimo sintetizza una sequenza di informazioni che identificano l'AEZ. Al fine di sintetizzare i *layer* informativi mediante una semplice operazione di addizione, è stato creato un codice a sei cifre (Tabella 4.4) che identifica le limitazioni imposte dai criteri in tabella 4.3.

Tabella 4.4 Tabelle che riportano i valori degli attributi (pendenza, profondità, fertilità, tessitura, drenaggio e chimica del suolo) da attribuire alle unità cartografiche della mappa dei suoli, sulla base delle loro caratteristiche fisiche e chimiche.

Attributo	Limitazione	Pendenza
100000	Nessuna	< 8°
200000	Ridotta	≥ 8° e < 16°
300000	Significativa	≥ 16° < 30°
400000	Molto elevata	≥ 30°

Attributo	Limitazione	Profondità
10000	Nessuna	>100cm (profondo)
-	Ridotta	-
20000	Significativa	50-100cm (moderatamente profondo)
30000	Molto elevata	<50cm (sottile o molto sottile)

Attributo	Limitazione	Fertilità
1000	Nessuna	Alta o moderatamente alta fertilità naturale
-	Ridotta	-
2000	Significativa	Media fertilità naturale
3000	Molto elevata	Bassa fertilità naturale

Attributo	Limitazione	Tessitura
100	Nessuna	Da moderatamente grossolana a fine
-	Ridotta	-
200	Significativa	Suoli con argille fessurate
300	Molto elevata	Grossolana o copertura in rocce e pietre

Attributo	Limitazione	Drenaggio
10	Nessuna	Buono o eccessivo
-	Ridotta	-
-	Significativa	-
20	Molto elevata	Mediocro o scarso

Attributo	Limitazione	Chimica del suolo
1	Nessuna	Tutti gli altri suoli
-	Ridotta	-
-	Significativa	-
2	Molto elevata	Suoli salini, alcalini o con limitazioni gipsiche

Per ogni suolo del sottosistema di suoli del *file* vettoriale "c0507021_CartaSuoliVeneto", è disponibile una breve descrizione delle sue caratteristiche e il suo nome secondo la classificazione WRB (nome del suolo, qualificatori e modificatori). Su questa base, a ciascun suolo sono stati attribuiti i valori in tabella 4.4 (esclusa la pendenza) (Allegato 4). Il *file* vettoriale completo dei dati per l'intera regione Veneto è stato ritagliato sull'area di interesse e, con lo strumento di QGIS "Da parti singole a parti multiple", è stato creato un *layer* vettoriale in cui ogni sottosistema di suoli identifica una serie di poligoni. Per ogni sottosistema di suoli è quindi stata fatta una sintesi delle caratteristiche dei suoli che lo compongono e queste sono state inserite nel *file* vettoriale dopo avere creato cinque nuove colonne di attributi (profondità, fertilità, tessitura, drenaggio e chimica del suolo). Questa sintesi qualitativa delle caratteristiche dei suoli di ogni unità cartografica si è resa necessaria a causa dell'impossibilità di distinguere l'uno dall'altro ed è stata effettuata sulla base delle relative frequenze: ad esempio se un suolo dotato di tessitura media o fine è presente con una frequenza del 50-75% in una unità cartografica, si assume che tale caratteristica sia dominante; nel caso in cui non vi sia una tipologia di suolo dominante sono state considerate le caratteristiche presenti contemporaneamente in diversi suoli dello stesso sottosistema (e quindi della stessa unità cartografica).

In questa fase di attribuzione dei criteri delle AEZ si evidenziano i seguenti punti:

- avendo a disposizioni solo informazioni qualitative, laddove la classificazione WRB non fornisca informazioni in merito a limitazioni dovute alla presenza di strati rocciosi (es. endoleptic, epileptic), si assume che i suoli profondi e molto profondi abbiano una profondità superiore a 100 cm, che i suoli moderatamente profondi abbiano una profondità compresa fra 50 e 100 cm e che i suoli sottili o molto sottili abbiano una profondità inferiore a 50 cm;
- relativamente alla fertilità, nell'area in esame i suoli con limitazione molto elevata sono i leptosols, gli alisols e i suoli che presentano il modificatore dystric;
- l'area in esame è zona carsica quindi il drenaggio non rappresenta una limitazione molto importante: sono presenti solo alcuni suoli con capacità di drenaggio mediocre, identificati dal qualificatore glayic (WRB);
- i suoli con limitazione tessiturale significativa sono quelli ricchi di argilla che presentano una sostanziale tendenza alla fessurazione, definiti dal qualificatore vertic (WRB);
- i suoli con limitazione tessiturale molto elevata sono i Regosols, gli Arenosols e gli altri suoli che presentano il modificatore skeletic (WRB);

- fatta eccezione per i Gleyic Endosalic Phaeozems, i suoli delle unità cartografiche BR2.2 e BR4.2 sono complessivamente descritti come significativamente alcalini anche se dalla classificazione WRB risulterebbero come semplicemente calcarei. Queste unità cartografiche sono state considerate come le sole che identificano la presenza di suoli alcalini nell'area.

Dopo aver compilato le cinque nuove colonne create nel file vettoriale dei suoli dell'area, è possibile rasterizzarlo impiegando questi attributi per costruire cinque diverse mappe raster che identificano ciascuna un criterio (profondità, fertilità, tessitura, drenaggio e chimica del suolo).

Il *layer* raster delle classi di pendenza può essere ottenuto direttamente dalla mappa delle pendenze, generata dal DEM dell'area in esame (derivato dal DEM "c0103014_DTM25"), inserendo la seguente espressione nel "Calcolatore raster" di QGIS:

$$(("Mappa_delle_pendenze@1" < 8) * 100000) + ((("Mappa_delle_pendenze @1" >= 8 AND "Mappa_delle_pendenze @1" < 16) * 200000) + ((("Mappa_delle_pendenze @1" >= 16 AND "Mappa_delle_pendenze @1" < 30) * 300000) + ((("Mappa_delle_pendenze @1" >= 30) * 400000)$$

A questo punto, sempre mediante il "Calcolatore raster" di QGIS o impiegando il modulo di GRASS "r.mapcalc", è possibile sommare i valori dei pixel delle sei mappe raster generate in precedenza: il risultato è una mappa nella quale ad ogni pixel è associato un codice a sei cifre e ogni combinazione identifica un'AEZ (ad esempio l'AEZ 111111 identifica le aree prive di qualsiasi limitazione, l'AEZ 211111 identifica le aree dove è presente soltanto una ridotta limitazione di pendenza, ecc.). Le combinazioni presenti nell'area in esame sono 33 in totale.

La costruzione della mappa delle AEZ serve come base di confronto per comprendere la distribuzione delle categorie di copertura del suolo. L'obiettivo è quello di effettuare una cross-tabulazione per determinare con quale frequenza le categorie di copertura del suolo ricadono nelle diverse AEZ. Per questi fini viene impiegata la mappa "ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08" (Corine Land Cover aggiornato al 2014) che presenta una classificazione basata su un codice a tre livelli, per un totale di 44 categorie. Dal momento che l'intera procedura è finalizzata alla costruzione di una mappa virtuale della copertura del suolo sulla cui base attribuire i valori del fattore C, poiché dalla letteratura (Bosco and Olivieri 2008) questi valori variano generalmente sulla base dei primi due livelli, la mappa "ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08" è stata riclassificata con il modulo "r.reclass" di GRASS, sulla base delle seguenti regole di riclassificazione:

- 1, 2 = 11 - *Continuous urban fabric, Discontinuous urban fabric;*

- 3, 4, 5, 6 = 12 - *Industrial or commercial units, Road and rail networks and associated land, Port areas, Airports;*
- 7, 8, 9 = 13 - *Mineral extraction sites, Dump sites, Construction sites;*
- 10, 11 = 14 - *Green urban areas, Sport and leisure facilities;*
- 12, 13, 14 = 21 - *Non-irrigated arable land, Permanently irrigated land, Rice fields;*
- 15, 16, 17 = 22 - *Vineyards, Fruit trees and berry plantations, Olive groves;*
- 18 = 23 - *Pastures;*
- 19, 20, 21, 22 = 24 - *Annual crops associated with permanent crops, Complex cultivation patterns, Land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation, Agro-forestry areas;*
- 23, 24, 25 = 31 - *Broad-leaved forest, Coniferous forest, Mixed forest;*
- 26, 27, 28, 29 = 32 - *Natural grasslands, Moors and heathland, Sclerophyllous vegetation, Transitional woodland-shrub;*
- 30, 31, 32, 33, 34 = 33 - *Beaches, dunes, sands, Bare rocks, Sparsely vegetated areas, Burnt areas, Glaciers and perpetual snow;*
- 35, 36 = 41 - *Inland marshes, Peat bogs;*
- 37, 38, 39 = 42 - *Salt marshes, Salines, Intertidal flats;*
- 40, 41 = 51 - *Water courses, Water bodies;*
- 42, 43, 44 = 52 - *Coastal lagoons, Estuaries, Sea and ocean;*
- 48, 49, 50, 255 = *Nodata or unclassified.*

La mappa del Corine Land Cover originale (ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08) era già riclassificata con una numerazione progressiva da 1 a 44: di conseguenza, ad esempio, al valore 1 è attribuito il codice 111, al valore 2 è attribuito il codice 112 mentre nella mappa riclassificata a due livelli gerarchici i valori 1 e 2 (quindi 111 e 112) sono aggregati nel valore 11 (la parte numerica in comune).

Anche la mappa delle AEZ deve essere riclassificata col modulo "r.reclass" per poter usare il modulo "CROSSTAB" di IDRISI. Le categorie delle AEZ a sei cifre sono state riclassificate con una numerazione progressiva da 1 a 33.

Le mappe possono essere infine importate in IDRISI in formato tif e, se necessario, i valori devono essere convertiti nel tipo *byte* o *integer*, con il modulo "CONVERT". Con il modulo "CROSSTAB" viene quindi effettuata una cross-tabulazione di tipo *hard*, dove cioè si stabilisce una relazione univoca fra il valore del pixel della prima mappa in input e una sola categoria della seconda. Il

modulo restituisce due tabelle che presentano la distribuzione delle categorie del Corine Land Cover a due livelli rispetto alle AEZ, rispettivamente come quantità assoluta di pixel (Tabella 4.5) e in termini proporzionali.

4.5 Distribuzione delle categorie del Corine Land Cover a due livelli rispetto alle AEZ, come quantità assoluta di pixel.

		Categorie del Corine Land Cover a due livelli													
		11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	51	Totale	
AEZ	111111	1	31805	6655	42	0	10719	76200	122	40119	2793	748	2693	0	171896
	111112	2	0	0	113	0	4961	1893	0	2981	0	0	0	0	9948
	111211	3	0	0	0	0	0	807	938	192	7	0	0	0	1944
	111311	4	39874	40883	6252	1301	25603	30144	0	82134	5	370	0	446	227012
	112122	5	0	0	0	0	1156	1002	0	482	0	0	0	0	2640
	121111	6	30676	2530	199	2004	12370	7811	22056	56989	19261	7193	0	5698	166787
	121211	7	0	0	0	0	0	0	223	190	0	0	0	0	413
	121311	8	1306	171	55	0	941	4570	1211	14062	10383	1953	4	1	34657
	131111	9	350	0	1	0	0	202	166	3672	3351	1428	0	0	9170
	131311	10	441	0	36	0	0	8546	0	413	111	112	0	1600	11259
	211111	11	905	248	0	0	156	1484	15	2310	783	180	8	0	6089
	211211	12	0	0	0	0	0	0	1974	1470	515	24	0	0	3983
	211311	13	284	28	41	10	185	122	0	742	0	34	0	144	1590
	221111	14	5160	179	218	17	284	7035	40957	63572	44223	13488	15	213	175361
	221211	15	0	0	0	0	0	0	865	358	0	0	0	0	1223
	221311	16	1324	148	190	0	401	6667	2837	33732	23753	4866	2	1	73921
	231111	17	839	0	39	0	0	327	490	8311	7527	2661	0	12	20206
	231311	18	94	0	29	0	0	1105	0	175	236	88	0	172	1899
	311111	19	72	7	0	0	15	76	6	273	199	15	0	0	663
	311211	20	0	0	0	0	0	0	1608	851	955	152	0	0	3566
	311311	21	39	0	0	12	3	2	0	87	0	0	0	36	179
	321111	22	2072	135	242	0	39	4053	35585	50594	83763	10890	18	53	187444
	321211	23	0	0	0	0	0	0	2	307	777	0	0	0	1086
	321311	24	631	175	210	0	92	3137	5583	21284	55927	7723	0	0	94762
	331111	25	399	0	129	0	0	275	1020	8489	21120	4612	0	53	36097
	331311	26	11	0	12	0	0	177	0	16	155	4	0	82	457
	411111	27	0	0	0	0	0	0	0	40	14	0	0	0	54
	411211	28	0	0	0	0	0	0	136	31	339	4	0	0	510
	421111	29	14	2	19	0	5	32	1592	3520	40156	623	0	0	45963
	421211	30	0	0	0	0	0	0	0	21	166	0	0	0	187
	421311	31	97	71	19	0	14	53	715	1809	34883	1775	0	0	39436
	431111	32	91	0	234	0	0	195	490	852	20164	3002	0	40	25068
	431311	33	0	0	0	0	0	8	0	0	21	0	0	9	38
	Totale		116484	51232	8080	3344	56944	155116	117372	401364	372320	61952	2748	8560	1355508

Dal momento che i valori tabellari espressi in termini proporzionali sono approssimati alla terza cifra decimale, si è deciso di lavorare con la tabella che riporta le quantità assolute di pixel. La tabella 4.5 è stata pertanto rielaborata per evidenziare la percentuale di ciascun tipo di copertura del suolo in relazione alle diverse classi delle AEZ (Tabella 4.6).

Tabella 4.6 Ripartizione delle categorie di copertura del suolo in termini percentuali, rispetto alle AEZ definite in precedenza.

			Categorie del Corine Land Cover a due livelli (%)											
			11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	51
AEZ	111111	1	18,502	3,872	0,024	0,000	6,236	44,329	0,071	23,339	1,625	0,435	1,567	0,000
	111112	2	0,000	0,000	1,136	0,000	49,869	19,029	0,000	29,966	0,000	0,000	0,000	0,000
	111211	3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,512	48,251	9,877	0,360	0,000	0,000	0,000
	111311	4	17,565	18,009	2,754	0,573	11,278	13,279	0,000	36,180	0,002	0,163	0,000	0,196
	112122	5	0,000	0,000	0,000	0,000	43,788	37,955	0,000	18,258	0,000	0,000	0,000	0,000
	121111	6	18,392	1,517	0,119	1,202	7,417	4,683	13,224	34,169	11,548	4,313	0,000	3,416
	121211	7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	53,995	46,005	0,000	0,000	0,000
	121311	8	3,768	0,493	0,159	0,000	2,715	13,186	3,494	40,575	29,959	5,635	0,012	0,003
	131111	9	3,817	0,000	0,011	0,000	0,000	2,203	1,810	40,044	36,543	15,573	0,000	0,000
	131311	10	3,917	0,000	0,320	0,000	0,000	75,904	0,000	3,668	0,986	0,995	0,000	14,211
	211111	11	14,863	4,073	0,000	0,000	2,562	24,372	0,246	37,937	12,859	2,956	0,131	0,000
	211211	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	49,561	36,907	12,930	0,603	0,000	0,000
	211311	13	17,862	1,761	2,579	0,629	11,635	7,673	0,000	46,667	0,000	2,138	0,000	9,057
	221111	14	2,943	0,102	0,124	0,010	0,162	4,012	23,356	36,252	25,218	7,692	0,009	0,121
	221211	15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	70,728	29,272	0,000	0,000	0,000
	221311	16	1,791	0,200	0,257	0,000	0,542	9,019	3,838	45,632	32,133	6,583	0,003	0,001
	231111	17	4,152	0,000	0,193	0,000	0,000	1,618	2,425	41,131	37,251	13,169	0,000	0,059
	231311	18	4,950	0,000	1,527	0,000	0,000	58,189	0,000	9,215	12,428	4,634	0,000	9,057
	311111	19	10,860	1,056	0,000	0,000	2,262	11,463	0,905	41,176	30,015	2,262	0,000	0,000
	311211	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	45,093	23,864	26,781	4,262	0,000	0,000
	311311	21	21,788	0,000	0,000	6,704	1,676	1,117	0,000	48,603	0,000	0,000	0,000	20,112
	321111	22	1,105	0,072	0,129	0,000	0,021	2,162	18,984	26,992	44,687	5,810	0,010	0,028
	321211	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,184	28,269	71,547	0,000	0,000	0,000
	321311	24	0,666	0,185	0,222	0,000	0,097	3,310	5,892	22,460	59,018	8,150	0,000	0,000
	331111	25	1,105	0,000	0,357	0,000	0,000	0,762	2,826	23,517	58,509	12,777	0,000	0,147
	331311	26	2,407	0,000	2,626	0,000	0,000	38,731	0,000	3,501	33,917	0,875	0,000	17,943
	411111	27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	74,074	25,926	0,000	0,000	0,000
	411211	28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,667	6,078	66,471	0,784	0,000	0,000
	421111	29	0,030	0,004	0,041	0,000	0,011	0,070	3,464	7,658	87,366	1,355	0,000	0,000
	421211	30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,230	88,770	0,000	0,000	0,000
	421311	31	0,246	0,180	0,048	0,000	0,036	0,134	1,813	4,587	88,455	4,501	0,000	0,000
	431111	32	0,363	0,000	0,933	0,000	0,000	0,778	1,955	3,399	80,437	11,975	0,000	0,160
	431311	33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,053	0,000	0,000	55,263	0,000	0,000	23,684

4.1.3.2 Costruzione della mappa virtuale del fattore C

In questa seconda fase, l'obiettivo è la costruzione di una nuova mappa che presenti una distribuzione di copertura del suolo simile e coerente a quella definita mediante la procedura di cross-tabulazione, dalla quale generare la mappa del fattore C necessaria per l'applicazione del modello RUSLE.

Innanzitutto è necessario generare una mappa delle categorie di pendenza a partire dalla mappa delle pendenze, generata a sua volta dal DEM virtuale: scrivendo l'espressione `("Mappa_delle_pendenze@1" >=30) + ("Mappa_delle_pendenze@1" >=16) + ("Mappa_delle_pendenze@1" >=8) + ("Mappa_delle_pendenze@1" >=0)"` nel calcolatore raster di QGIS, il valore di pendenza di ciascun pixel è riclassificato nelle categorie 1 (0-8°), 2 (8-16°), 3 (16-30°), 4 (> 30°). In questo modo sono state generate quattro macroaree in cui allocare le diverse categorie delle AEZ e ciò semplifica il lavoro permettendo di escludere il primo numero del codice a sei cifre (assumendo che le morfologie del DEM virtuale siano simili a quelle del paesaggio esistente, argomento trattato al paragrafo 3.2).

La complessità della distribuzione di queste categorie non dipende solo dai suoli ma anche dai fenomeni che ne hanno determinato la formazione. Ciò richiederebbe la costruzione di una serie di *layer* virtuali a partire da simulazioni modellistiche complesse. In questa sede invece è descritto un metodo rapido per generare una distribuzione casuale di poligoni di varie forme e dimensioni sull'estensione del DEM virtuale: ciascuna frazione del totale di questi poligoni definisce i confini topografici di un'AEZ, associata in misura proporzionale all'estensione della stessa nel paesaggio esistente. In questo modo è quindi possibile ottenere una distribuzione delle AEZ e quindi della relativa copertura del suolo coerente con quella del paesaggio esistente.

La procedura si articola nei seguenti punti:

1. la mappa delle categorie di pendenza del DEM virtuale deve essere poligonizzata con lo strumento "Poligonizzazione" di QGIS;
2. sono generati 1000 punti vettoriali sull'estensione di un vettore in input (costruito al punto 1) mediante la funzione di QGIS "Punti casuali", alla voce "Strumenti di Ricerca";
3. mediante la funzione di QGIS "Poligoni di Voronoi", alla voce "Strumenti di Geometria", è possibile generare una dispersione casuale di poligoni, la cui dimensione complessivamente dipende dalla densità dei punti vettoriali costruiti al punto 2; un poligono di Voronoi può

essere definito come un'insieme di porzioni di spazio risultante dell'intersezione delle rette bisettrici un punto rispetto a tutti quelli adiacenti;

4. il vettore generato al punto 1 deve essere diviso in 4 vettori distinti, rappresentanti le 4 categorie di pendenza ($0-8^\circ$, $8-16^\circ$, $16-30^\circ$, $> 30^\circ$): questi devono essere impiegati come vettori di ritaglio per la mappa vettoriale costruita al punto 3, in modo tale da ottenere una dispersione casuale di poligoni per ogni categoria di pendenza;
5. la mappa dei poligoni di Voronoi risulta quindi suddivisa in 4 vettori per i quali vengono calcolate le aree, mediante la funzione di QGIS "Estrai/Aggiungi colonne geometriche", alla voce "Strumenti di Geometria"; la somma dei valori delle aree, per ogni categoria di pendenza, rappresenta il 100% e può quindi essere effettuata una selezione casuale di poligoni in modo tale che, ad una frazione di questi, corrisponda l'estensione di un'AEZ in percentuale simile a quella del paesaggio esistente: ogni poligono è definito da un codice identificativo progressivo e dalla relativa area e quindi, importando questi valori in un software di elaborazione dati (come Excel), è relativamente semplice ripartire i poligoni in base alle somma delle loro aree (in percentuale); segue il completamento della tabella degli attributi sul software GIS per associare ad ogni poligono il codice a sei cifre, rappresentante l'appartenenza ad una specifica AEZ.

Il risultato di questa procedura è la mappa delle AEZ virtuali delle quattro categorie di pendenza, in figura 4.3. La tabella 4.7 riporta la distribuzione percentuale a confronto fra la mappa delle AEZ del territorio esistente e le mappe delle AEZ virtuali, per categorie di pendenza.

Tabella 4.7 Tabelle di comparazione della distribuzione percentuale delle AEZ fra paesaggio virtuale ed esistente

Pendenza $0-8^\circ$		
Codice AEZ	AEZ reale (%)	AEZ virtuale (%)
111111	27,039	27,118
111112	1,565	1,444
111211	0,306	0,264
111311	35,709	35,813
112122	0,415	0,380
121111	26,236	26,257
121211	0,065	0,047
121311	5,452	5,447
131111	1,442	1,537
131311	1,771	1,634

Pendenza $8-16^\circ$		
Codice AEZ	AEZ reale (%)	AEZ virtuale (%)
211111	2,142	2,127
211211	1,401	1,326
211311	0,559	0,535
221111	61,688	61,695
221211	0,430	0,547
221311	26,004	25,909
231111	7,108	7,142
231311	0,668	0,595

Pendenza 16-30°		
Codice AEZ	AEZ reale (%)	AEZ virtuale (%)
311111	0,204	0,180
311211	1,100	1,091
321111	57,808	57,659
321211	0,335	0,535
311311	0,055	0,073
321311	29,225	29,315
331111	11,132	10,987
331311	0,141	0,160

Pendenza > 30°		
Codice AEZ	AEZ reale (%)	AEZ virtuale (%)
411111	0,049	0,049
411211	0,458	0,483
421111	41,313	41,249
421311	35,446	35,487
421211	0,168	0,127
431111	22,532	22,572
431311	0,034	0,033

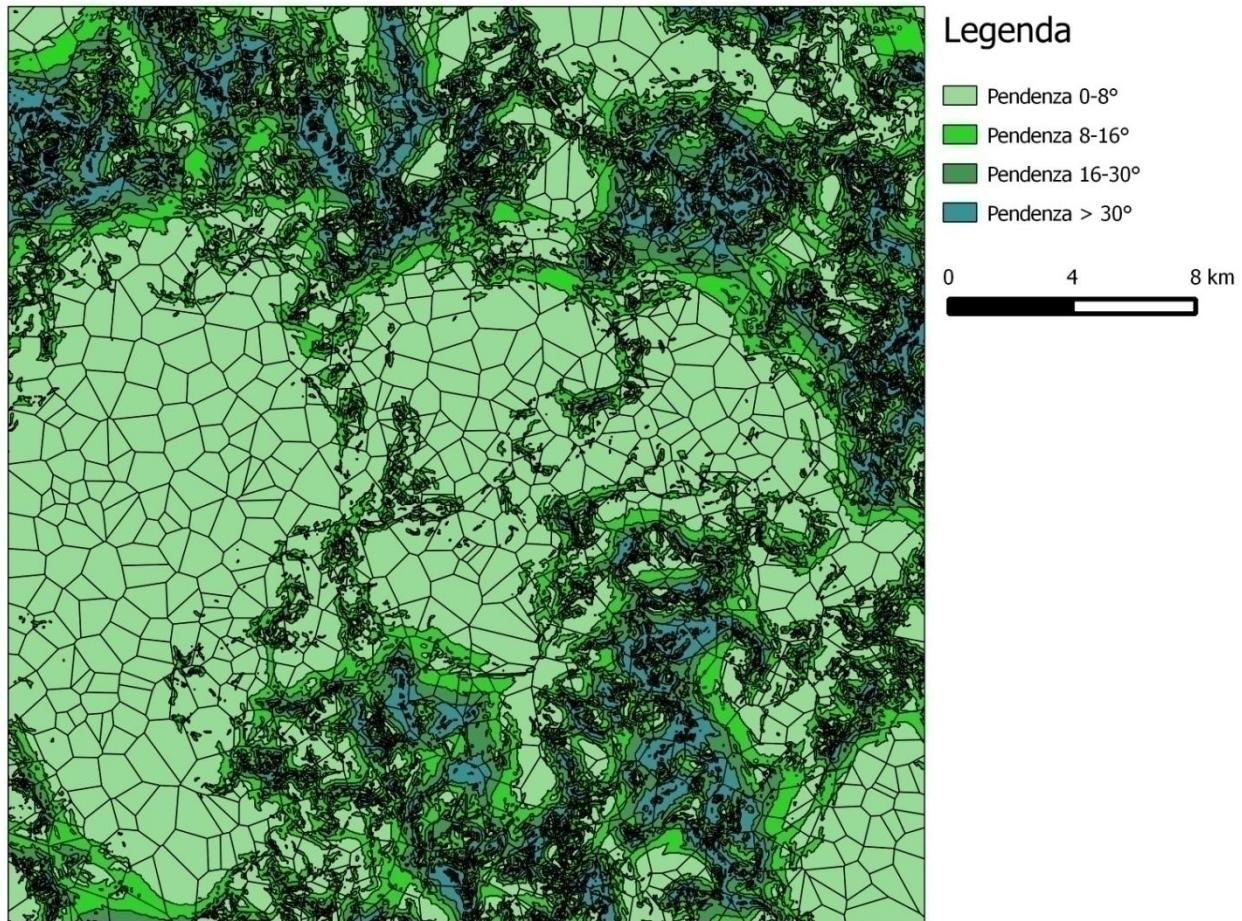


Figura 4.3 Mappa virtuale dei poligoni di Voronoi, ritagliata per categorie di pendenza. Ogni poligono è definito da un codice a sei cifre che identifica una specifica AEZ.

La costruzione della mappa delle AEZ virtuali è finalizzata alla creazione di unità cartografiche dotate di confini topografici che, non solo hanno un'estensione paragonabile a quella delle AEZ esistenti, ma che ripartiscono il territorio in aree per le quali si può assumere la medesima frequenza di copertura del suolo identificata dalla cross-tabulazione (Tabella 4.6). La costruzione della mappa del fattore C risulta quindi immediata, attribuendo i valori associati alle categorie del Corine Land Cover disponibili dalla letteratura (Bosco and Olivieri 2008) alle AEZ virtuali. In precedenza la mappa di copertura del suolo è stata riclassificata a due livelli. Le categorie di copertura del suolo a tre livelli ("ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08") presentano solo alcune variazioni del fattore C. Per il territorio considerato le uniche eccezioni sono le seguenti:

- la categoria 24 include le sottocategorie a tre livelli "*Complex cultivation patterns*" (242) e "*Land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation*" (243) che presentano due differenti valori di C, rispettivamente 0,335 e 0,1; il valore di C è stato stimato da una media ponderata dei valori di C sull'estensione delle aree occupate dai due tipi di copertura del suolo;
- la categoria 32 non comprende la copertura del suolo "*Sclerophyllous vegetation*" (323), la quale presenterebbe un valore del fattore C differente dalle altre sottocategorie a tre livelli (321, 322, 323);

I valori del fattore C impiegati per le categorie di copertura del suolo sono riportati in tabella 4.8.

Tabella 4.8 Valori del fattore C associati alle categorie di copertura del suolo a due livelli.

Categorie di copertura del suolo	Fattore C
11	0
12	0
13	0
14	0,001
21	0,335
22	0,55
23	0,01
24	0,190
31	0,005
32	0,01
33	0
51	0

Poiché ogni AEZ presenta una propria sequenza di categorie con differenti percentuali di copertura del suolo, l'attribuzione del fattore C deve essere effettuata sulla base della media dei valori in tabella 4.8, ponderata rispetto alle percentuali di copertura, definite dalla cross-tabulazione (Tabella 4.6). I valori del fattore C devono quindi essere calcolati separatamente per ogni AEZ e inseriti nella tabella degli attributi delle AEZ virtuali, nel software GIS. Quest'ultima operazione può essere effettuata nel "Calcolatore di campi" di QGIS, accessibile dalla tabella degli attributi della mappa vettoriale in figura 4.3 (la mappa virtuale delle AEZ, generata in precedenza), creando una nuova colonna e scrivendo il codice seguente:

CASE

```
WHEN AEZ = 111111 THEN 0.309
WHEN AEZ = 111112 THEN 0.329
WHEN AEZ = 111211 THEN 0.097
WHEN AEZ = 111311 THEN 0.180
WHEN AEZ = 112122 THEN 0.390
WHEN AEZ = 121111 THEN 0.118
WHEN AEZ = 121211 THEN 0.105
WHEN AEZ = 121311 THEN 0.161
WHEN AEZ = 131111 THEN 0.092
WHEN AEZ = 131311 THEN 0.425
WHEN AEZ = 211111 THEN 0.216
WHEN AEZ = 211211 THEN 0.076
WHEN AEZ = 211311 THEN 0.170
WHEN AEZ = 221111 THEN 0.096
WHEN AEZ = 221211 THEN 0.136
WHEN AEZ = 221311 THEN 0.141
WHEN AEZ = 231111 THEN 0.091
WHEN AEZ = 231311 THEN 0.339
WHEN AEZ = 311111 THEN 0.151
WHEN AEZ = 311211 THEN 0.052
WHEN AEZ = 311311 THEN 0.104
WHEN AEZ = 321111 THEN 0.068
WHEN AEZ = 321211 THEN 0.057
WHEN AEZ = 321311 THEN 0.066
WHEN AEZ = 331111 THEN 0.053
WHEN AEZ = 331311 THEN 0.221
WHEN AEZ = 411111 THEN 0.142
WHEN AEZ = 411211 THEN 0.018
WHEN AEZ = 421111 THEN 0.020
WHEN AEZ = 421211 THEN 0.026
WHEN AEZ = 421311 THEN 0.015
WHEN AEZ = 431111 THEN 0.016
WHEN AEZ = 431311 THEN 0.119
END
```

La mappa vettoriale delle AEZ virtuali, a questo punto, può essere rasterizzata sulla colonna di attributi recante i valori del fattore C, per creare il *layer* raster (Figura 4.4) utilizzabile nell'applicazione del modello RUSLE.

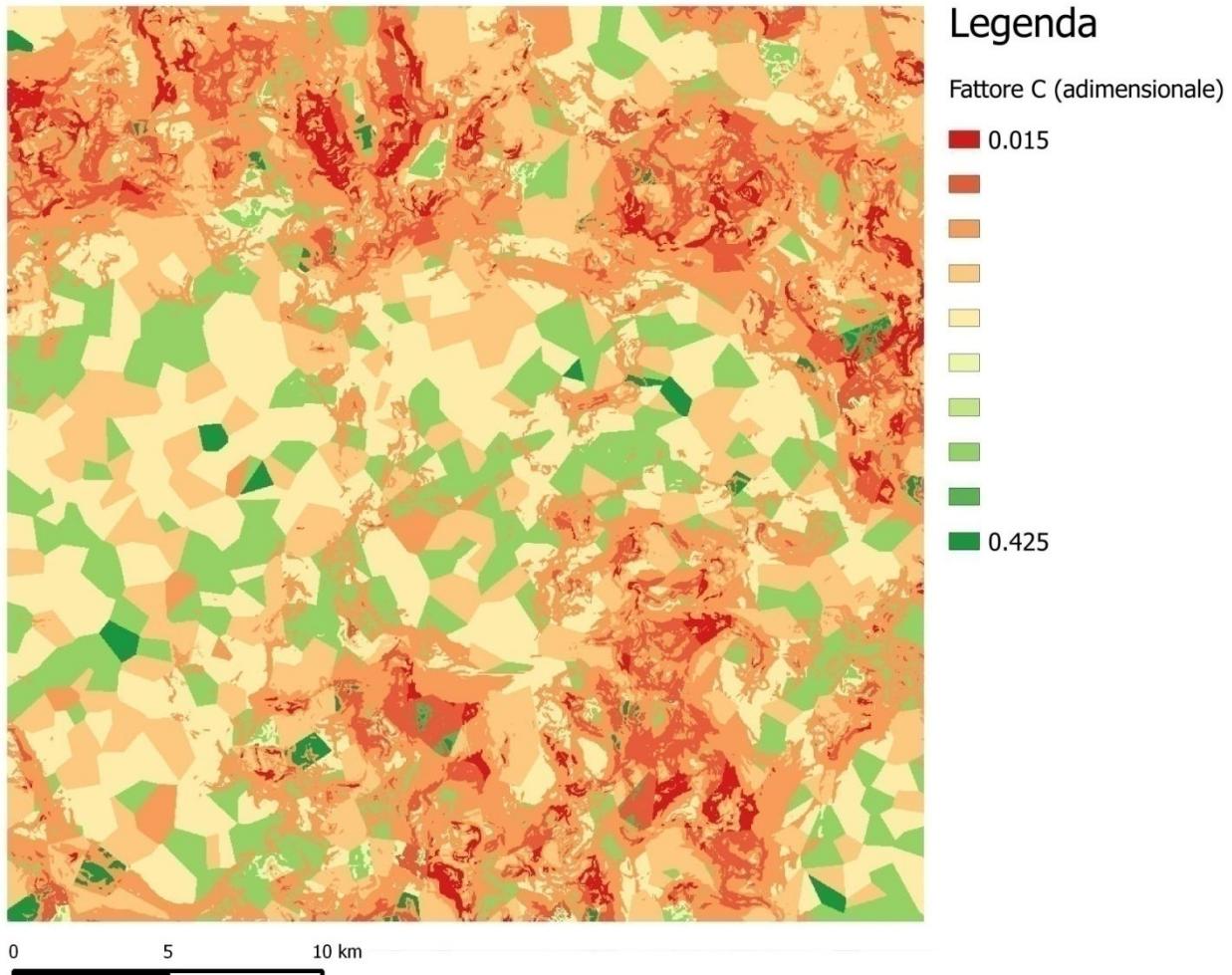


Figura 4.4 Mappa del fattore C (adimensionale)

4.1.4 Layer fattore K

Per costruire la mappa virtuale del fattore K è possibile partire dal *layer* vettoriale delle AEZ virtuali (Figura 4.3), poiché queste identificano le aree a tessitura grossolana e quelle a tessitura medio-fine in base al quarto numero da sinistra, del codice a sei cifre. Sulla base delle informazioni disponibili dalla carta dei suoli della regione Veneto ("c0507021_CartaSuoliVeneto"), è possibile definire il quadro tessiturale del paesaggio esistente: l'area si divide fra suoli che presentano

tessitura grossolana lungo l'intero profilo, o su un parte di questo, e suoli che presentano tessitura da media a moderatamente fine. Suoli con tessitura fine sono poco frequenti e mai dominanti. Analogamente a quanto fatto da Bosco e Oliviero (2008), per calcolare il fattore K, vengono definite delle composizioni medie per ogni categoria tessitale presente nell'area in esame. Dal campo di variabilità delle percentuali delle categorie tessiturali in figura 4.5, si identificano le composizioni medie riportate in tabella 4.9.

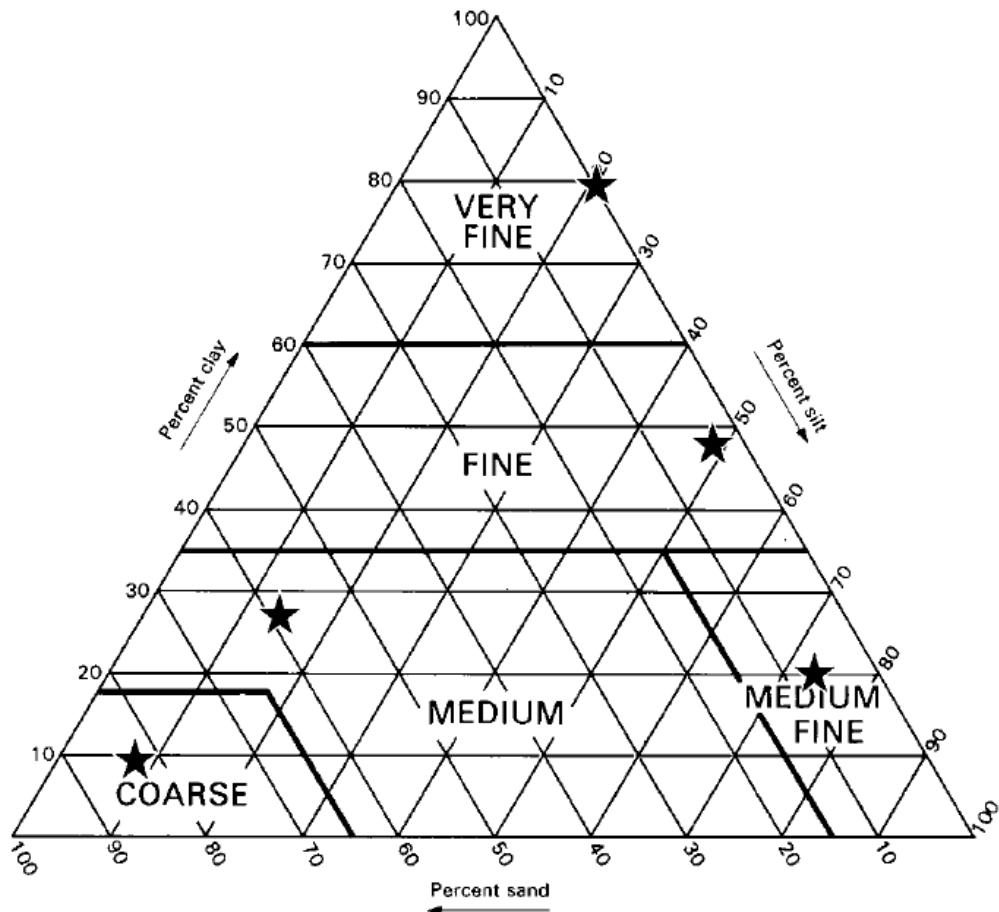


Figura 4.5 Triangolo tessitale FAO (van der Knijff, Jones and Montanarella 2000)

Tabella 4.9 Composizione percentuale media delle classi tessiturali presenti nel territorio in esame.

Categoria tessiturale	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)
Grossolana (argilla < 18% e sabbia > 65%)	9	8	83
Media (18% < argilla < 35% e sabbia > 15% o argilla < 18% e 15% < sabbia < 65%)	27	15	58
Moderatamente fine (argilla < 35% e sabbia < 15%)	18	74	8

Poiché i criteri definiti in precedenza, per ripartire il territorio esistente nelle AEZ, non permettono la distinzione fra aree a tessitura media e medio-fine, per queste AEZ si assume una composizione tessitutale intermedia. Le media delle percentuali (Tabella 4.9) delle categorie "Medium" e "Medium fine" restituisce una composizione franca: argilla 22%, limo 45%, sabbia 33%.

Utilizzando le equazioni al paragrafo 2.8.1.2 è quindi possibile calcolare i valori del fattore K , sulla base delle classi diametriche USDA e della composizione percentuale dei suoli, imponendo i valori in tabella 4.10.

Tabella 4.10 Valori delle variabili per calcolare il fattore K per le classi tessiturali presenti nel paesaggio esistente.

Variabili	Argilla	Limo	Sabbia
d (mm)	0,002	0,05	2
d_{i-1} (mm)	(< 2) 0,0000001	0,002	0,05
f_i	Grossolana	0,09	0,08
	Media/Moderatamente fine	0,22	0,45
			0,33

I valori del fattore K calcolati possono essere quindi inseriti nella tabella degli attributi della mappa vettoriale delle AEZ virtuali (Figura 4.3), mediante il calcolatore di campi di QGIS, creando una nuova colonna e scrivendo il codice seguente:

CASE

WHEN AEZ = 111111 THEN 0.0404

WHEN AEZ = 111112 THEN 0.0404

WHEN AEZ = 111211 THEN 0.0404

```

WHEN AEZ = 111311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 112122 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 121111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 121211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 121311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 131111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 131311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 211111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 211211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 211311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 221111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 221211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 221311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 231111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 231311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 311111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 311211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 311311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 321111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 321211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 321311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 331111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 331311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 411111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 411211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 421111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 421211 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 421311 THEN 0.0088
WHEN AEZ = 431111 THEN 0.0404
WHEN AEZ = 431311 THEN 0.0088
END

```

La mappa vettoriale delle AEZ virtuali, a questo punto, può essere rasterizzata sulla colonna di attributi recante i valori del fattore K, per creare il *layer* raster (Figura 4.6) utilizzabile nell'applicazione del modello RUSLE.

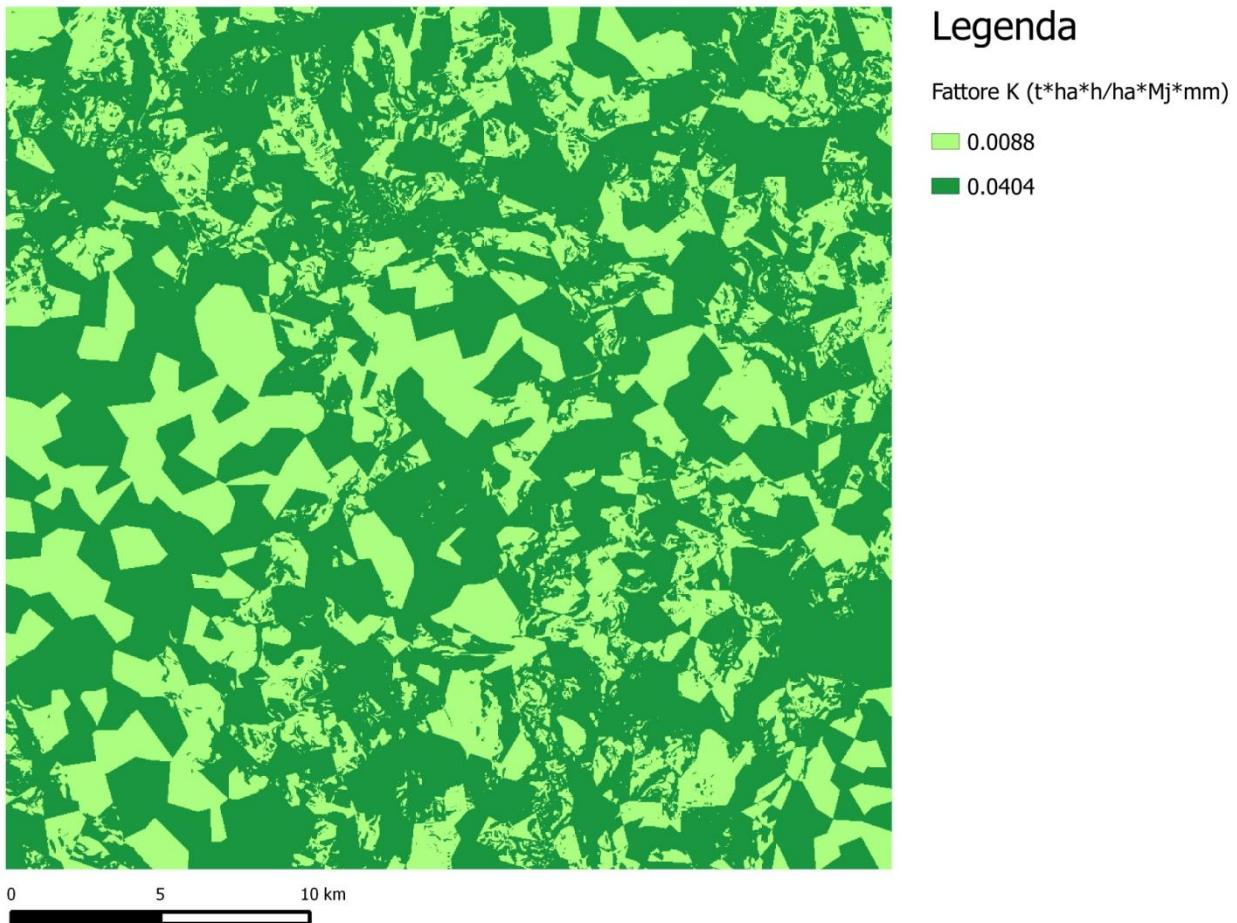


Figura 4.6 Mappa del fattore C ($t*ha*h/ha*Mj*mm$)

4.2 Applicazione del modello RUSLE

Per generare la mappa della perdita di suolo per erosione (tonnellate/ettaro*anno) è necessario moltiplicare i *layer* dei fattori R, LS, C e K nel "Calcolatore raster" di QGIS. Il fattore P, che definisce le misure di prevenzione dall'erosione, in questo studio è considerato pari ad 1. La mappa risultante è presentata in figura 4.7. La RUSLE fornisce valori di output per ettaro: per questo motivo nella mappa è stata mantenuta l'unità di misura prevista dal modello. È tuttavia importante sottolineare che, poiché il risultato viene calcolato dalla sovrapposizione di una serie di mappe dotate della propria risoluzione spaziale, l'effettiva perdita di suolo dovrebbe essere rapportata all'area dei pixel. Un ettaro corrisponde a 10000 m^2 mentre la risoluzione spaziale del paesaggio virtuale è pari a $841,8238\text{ m}^2$.

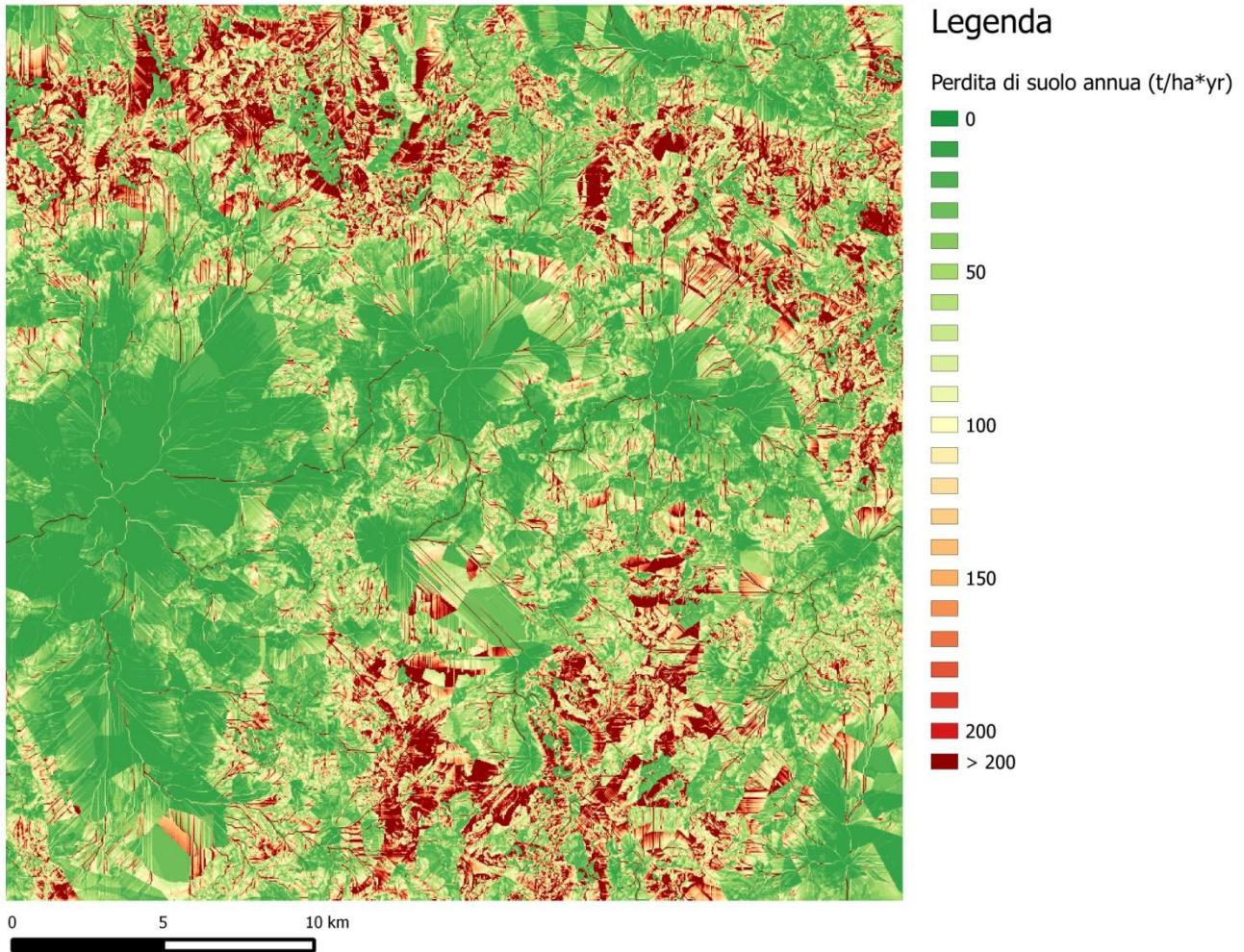


Figura 4.7 Perdita di suolo annuo calcolata con il modello RUSLE (t/ha*yr)

4.3 Calcolo della perdita di suolo annuo in termini volumetrici

La perdita di suolo annuo espressa in tonnellate per ettaro per anno non è direttamente traducibile in termini volumetrici: è necessario introdurre il concetto di densità apparente. Giordano (1999) definisce la densità apparente come peso di terreno secco, per unità di volume, che conserva la sua struttura naturale e, pertanto, dipende dall'entità degli spazi esistenti fra le particelle. Per la costruzione del *layer K* (paragrafo 4.1.4) sono state riconosciute due principali categorie tessiturali (franca e franco sabbiosa) dotate della propria densità apparente. Sulla base della composizione tessiturale delle due categorie, in tabella 4.10, alle AEZ che presentano il quarto numero da sinistra del codice a sei cifre:

- pari a 1 viene attribuita una densità apparente pari a $1,38 \text{ g/cm}^3$ [15];

- pari a 3 viene attribuita una densità apparente pari a $1,61 \text{ g/cm}^3$ [15].

Su questa base è possibile calcolare le tonnellate di suolo presenti per ogni AEZ nel primo centimetro di suolo.

Innanzitutto è necessario rapportare i valori di output del modello RUSLE alla risoluzione spaziale corretta (Figura 4.8):

$$\text{Perdita di suolo (t/area pixel * anno)} = \frac{\text{valore output RUSLE} * 29,0142}{100}$$

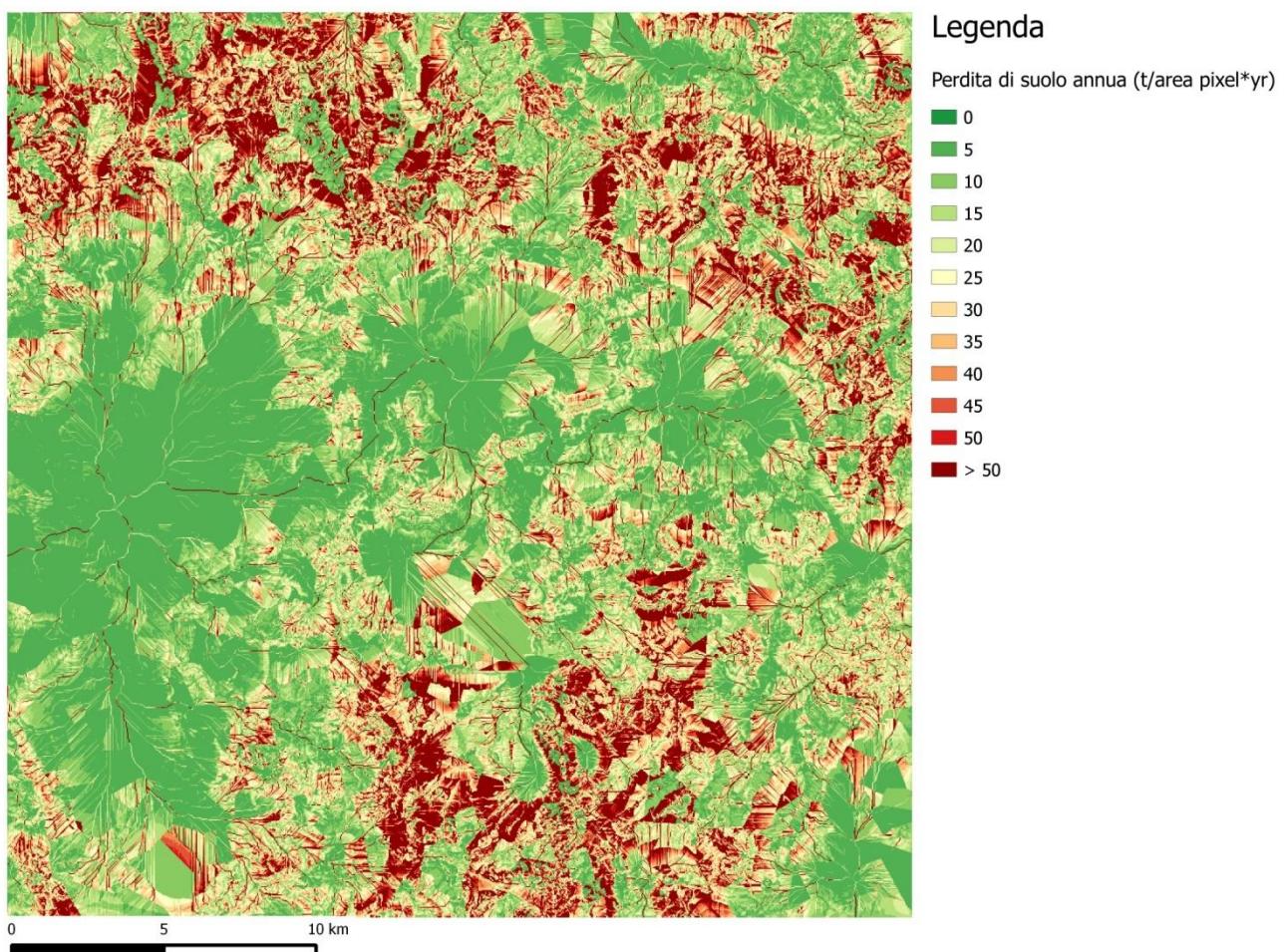


Figura 4.8 Perdita di suolo annua rapportata alla risoluzione spaziale del DEM virtuale.

Per le AEZ a tessitura franca:

- si riporta il valore di densità a tonnellate su cm^3 :

$$1,38 \text{ g/cm}^3 = 0,00000138 \text{ t/cm}^3$$

- si calcolano le tonnellate di suolo presenti in un volume di base 1 m^2 , alto un cm:

$$0,00000138 \text{ t/cm}^3 * 10000 = 0,0138 \text{ t/m}^2 * \text{cm}$$

- si calcolano le tonnellate di suolo presenti nel primo cm di profondità dell'area di un pixel:
 $(0,0138 \text{ t}/\text{m}^2 * \text{cm}) * (29,0142 \text{ m} * 29,0142 \text{ m}) = 11,6171685 \text{ t}/\text{area pixel} * \text{cm}$

Per le AEZ a tessitura franco sabbiosa:

- si riporta il valore di densità a tonnellate su cm^3 :

$$1,61 \text{ g}/\text{cm}^3 = 0,00000161 \text{ t}/\text{cm}^3$$

- si calcolano le tonnellate di suolo presenti in un volume di base 1 m^2 , alto un cm:

$$0,00000161 \text{ t}/\text{cm}^3 * 10000 = 0,0161 \text{ t}/\text{m}^2 * \text{cm}$$

- si calcolano le tonnellate di suolo presenti nel primo cm di profondità dell'area di un pixel:

$$(0,0161 \text{ t}/\text{m}^2 * \text{cm}) * (29,0142 \text{ m} * 29,0142 \text{ m}) = 13,5533632 \text{ t}/\text{area pixel} * \text{cm}$$

Infine si calcola la proporzione per stabilire i centimetri di suolo corrispondenti alla massa erosa in accordo con il modello RUSLE.

Per le AEZ a tessitura franca:

$$\frac{\text{Perdita di suolo (t}/\text{area pixel} * \text{anno})}{11,6171685 \text{ t}/\text{area pixel} * \text{cm}} = \text{cm}/\text{anno}$$

Per le AEZ a tessitura franco sabbiosa:

$$\frac{\text{Perdita di suolo (t}/\text{area pixel} * \text{anno})}{13,5533632 \text{ t}/\text{area pixel} * \text{cm}} = \text{cm}/\text{anno}$$

La quota erosa può quindi essere sottratta ai valori del DEM virtuale per costruire delle simulazioni in un certo arco temporale.

Per costruire il *layer* raster della quota di suolo erosa in un anno è necessario impiegare nuovamente la mappa vettoriale delle AEZ virtuali (Figura 4.3). Mediante il "Calcolatore di campi" di QGIS, è possibile attribuire ad ogni poligono il valore della massa di suolo presente nel primo cm di profondità nell'area di un pixel ($\text{t}/\text{area pixel} * \text{cm}$), sulla base del codice a sei cifre che lo identifica, creando una nuova colonna e scrivendo il codice che segue:

```
CASE
WHEN AEZ = 111111 THEN 11.6171685
```

```

WHEN AEZ = 111112 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 111211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 111311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 112122 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 121111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 121211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 121311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 131111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 131311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 211111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 211211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 211311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 221111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 221211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 221311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 231111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 231311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 311111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 311211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 311311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 321111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 321211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 321311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 331111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 331311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 411111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 411211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 421111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 421211 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 421311 THEN 13.5533632
WHEN AEZ = 431111 THEN 11.6171685
WHEN AEZ = 431311 THEN 13.5533632
END

```

La mappa vettoriale delle AEZ virtuali può quindi essere rasterizzata sulla colonna di attributi recante i valori di perdita del suolo (t/area pixel*anno), per creare il *layer* raster da impiegare successivamente nel calcolatore raster di QGIS, nella seguente espressione:

$((("RUSLE@1" * 29.0142) / 100) / "Massa di suolo per cm@1")$

con:

- *RUSLE@1* = mappa raster di output del modello RUSLE;
- *Massa di suolo per cm@1* = mappa raster della massa di suolo presente nel primo centimetro di profondità nell'area di un pixel (t/area pixel*cm).

La mappa risultante (Figura 4.9) esprime la misura dei centimetri di suolo eroso ogni anno per ogni pixel, da sottrarre ai valori di quota del DEM virtuale.

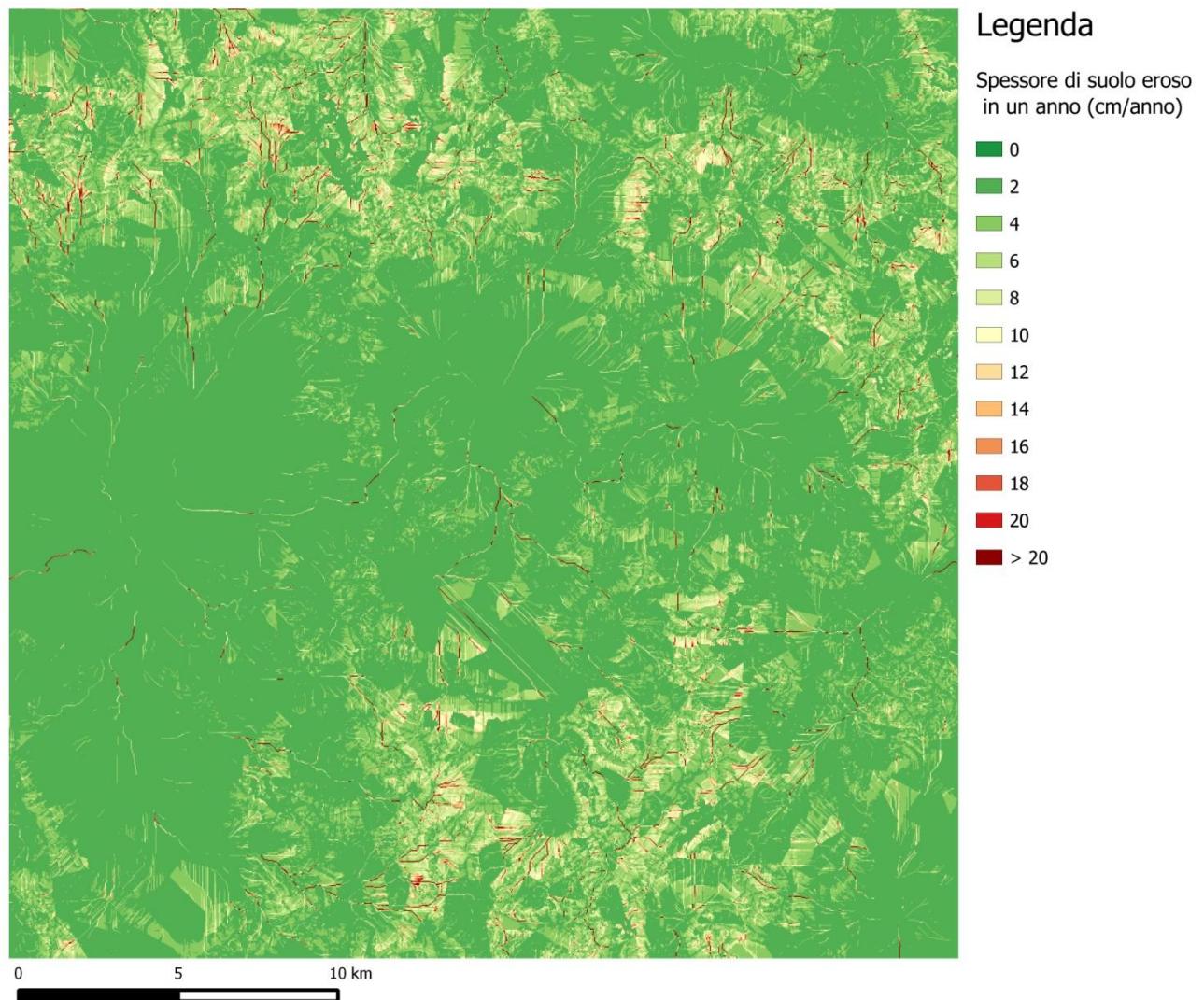


Figura 4.9 Spessore di suolo eroso nell'area di un pixel (cm/anno)

4.4 Costruzione delle simulazioni

Per queste elaborazioni è necessario impiegare il "Calcolatore raster" di QGIS (od uno strumento di altri software GIS con funzione analoga).

La mappa dei centimetri di suolo eroso ogni anno (Figura 4.9) deve essere moltiplicata per 0,01, per la conversione dell'unità di misura a m/anno. Il risultato deve prima essere moltiplicato per il numero di anni per i quali si vuole costruire la simulazione e, in seguito, sottratto ai valori di quota

del DEM virtuale. In ambiente QGIS è necessario scrivere nel "Calcolatore raster" il codice seguente:

"DEM virtuale @1" - ("Centimetri erosi in un anno@1" * 0.01 * Numero di anni)

La variazione di quota in un area molto ampia può non essere significativa ai fini della visualizzazione a video dei risultati. Inoltre, per evidenziare l'effettiva perdita di suolo, è necessario disporre di una mappa della profondità dei suoli, dalla quale sottrarre lo spessore di suolo eroso ogni anno, moltiplicato per il numero di anni ai quali si vuole svolgere la simulazione.

Per questo studio una mappa delle profondità virtuali dei suoli è stata generata sulla base del codice a sei cifre: la seconda cifra da destra indica se in un AEZ i suoli dominanti sono molto profondi, moderatamente profondi o sottili (Tabella 4.4). In questa sede si è scelto di attribuire gli estremi superiori delle classi di appartenenza: ai suoli profondi è stato attribuito un valore di profondità di 150 cm, a quelli moderatamente profondi 100 cm e a quelli sottili 50 cm. Questi valori possono quindi essere inseriti nella tabella degli attributi della mappa vettoriale delle AEZ virtuali (Figura 4.3), mediante il "Calcolatore di campi" di QGIS, creando una nuova colonna e scrivendo il codice seguente:

CASE

```
WHEN AEZ = 111111 THEN 150
WHEN AEZ = 111112 THEN 150
WHEN AEZ = 111211 THEN 150
WHEN AEZ = 111311 THEN 150
WHEN AEZ = 112122 THEN 150
WHEN AEZ = 121111 THEN 100
WHEN AEZ = 121211 THEN 100
WHEN AEZ = 121311 THEN 100
WHEN AEZ = 131111 THEN 50
WHEN AEZ = 131311 THEN 50
WHEN AEZ = 211111 THEN 150
WHEN AEZ = 211211 THEN 150
WHEN AEZ = 211311 THEN 150
WHEN AEZ = 221111 THEN 100
WHEN AEZ = 221211 THEN 100
WHEN AEZ = 221311 THEN 100
WHEN AEZ = 231111 THEN 50
WHEN AEZ = 231311 THEN 50
WHEN AEZ = 311111 THEN 150
WHEN AEZ = 311211 THEN 150
WHEN AEZ = 311311 THEN 150
WHEN AEZ = 321111 THEN 100
WHEN AEZ = 321211 THEN 100
```

```

WHEN AEZ = 321311 THEN 100
WHEN AEZ = 331111 THEN 50
WHEN AEZ = 331311 THEN 50
WHEN AEZ = 411111 THEN 150
WHEN AEZ = 411211 THEN 150
WHEN AEZ = 421111 THEN 100
WHEN AEZ = 421211 THEN 100
WHEN AEZ = 421311 THEN 100
WHEN AEZ = 431111 THEN 50
WHEN AEZ = 431311 THEN 50
END

```

La mappa vettoriale delle AEZ virtuali, a questo punto, può essere rasterizzata sulla colonna di attributi recante i valori di profondità, per creare il *layer* raster (Figura 5.2) sul quale effettuare la sottrazione dello spessore di suolo eroso nel "Calcolatore raster". Se dal punto di vista teorico si tratta di una mera sottrazione, all'atto pratico è necessaria un'elaborazione più complessa. Si riporta a titolo di esempio l'espressione per calcolare le quote erose in un arco temporale di 100 anni, considerando la profondità massima dei suoli per ogni pixel:

$$((((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=50)) >= 50)+((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=100)) >= 100)*100)+((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=150)) >= 150)*150)) = 0)*("Centimetri erosi in un anno@1"*100))+((((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=50)) >= 50)*50)+((((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=100)) >= 100)*100)+((((("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*("Profondità iniziale dei suoli@1"=150)) >= 150)*150))$$

con:

- *Centimetri erosi in un anno@1* = Mappa dello spessore di suolo eroso nell'area di un pixel (cm/anno) (Figura 4.9);
- *Profondità iniziale dei suoli@1* = Mappa della profondità iniziale dei suoli costruita con il "Calcolatore di campi" a partire dalla mappa vettoriale delle AEZ (Figura 5.2).

Il *layer* risultante da quest'espressione rappresenta le quote effettivamente erose da sottrarre alla mappa della profondità iniziale dei suoli virtuali (Figura 5.2) od al DEM virtuale, per costruire una simulazione dei processi erosivi in un arco temporale di 100 anni.

Alternativamente, la seguente espressione di esempio è funzionale per una rapida costruzione delle simulazioni a video:

*"Profondità iniziale dei suoli@1"-("Centimetri erosi in un anno@1"*100)*

Il calcolo restituisce le quote erose in assenza di vincoli alla profondità pertanto non è possibile quantificare l'effettiva massa di suolo eroso. Tuttavia i suoli completamente erosi risulterebbero avere valori negativi o uguali a zero e quindi, per costruire le mappe delle simulazioni, sarebbe sufficiente impostare una *palette* di colori idonea per evidenziare queste aree.

4.5 Costruzione di scenari

L'architettura di *layer* informativi creata può quindi essere impiegata per costruire simulazioni. Tuttavia, in modo analogo, il territorio virtuale può essere ricostruito imponendo variazioni alla componente informativa: queste variazioni possono essere pensate come assunzioni per costruire scenari. In questo modo è possibile sperimentare la variazione del comportamento dei modelli impiegati in relazione alle caratteristiche imposte nel territorio virtuale, all'atto della sua costruzione.

Ad esempio, modificando il *layer* del fattore R, sarebbe possibile costruire degli scenari per i processi erosivi, nel territorio virtuale. Il fattore R dipende dai regimi pluviometrici che a loro volta sono influenzati dai processi a scala globale. Nel quinto rapporto mondiale di valutazione dei cambiamenti climatici, prodotto dall'IPCC, si stima una variazione crescente dei regimi globali delle precipitazioni, con la temperatura media superficiale terrestre. Sulla base di una serie di *Representative Concentration Pathways* (RCP), che assumono diversi potenziali cambiamenti delle concentrazioni dei gas serra, l'IPCC propone differenti scenari, con un trend più o meno marcato di incremento delle temperature medie superficiali globali. Nell'arco di cent'anni, secondo lo scenario peggiore si osserverebbe un incremento medio di temperatura di 3,7°C (RPC 8.5), corrispondente ad un aumento di 0,16 mm/giorno delle precipitazioni a livello globale. Secondo lo scenario migliore invece si osserverebbe un incremento di temperatura di 1°C (RPC 2.6), con una variazione positiva di 0,07 mm/giorno delle precipitazioni (Collins et al. 2013).

Partendo dai dati delle precipitazioni annuali (c0306010_DatiMeteo), impiegati per costruire il *layer* dal fattore R (paragrafo 4.1.1), per verificare l'effetto di una variazione dei regimi di precipitazione sul territorio virtuale, gli incrementi 0,07 e 0,16 mm/giorno sono stati:

1. moltiplicati per il numero di giorni, per ogni anno dal 1994 al 2012;
2. sommati al dato annuale di precipitazione registrato dalle stazioni meteorologiche nell'area esistente.

La nuova base dati è servita per ricostruire il *layer* del fattore R, separatamente per i due scenari proposti dall'IPCC, con il metodo descritto al paragrafo 4.1.1. Questi *layer* sono quindi utilizzabili per costruire due mappe raster del modello RUSLE, in modo analogo a quanto descritto nei paragrafi precedenti, corrispondenti a due scenari di variazione della temperatura media superficiale globale (RCP 2.6, RCP 8.5).

La costruzione di differenti *layer* R rappresenta un esempio di come si possa agire sulla base dati per costruire scenari rispetto ai modelli sperimentati. In questo caso le mappe create sono funzionali alla costruzione di scenari dei processi erosivi, rispetto alle limitazioni sulla profondità dei suoli per il loro utilizzo, in accordo la tabella 4.3.

5 Risultati delle simulazioni

A partire dalle informazioni disponibili per l'area della Lessinia e dell'alta pianura veronese, è stato costruito un territorio virtuale (Figura 5.1) ed è stata effettuata una simulazione dei processi erosivi, per un arco temporale di 100 anni, secondo quanto descritto al paragrafo 4.4.

La figura 5.1 presenta il DEM virtuale con la sovrapposizione di una seconda mappa generata con il modulo "ILLUMINATE" di IDRISI. La mappa che evidenzia le ombreggiature (generata dal DEM virtuale) è stata fusa al 50% della trasparenza con la mappa della profondità iniziale dei suoli (Figura 5.2). Le ombreggiature sono evidenziate rispetto ad una elevazione del sole di 30° (da 0° a 90°) e con un angolo azimutale di 315° (da 0° a 360° in senso orario da nord).

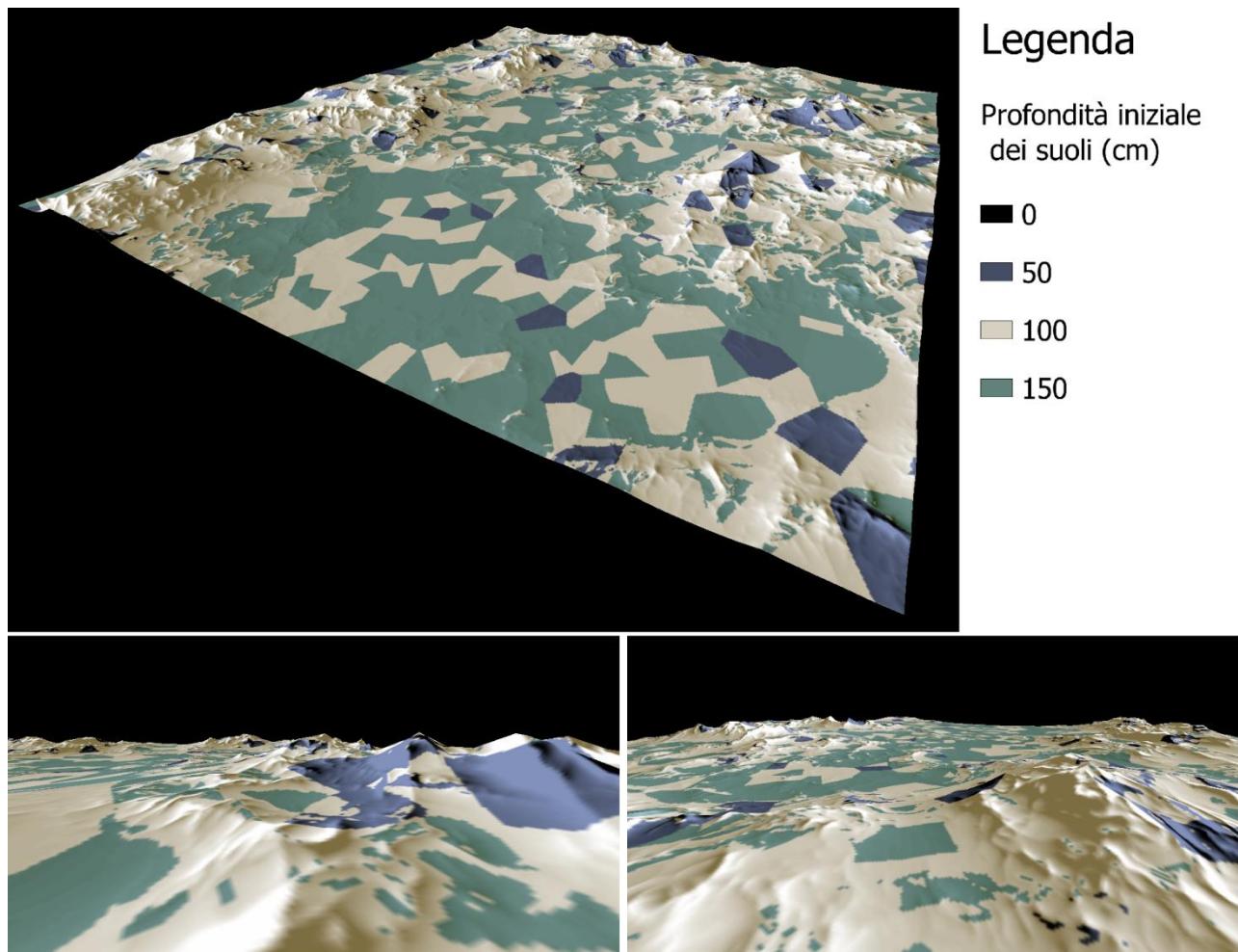


Figura 5.1 DEM virtuale con l'overlay della mappa della profondità iniziale dei suoli e delle ombreggiature dei rilievi.

Nella figura 5.1 l'immagine in alto e quella in basso a sinistra presentano una panoramica in direzione nord-est da sud-ovest. L'immagine in basso a destra è orientata in direzione opposta.

La tabella 5.1 riporta una cross-tabulazione delle pendenze del DEM virtuale con i dati di output del modello RUSLE, riclassificati in quattro categorie di rischio incrementale, in accordo con la categorizzazione proposta da Bosco e Olivieri (2008):

- basso rischio (< 2 t/ha*yr);
- medio rischio (2-20 t/ha*yr);
- alto rischio (20-50 t/ha*yr);
- rischio molto elevato (> 50 t/ha*yr).

Tabella 5.1 Cross-tabulazione delle pendenze del DEM virtuale con i dati di output del modello RUSLE

		Erosione annua (%)				
		< 2 t/ha*yr	2-20 t/ha*yr	20-50 t/ha*yr	> 50 t/ha*yr	Totale
Pendenza (%)	< 8°	3,05	23,24	12,48	13,81	52,58
	8-16°	0,00	1,86	6,26	15,27	23,39
	16-30°	0,00	0,85	2,57	12,44	15,86
	> 30°	0,00	2,14	1,29	4,74	8,16
	Totale	3,05	28,09	22,60	46,26	100

I risultati riportati in seguito sono stati calcolati rapportando i valori di output del modello RUSLE alla risoluzione spaziale del DEM virtuale (29,0142x29,0142).

La mappa della profondità iniziale dei suoli (Figura 5.2) presenta, per ogni pixel, il valore di profondità esatto, riportato in legenda.

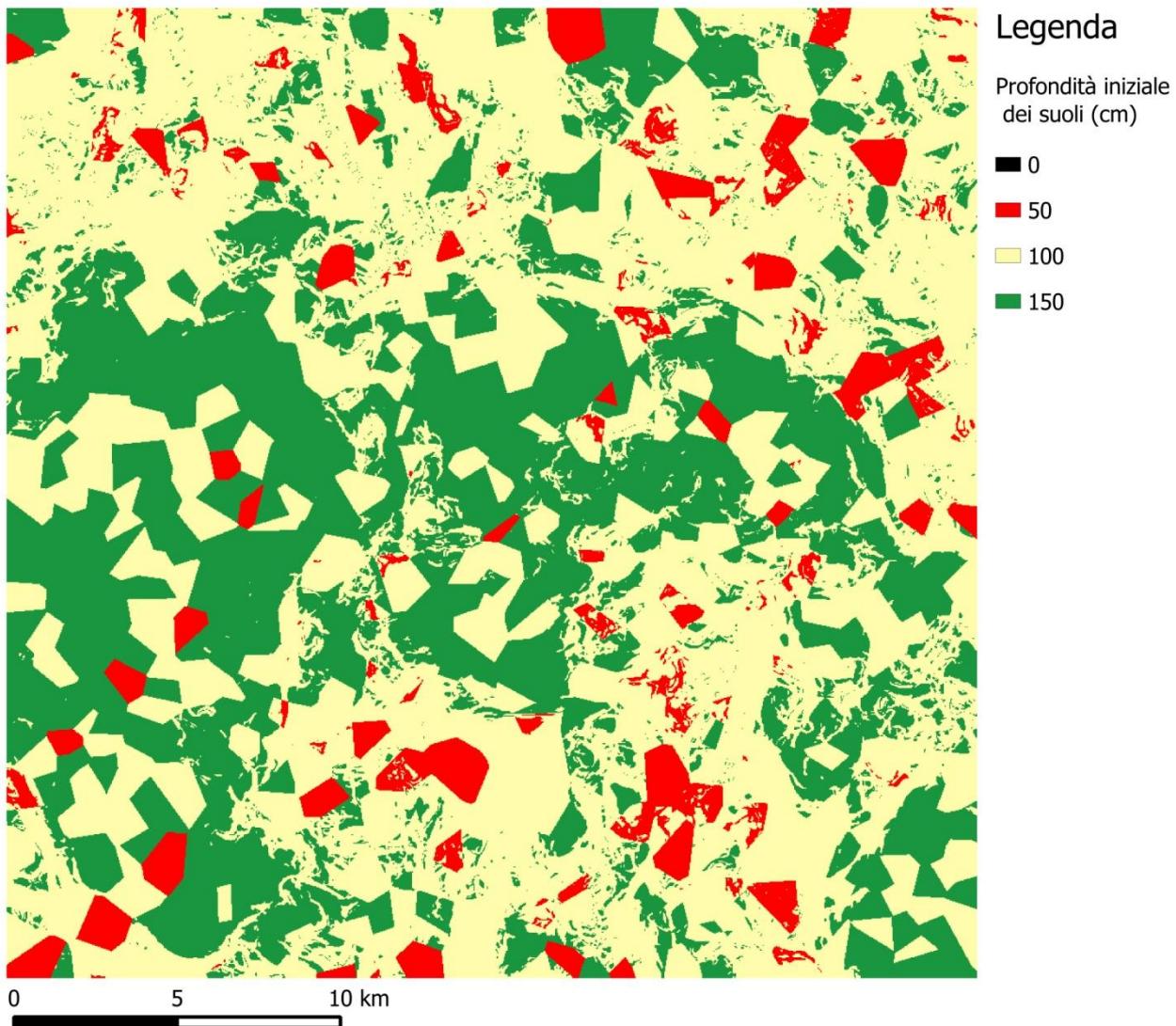


Figura 5.2 Mappa della profondità iniziale dei suoli, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.

La tabella 5.2 presenta la ripartizione in percentuale delle AEZ rispetto alla categoria di profondità (secondo numero da sinistra del codice a sei cifre), mettendo in evidenza anche la dislocazione dei suoli rispetto alla pendenza delle superfici. I valori totali sono indicativi dell'estensione percentuale delle categorie nella mappa in figura 5.2.

Tabella 5.2 Ripartizione percentuale dei suoli in figura 5.2, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.

		Ripartizione categorie di profondità (%)			Totale
		0-50 cm	50-100 cm	100-150 cm	
Categorie di pendenza (%)	0-8°	1,67	16,73	34,18	52,58
	8-16°	1,81	20,64	0,94	23,39
	16-30°	1,77	13,88	0,22	15,86
	> 30°	1,84	6,28	0,04	8,16
	Totale	7,09	57,53	35,38	100

Le mappe alle figure 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 rappresentano le quote erose in un certo arco temporale, rispetto alla situazione iniziale (Figura 5.2). Nelle mappe, per ogni riduzione di 50 cm di profondità, si verifica una transizione di AEZ o l'erosione completa del suolo, nel caso la sottrazione (paragrafo 4.4) fornisca valori di output minori o uguali a zero. I colori non sono interpolati e definiscono in modo discreto le categorie di profondità presenti in legenda (ad esempio un suolo di profondità 101 cm rientra nella categoria 150 ed è definito dal colore verde). In questo modo, dal confronto delle mappe generate ad intervalli successivi per un certo arco temporale, la transizione delle AEZ è visivamente immediata.

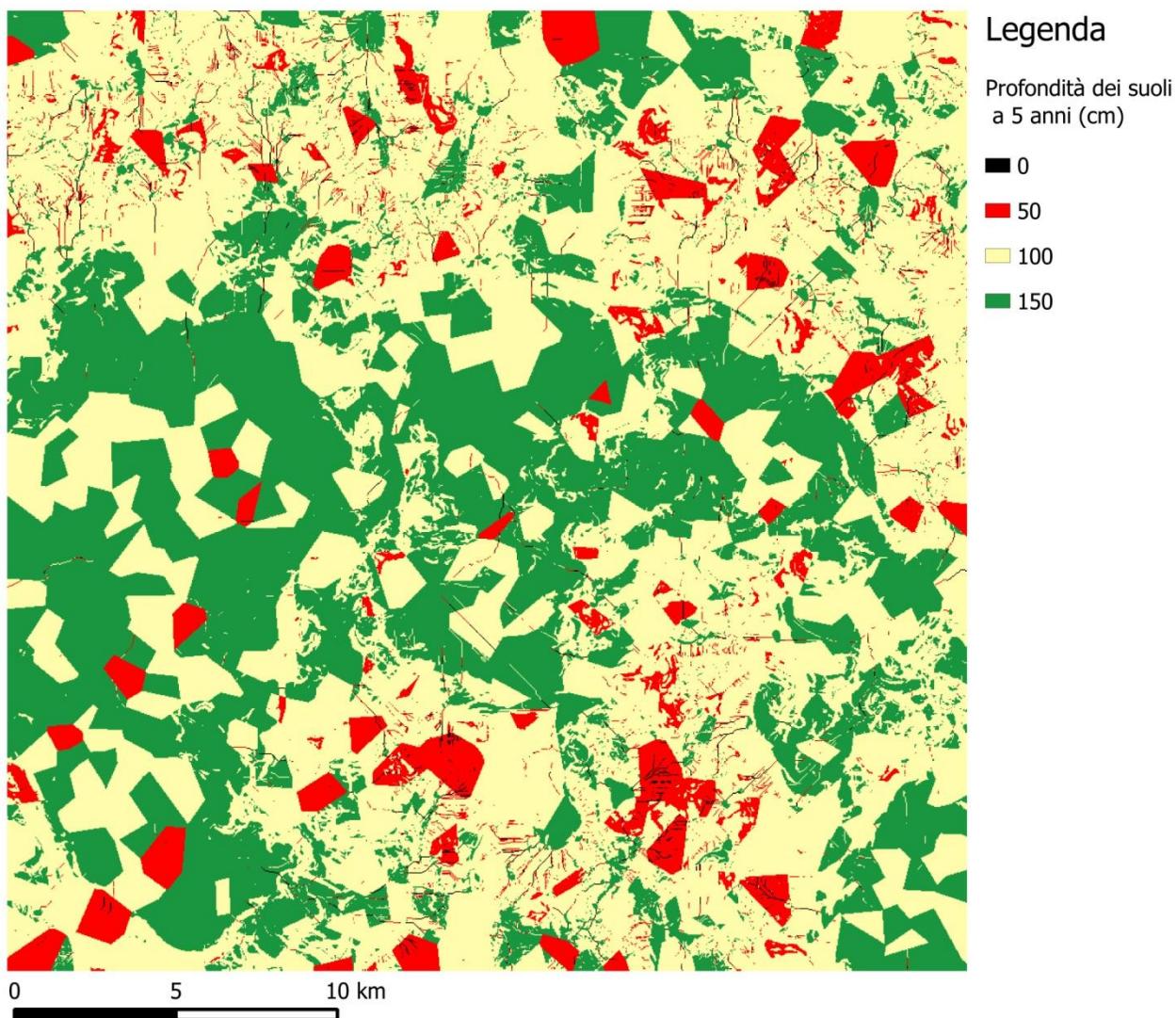


Figura 5.3 Mappa della profondità dei suoli dopo 5 anni.

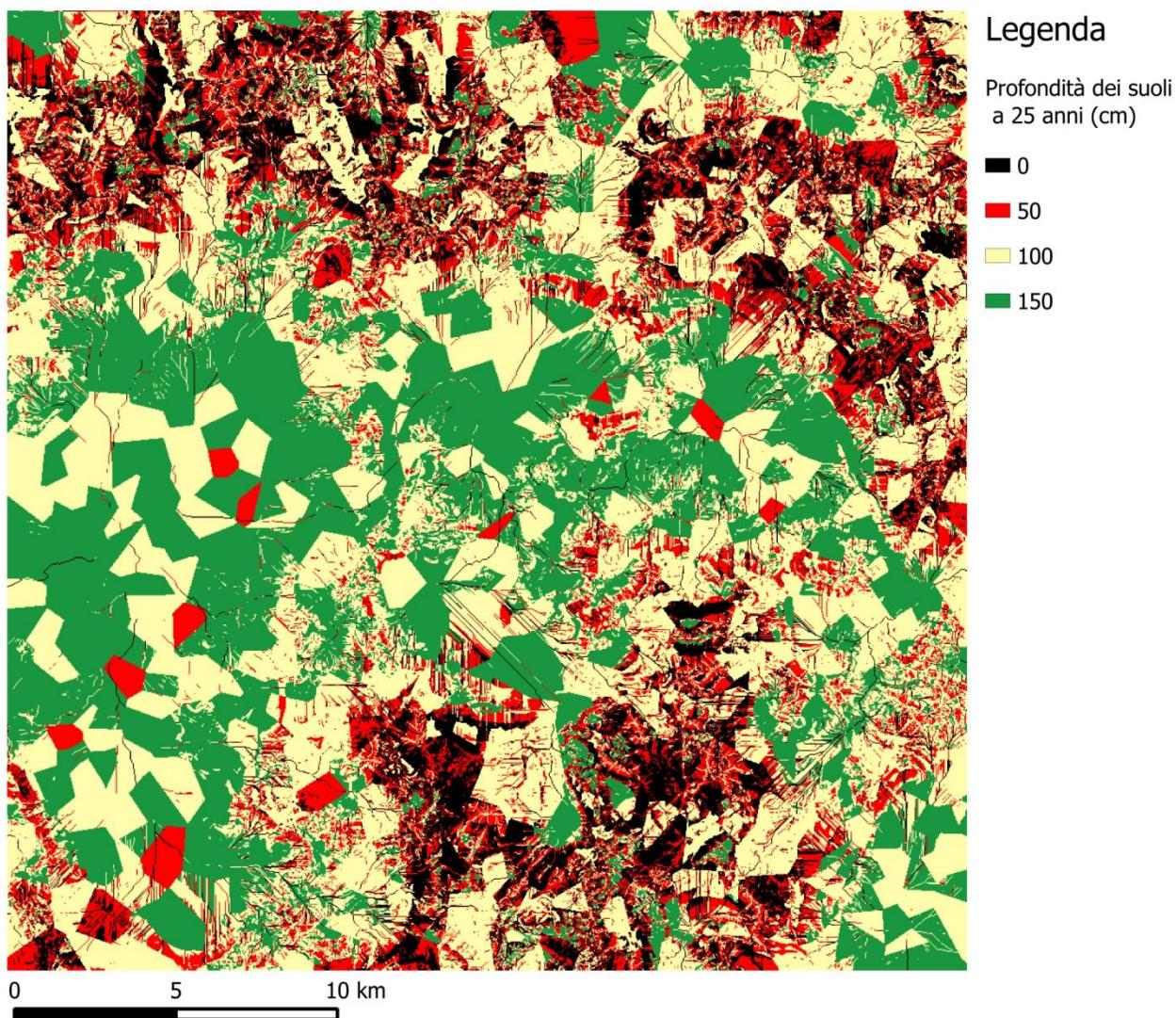
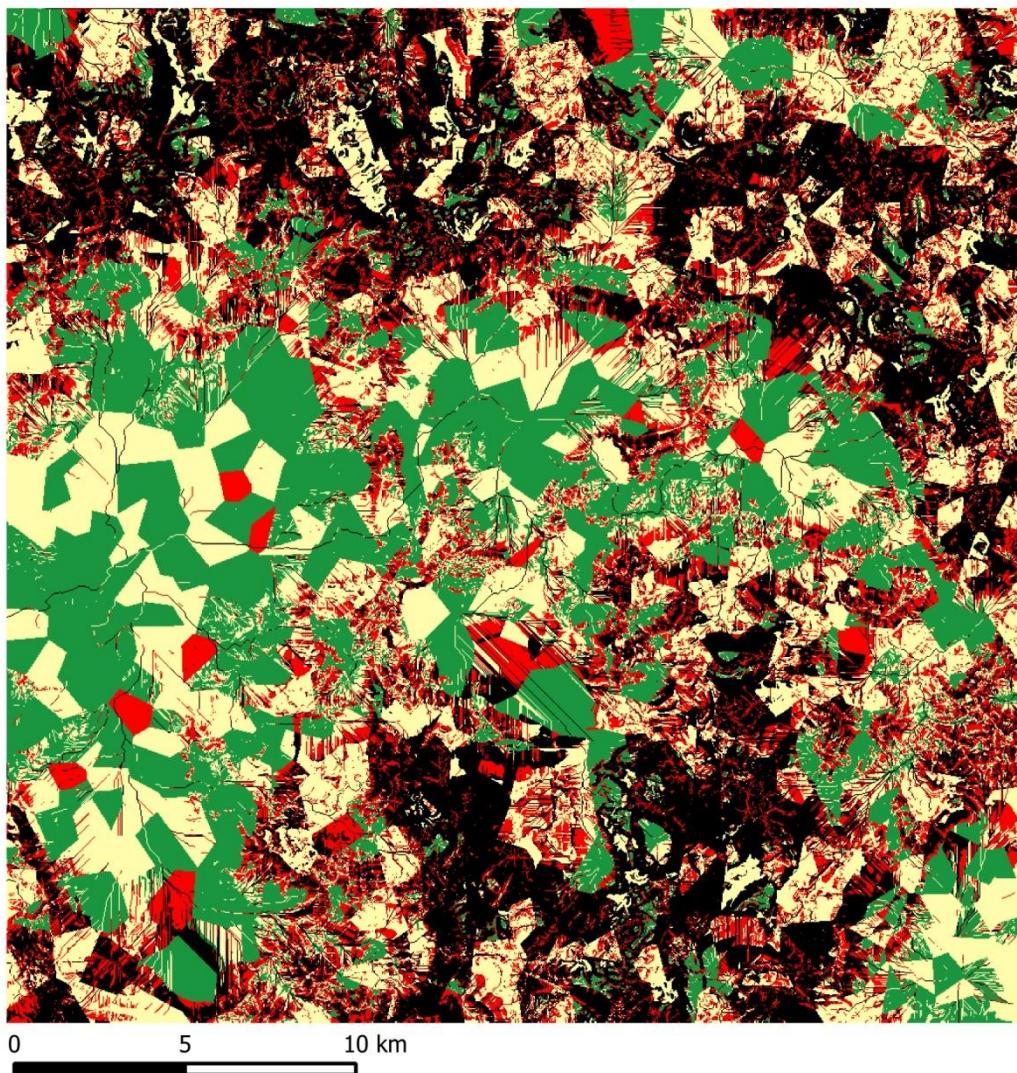


Figura 5.4 Mappa della profondità dei suoli dopo 25 anni.



Legenda

Profondità dei suoli
a 50 anni (cm)

- 0
- 50
- 100
- 150

Figura 5.5 Mappa della profondità dei suoli dopo 50 anni.

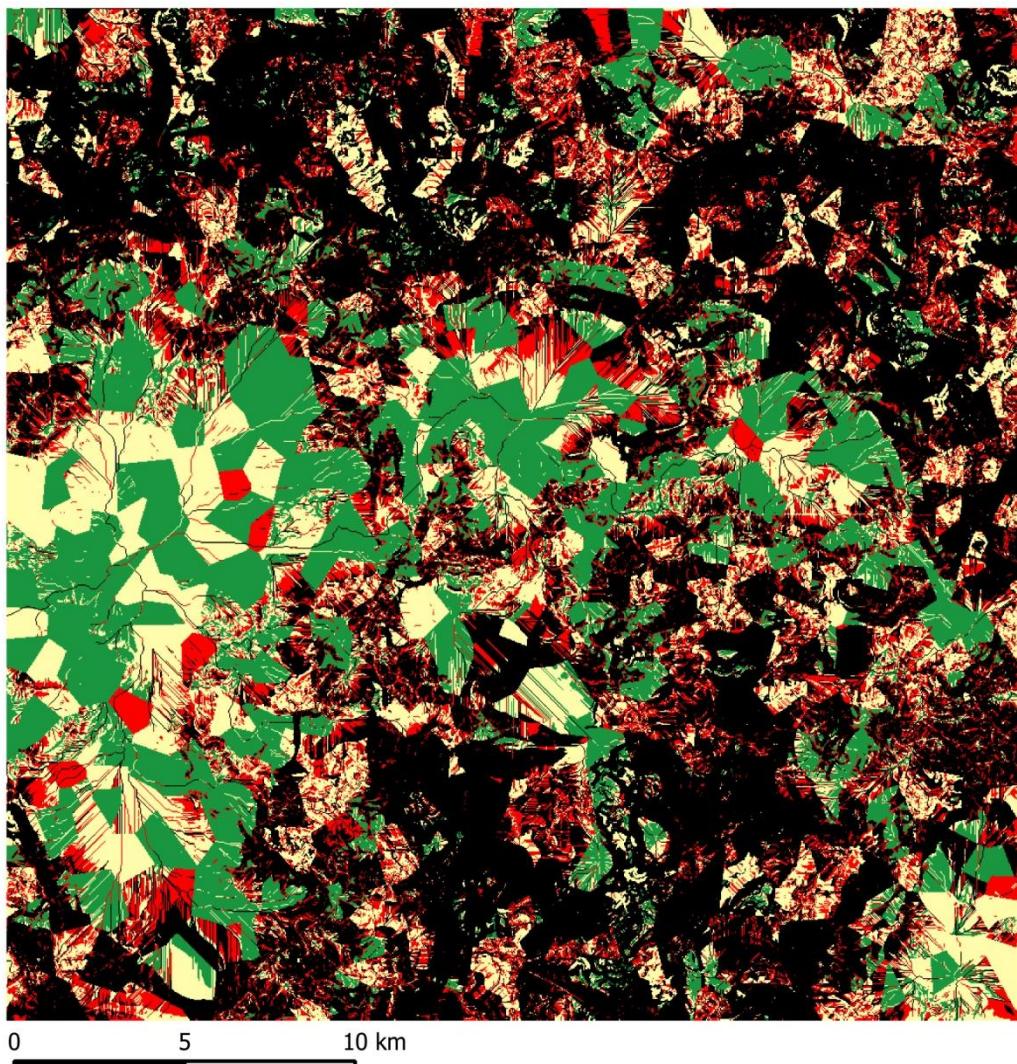


Figura 5.6 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni.

Nell'arco di 100 anni i processi erosivi hanno determinato la variazione percentuale delle categorie di profondità, secondo quanto riportato in tabella 5.3 rispetto alla tabella 5.2.

Tabella 5.3 Ripartizione percentuale dei suoli in figura 5.6, in accordo con la distribuzione delle AEZ virtuali.

		Ripartizione categorie di profondità (%)				Totale (%)
		Suolo completamente eroso	0-50 cm	50-100 cm	100-150 cm	
Ripartizione categorie di pendenza	0-8°	13,80	7,54	13,19	18,05	52,58
	8-16°	17,07	3,87	2,40	0,04	23,39
	16-30°	12,86	1,81	1,20	0,00	15,86
	> 30°	5,18	0,50	2,48	0,00	8,16
Totale (%)		48,92	13,72	19,27	18,09	100,00

L'effettiva quantità in termini di tonnellate di suolo eroso è rappresentata in tabella 5.4. La tabella riporta la perdita di suolo totale e parziale, limitatamente ad alcune aree con precise caratteristiche di quota e pendenza, considerando la profondità massima dei suoli definita dalla mappa in figura 5.2.

Tabella 5.4 Perdita di suolo complessiva, espressa in tonnellate, risultante dall'azione dei processi erosivi per un arco temporale di 100 anni.

	Tonnellate di suolo erose	Rapporto percentuale al totale
Suolo eroso totale	$6,3790 \times 10^{10}$	100
Suolo eroso su pendenze iniziali superiori ad 8°	$3,4925 \times 10^{10}$	54,75
Suolo eroso a quote superiori a 600 m	$2,4362 \times 10^{10}$	38,19
Suolo eroso su pendenze iniziali superiori ad 8° e a quote superiori a 600 m	$2,0368 \times 10^{10}$	31,93

Nelle tabelle 5.5 e 5.6 sono riportate, rispettivamente, le percentuali d'estensione delle categorie di profondità dei suoli prima e dopo l'effetto di 100 anni di processi erosivi, rispetto alla dislocazione delle AEZ virtuali. Le AEZ suddivise in 33 categorie sono qui riclassificate in sei livelli di limitazioni crescenti, in accordo con le tabelle 4.3 e 4.4 che definiscono i criteri e i codici con cui sono state costruite le zone agro ecologiche. Il codice usato per riclassificare le AEZ è il seguente:

CASE

```
WHEN AEZ = 111111 THEN 1
WHEN AEZ = 111112 THEN 4
WHEN AEZ = 111211 THEN 3
WHEN AEZ = 111311 THEN 4
WHEN AEZ = 112122 THEN 6
WHEN AEZ = 121111 THEN 3
WHEN AEZ = 121211 THEN 4
WHEN AEZ = 121311 THEN 5
WHEN AEZ = 131111 THEN 4
WHEN AEZ = 131311 THEN 6
WHEN AEZ = 211111 THEN 2
WHEN AEZ = 211211 THEN 3
WHEN AEZ = 211311 THEN 4
WHEN AEZ = 221111 THEN 3
WHEN AEZ = 221211 THEN 4
WHEN AEZ = 221311 THEN 5
WHEN AEZ = 231111 THEN 4
WHEN AEZ = 231311 THEN 6
WHEN AEZ = 311111 THEN 3
WHEN AEZ = 311211 THEN 4
WHEN AEZ = 311311 THEN 5
WHEN AEZ = 321111 THEN 4
WHEN AEZ = 321211 THEN 4
WHEN AEZ = 321311 THEN 6
WHEN AEZ = 331111 THEN 5
WHEN AEZ = 331311 THEN 6
WHEN AEZ = 411111 THEN 4
WHEN AEZ = 411211 THEN 5
WHEN AEZ = 421111 THEN 5
WHEN AEZ = 421211 THEN 6
WHEN AEZ = 421311 THEN 6
WHEN AEZ = 431111 THEN 6
WHEN AEZ = 431311 THEN 6
END
```

Tabella 5.5 Cross-tabulazione della mappa delle categorie di profondità iniziale dei suoli (Figura 5.2), rispetto ad una riclassificazione a sei livelli delle limitazioni complessive degli usi del suolo per i criteri definiti dalle AEZ (ev. con ridotta limitazione di pendenza).*

	Ripartizione categorie di profondità (%)			
	0-50 cm	50-100 cm	100-150 cm	Totale (%)
Nessuna limitazione (AEZ 111111)	0,00	0,00	14,26	14,26
Limitazione ridotta (AEZ 211111 -pendenza 8-16°)	0,00	0,00	0,50	0,50
Una limitazione significativa *	0,00	28,10	0,64	28,75
Una limitazione elevata o più limitazioni significative *	2,47	9,50	19,82	31,79
Una limitazione elevata e una significativa *	1,74	12,26	0,07	14,08
Molteplici limitazioni significative ed elevate *	2,86	7,56	0,20	10,63
Totale (%)	7,08	57,43	35,49	100

Tabella 5.6 Cross-tabulazione della mappa della profondità dei suoli sottoposti a 100 anni di processi erosivi (Figura 5.6), rispetto ad una riclassificazione a sei livelli delle limitazioni complessive degli usi del suolo per i criteri definiti dalle AEZ (* ev. con ridotta limitazione di pendenza).

	Ripartizione categorie di profondità (%)				
	Suolo completamente eroso	0-50 cm	50-100 cm	100-150 cm	Totale (%)
Nessuna limitazione (AEZ 111111)	7,23	2,34	2,72	1,96	14,26
Limitazione ridotta (AEZ 211111 -pendenza 8-16°)	0,48	0,02	0,00	0,00	0,50
Una limitazione significativa *	17,65	5,27	5,67	0,15	28,75
Una limitazione elevata o più limitazioni significative *	12,40	1,20	2,27	15,92	31,79
Una limitazione elevata e una significativa *	6,82	2,33	4,92	0,00	14,08
Molteplici limitazioni significative ed elevate *	4,33	2,56	3,68	0,05	10,63
Totale (%)	48,92	13,72	19,27	18,09	100

Le simulazioni sono state effettuate anche con i *layer* del fattore R associati alle variazioni positive dei regimi pluviometrici previsti dalle RCP 2.6 e 8.5 del quinto *report* IPCC. Le mappe nelle figure 5.7 e 5.8 presentano la profondità dei suoli dopo 100 anni, in accordo con gli incrementi: +0,07 mm/giorno e +0,16 mm/giorno.

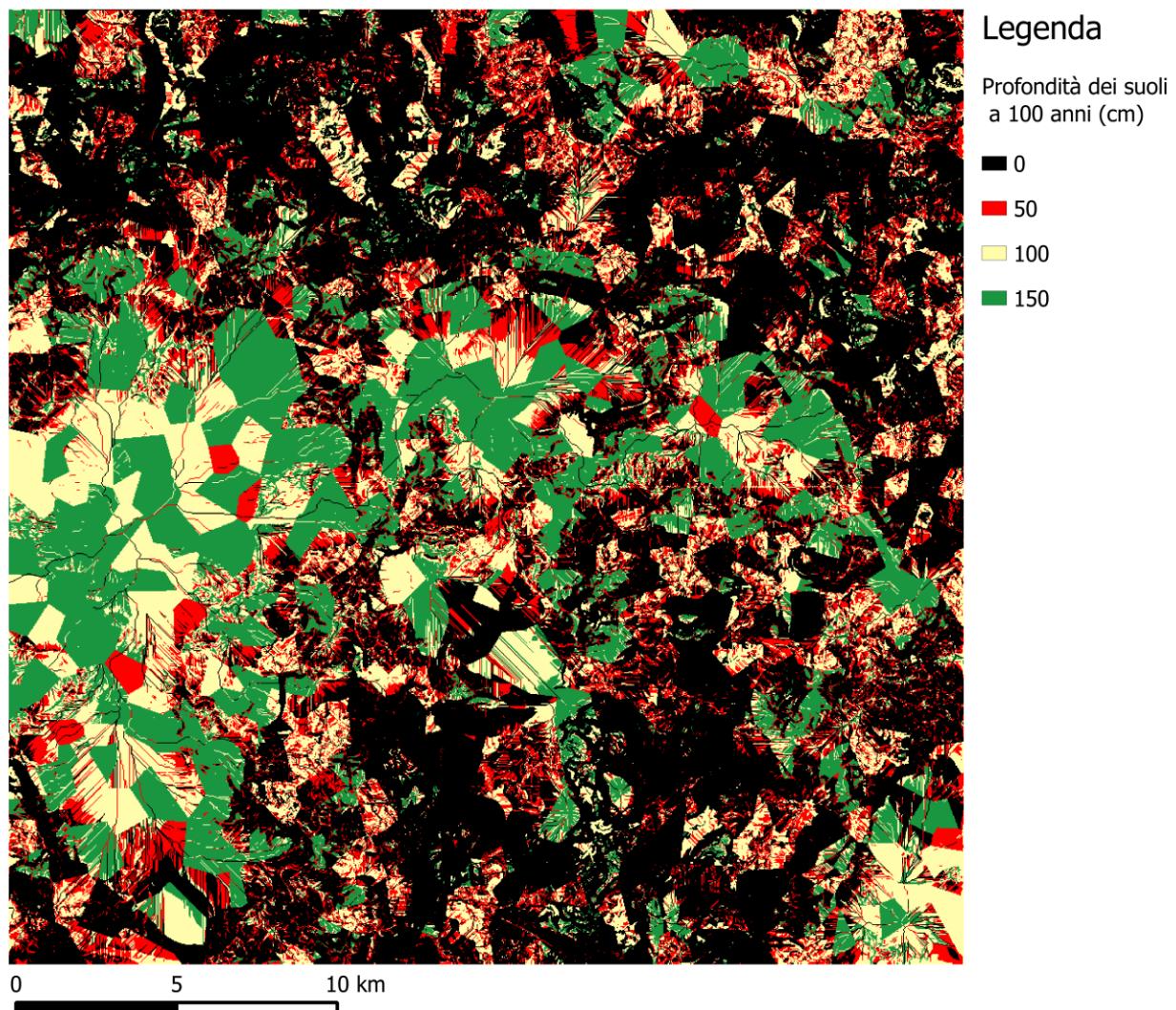


Figura 5.7 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni (precipitazioni: +0,07 mm/giorno).

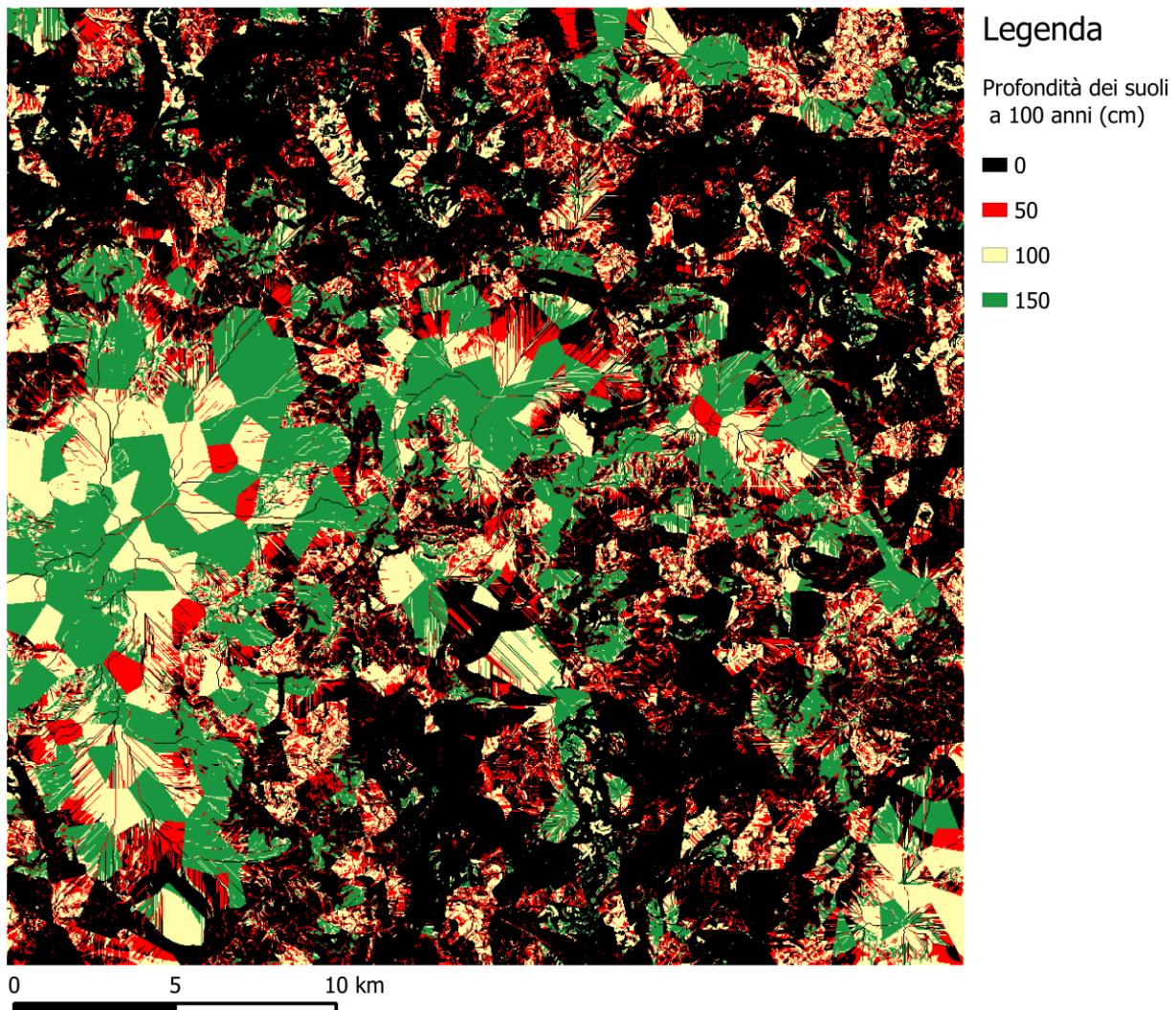


Figura 5.8 Mappa della profondità dei suoli dopo 100 anni (precipitazioni: + 0,16 mm/giorno).

La tabella 5.7 presenta il confronto delle ripartizione percentuale delle categorie di profondità fra scenario relativo ai dati di precipitazione attuali (c0306010_DatiMeteo) e gli scenari d'erosione risultanti dagli incrementi dei regimi pluviometrici globali (Figure 5.7 e 5.8). La tabella 5.8 presenta invece un confronto basato sulle quantità assolute di suolo eroso nei diversi scenari, espresse in tonnellate, assumendo le profondità massime dei suoli definite dalla mappa in figura 5.2.

Tabella 5.7 Confronto delle ripartizione percentuale delle categorie di profondità con i dati di precipitazione reali e in accordo gli incrementi dei regimi pluviometrici previsti dalle RCP 2.6 e 8.5 del quinto report IPCC.

Categorie di profondità dei suoli	Estensione iniziale delle categorie di profondità dei suoli (%)	Scenari d'erosione dopo 100 anni: estensione delle categorie di profondità dei suoli (%)		
		Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo"	Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo" + 0,07 mm/giorno	Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo" + 0,16 mm/giorno
150-100 cm	35,38	18,09	17,82	17,49
100-50 cm	57,53	19,27	18,95	18,50
50-0 cm	7,09	13,72	13,53	13,32
Suoli completamente erosi	0	48,92	49,71	50,69

Tabella 5.8 Perdita di suolo complessiva, espressa in tonnellate, risultante da differenti scenari d'erosione.

Scenari d'erosione dopo 100 anni: suolo eroso totale	Tonnellate di suole erose	Incremento percentuale
Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo"	$6,3790 \times 10^{10}$	100
Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo" + 0,07 mm/giorno	$6,4427 \times 10^{10}$	101,00
Dati precipitazioni "c0306010_DatiMeteo" + 0,16 mm/giorno	$6,5207 \times 10^{10}$	102,22

6 Discussione

In figura 6.1 è riproposta la figura 2.1 con una terza colonna che presenta ulteriori applicazioni e potenziali miglioramenti esplorabili, rispetto alle fasi metodologiche identificate in questa tesi, per la generazione di territori virtuali e la costruzione di simulazioni e scenari.

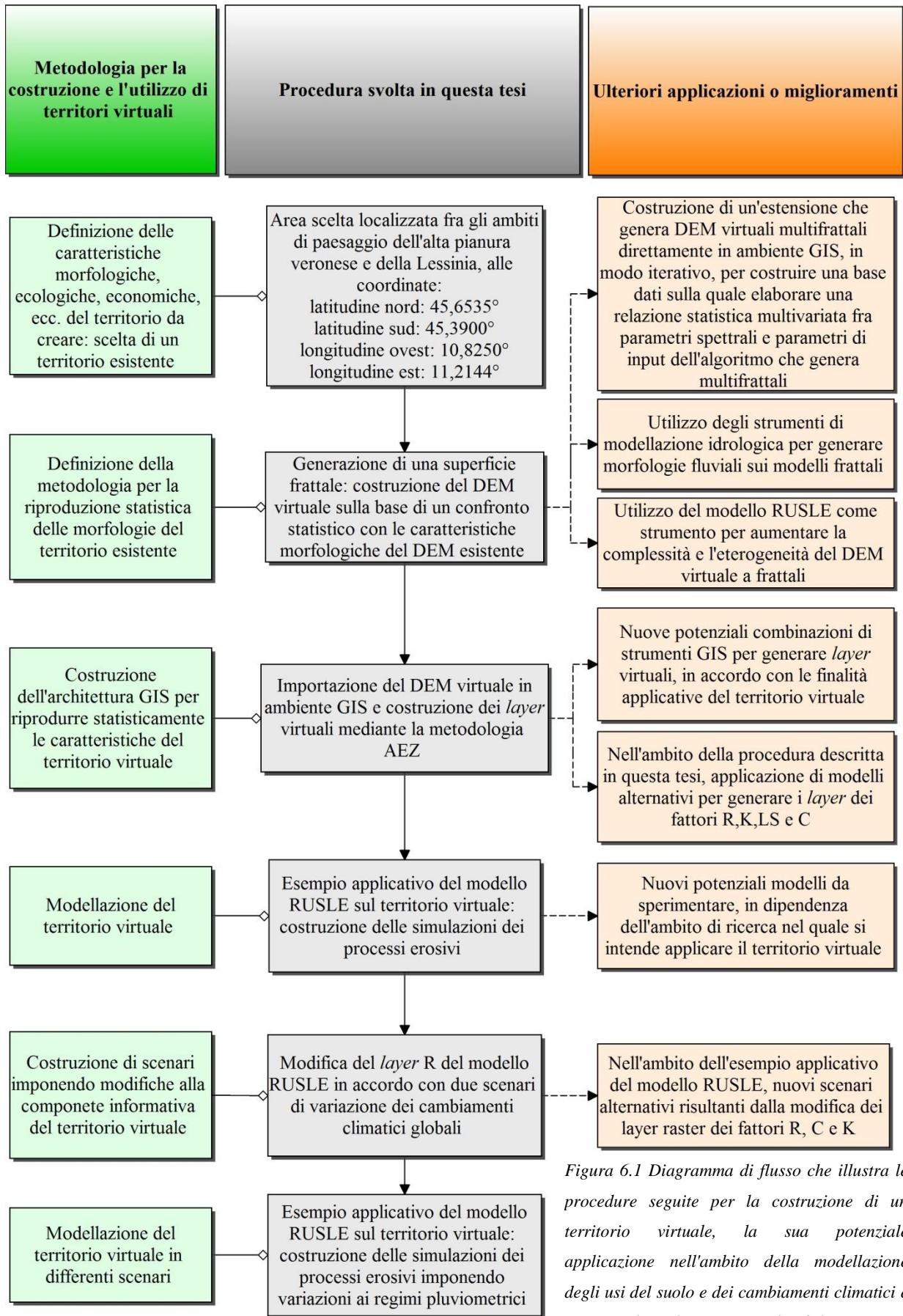


Figura 6.1 Diagramma di flusso che illustra le procedure seguite per la costruzione di un territorio virtuale, la sua potenziale applicazione nell'ambito della modellazione degli usi del suolo e dei cambiamenti climatici e i potenziali miglioramenti esplorabili.

6.1 Generazione di paesaggi a frattali

La prima fase della costruzione di un territorio virtuale è la generazione di un superficie statisticamente simile a quella del territorio prescelto da riprodurre (Lessinia ed alta pianura veronese). Non è necessario che il modello digitale creato riproduca l'esatta dislocazione dei rilievi. L'obiettivo è stato quello di costruire una nuova superficie con una propria morfologia dei rilievi ma con caratteristiche fisiche confrontabili con quelle del territorio esistente. La soluzione adottata per raggiungere questo obiettivo è stata la generazione di superfici frattali, in quanto gli stessi rilievi naturali presentano morfologie frattali dotate di auto-similarità statistica. Il metodo non è comunque in grado di riprodurre morfologie non frattali risultanti da eventi distinti ed incorrelati (Ebert et al. 2003).

La generazione di paesaggi monofrattali presenta dei limiti intrinseci alla loro natura. Nelle figure 3.1 e 3.2 si vede come la qualità delle superfici degradi verso una superficie di trend, nel tentativo di rimuovere l'effetto dato dal dislivello dei confini dei singoli DEM assemblati. Inoltre considerando la dimensione frattale associata alle pendenze medie (Tabella 2.3) la differenza fra i DEM generati è visivamente molto limitata poiché è stato ricostruito l'andamento medio delle superfici impiegando i monofrattali. Questi per loro natura non posseggono la variabilità tipica delle superfici naturali, a differenza dei multifrattali.

Viceversa i multifrattali sono strutturalmente più complessi e, per la loro generazione, richiedono la definizione di una serie di parametri che dipendono dal tipo di superficie a frattali che si vuole creare. Il pannello (Figura 2.5) in cui impostare i diversi parametri in "ANT Landscape" offre la possibilità di selezionare tipo e funzione di base e, in dipendenza di questi, gli altri parametri.

Per questo studio è stata impiegato un tipo di multifrattale noto come "*ridge multifractal*" in quanto particolarmente efficace per produrre morfologie tipiche dei paesaggi montani, con alternanza di rilievi e aree vallive. Gli altri parametri sono stati definiti nel modo descritto al paragrafo 3.2. Su questa base sono stati costruiti sei diversi paesaggi ed è stata trovata una relazione fra la variazione del parametro "*Dimension*" e lo spettro di potenza medio nel dominio delle frequenze. L'idea di base consiste nella decomposizione di DEM (sia virtuali che esistenti) con la stessa risoluzione spaziale e dimensione delle celle, per ottenere raster dello spettro di potenza strutturalmente uguali, dove cioè ogni pixel assume una ben definita frequenza e l'entità dell'ampiezza d'onda diviene il metro di confronto. L'ampiezza è il grado di risonanza con cui si trova una precisa frequenza in un DEM. Su questa base, da una confronto effettuato mediante regressione dello spettro di potenza

delle mappe esistente e virtuale (con "Dimension" pari a 0,41), è stato stimato un coefficiente di correlazione di Pearson di 0,79: ciò implica una correlazione da moderata a forte fra gli spettri di potenza dei DEM alle medesime frequenze. Da un'ulteriore variazione del parametro "Dimension" non si riesce ad ottenere un coefficiente di correlazione di Pearson più alto. Si può supporre quindi che per raggiungere questo obiettivo sia necessario modificare gli altri parametri di "ANT Landscape". Visti i tempi necessari per costruire un paesaggio su Blender, importarlo e modificarlo, sarebbe necessario costruire un'estensione in un software GIS in grado di implementare gli algoritmi per la generazione di superfici a frattali in una sorta di processo iterativo che confronta i raster del spettro di potenza dei DEM virtuali e reale. Il confronto di ciascun DEM creato ad ogni iterazione dovrebbe quindi permettere di aggiustare i parametri per la generazione dalla superficie frattale successiva sulla base della distanza in termini di correlazione dello spettro di potenza alle medesime frequenze. Alternativamente la generazione iterativa di paesaggi virtuali potrebbe permettere di costruire una base dati sufficiente per la definizione di un'equazione che combini lo spettro di potenza medio, non solo con la dimensione frattale, ma anche con gli altri parametri di input necessari per generare le superfici frattali. In qualsiasi caso, l'RMSE fra spettri di potenza potrebbe rappresentare un parametro oggettivo che quantifica la differenza fra i DEM virtuale ed esistente. Nel caso dei frattali di tipo ridge multifractal sarebbe necessario trovare la migliore combinazione fra i parametri "*Dimension*", "*Height*", "*Gain*" ed "*Offset*", eventualmente provando differenti "*Random seed*". Non esiste invece un metodo preciso per scegliere il tipo e la funzione di base: il tipo "ridge multifractal" è stato scelto in quanto funzionale alla costruzione di un ambiente montano; la funzione "Perlin" rappresenta una delle funzioni matematiche più famose e maggiormente impiegate nell'ambito della generazione delle morfologie frattali. Modificando tipo e funzione di base, a parità degli altri parametri, si otterrebbero DEM virtuali completamente diversi. Per questo motivo la loro scelta dovrebbe dipendere dall'operatore piuttosto che essere parte integrante di un processo iterativo. Infine, se una superficie è il risultato di processi che determinano morfologie non frattali queste non possono essere riprodotte con algoritmi basati sulla logica frattale (Ebert et al. 2003). Un processo iterativo basato su un confronto a posteriori potrebbe quindi generare un paesaggio virtuale quanto più morfologicamente "vicino" ad uno esistente, ma fenomeni come, ad esempio, l'incisione delle valli ad opera dell'erosione fluviale o i movimenti tettonici, dovrebbero essere modellati con altri metodi.

Per la parte successiva di questo lavoro di tesi è stato impiegato il DEM virtuale ottenuto dalla semplice regressione lineare basata solo sullo spettro di potenza medio (quindi sul contributo medio

del quadrato delle ampiezze), fissati gli altri parametri definiti al paragrafo 3.2. La motivazione è che dal confronto dei raster dello spettro di potenza dei DEM virtuale ed esistente ne deriva un livello di correlazione abbastanza alto ($r = 0,79$), mentre le statistiche in (Tabella 3.4) presentano valori comparabili.

6.2 Generazione dei *layer* informativi del modello RUSLE

La generazione dei *layer* dei fattori del modello RUSLE ha una duplice finalità:

- la costruzione della complessa architettura GIS che costituisce il territorio virtuale, insieme alla superficie frattale;
- la dimostrazione della dimensione pratica dell'utilizzo dei territori virtuali per costruire simulazioni e scenari.

In questa tesi si propone l'esempio dell'applicazione del modello RUSLE come metodo per costruire simulazioni e scenari dei processi erosivi in relazione ad usi specifici del suolo: agricoltura dipendente dall'acqua piovana.

Il fattore R (Figura 4.1) è stato generato a partire dai dati pluviometrici (Tabella 4.1) ottenuti da stazioni meteorologiche ARPAV dislocate in sei comuni nell'area del territorio esistente. I dati ottenuti dalla stazione nel comune di Crespadoro, per la sua localizzazione e per la differenza significativa nei dati delle precipitazioni annuali rispetto alle altre stazioni, sono stati impiegati per definire il fattore R per le aree montane ossia a quote superiori a 600 m. Le altre cinque stazioni sono state invece impiegate come base dati per le aree di pianura e collina, in considerazione della loro disposizione sul territorio esistente.

Il fattore LS (Figura 4.2) è frutto unicamente delle morfologie frattali generate: ne consegue che, nell'equazione della RUSLE, il suo contributo è tanto più efficace quanto meglio si è riusciti a controllare i parametri di ANT Landscape per generare le superfici frattali dotate delle caratteristiche desiderate. Nello specifico sono presenti valori molto alti dell'UCA in alcuni pixel del DEM, disposti secondo una precisa direzione. Questi valori identificano sequenze di pixel interpretabili come aree che ricevono un elevato flusso d'acqua da ampie aree adiacenti. Il risultato è che in questi pixel l'erosione idrica superficiale è particolarmente marcata e probabilmente, se si trattasse di territorio esistente, in queste aree avrebbe potuto svilupparsi un alveo fluviale. Tuttavia la RUSLE è un modello che serve per quantificare l'erosione dei suoli e non l'erosione fluviale. L'abbozzata canalizzazione che si produce per la presenza di alti valori dell'UCA non è quindi da

intendersi come la vera e propria costruzione di una ramificazione fluviale virtuale. In ogni caso è possibile trarre due conclusioni:

- gli strumenti di modellazione idrologica dei software GIS, in seguito all'applicazione della RUSLE in un certo arco temporale, hanno incrementato la complessità del DEM virtuale secondo un preciso significato ambientale;
- l'impiego dei frattali ha dimostrato un comportamento conforme ai risultati attesi, secondo i quali la costruzione di morfologie fluviali può essere problematica, basandosi unicamente sulla generazione procedurale di superfici. Si può ipotizzare il superamento di tale limite con gli strumenti di modellazione idrologica di cui sono dotati i software GIS.

Per questi motivi, dal punto di vista pratico, l'applicazione del modello RUSLE su un DEM virtuale potrebbe assumere anche un fine differente rispetto a quello presentato in questa tesi: potrebbe essere impiegato in una prima fase di costruzione del DEM virtuale per conferire alle superfici una maggiore complessità ed eterogeneità tipica dei paesaggi reali.

I fattori C (Figura 4.4) e K (Figura 4.6) dipendono dal metodo impiegato per costruire una topologia di vettori dotati di un significato preciso in relazione alla variabilità delle caratteristiche di copertura del suolo e tessiturali presenti nel territorio esistente. Per il fattore C la procedura impiegata consiste nella generazione di un *layer* di poligoni (Figura 4.3) che riproduce la proporzione percentuale (Tabella 4.7) delle caratteristiche dominanti identificate nei suoli del paesaggio esistente, tramite il metodo AEZ. Su questa base, per ogni poligono, sono stati attribuiti i valori disponibili in letteratura del fattore C (Tabella 4.8), ponderati sulle percentuali di copertura del suolo calcolate nel paesaggio esistente, e i valori del fattore K, per i quali è stata assunta una composizione media per le categorie "tessitura grossolana" e "tessitura media/moderatamente fine" (Tabella 4.10).

La tabella 5.1 riporta una cross-tabulazione delle categorie di pendenza rispetto alla mappa raster di output del modello RUSLE, riclassificata in quattro categorie di rischio incrementale, in accordo con la categorizzazione proposta da Bosco e Olivieri (2008). Nelle Alpi l'elevata estensione delle aree soggette ad erosione, che presentano un rischio significativo, dipende principalmente da una combinazione di fattori morfologici (LS) e di copertura (C). Inoltre il modello RUSLE non considerando la sedimentazione del materiale eroso tende a sovrastimare il fenomeno dell'erosione (Bosco and Olivieri 2008). Complessivamente nelle Alpi, Bosco e Olivieri (2008) rilevano un medio rischio erosivo per circa il 50% della loro estensione, un basso rischio per il 18% e un alto rischio per il 32%. La tabella 5.1 restituisce una situazione che presenta un rischio complessivamente maggiore per il territorio esistente rispetto alla situazione generale delle Alpi. Si

osserva una incremento del rischio erosivo con le categorie di pendenza e un alto rischio in aree a basse pendenze, quest'ultimo attribuibile alle aree nelle quali il fattore LS determina la formazione di un'abbozzata canalizzazione dovuta ad un elevato deflusso idrico (UCA). Nel caso specifico lavorando con dati a maggior risoluzione rispetto all'output del modello RUSLE, i valori del raster ottenuto non sono rappresentativi dell'estensione dei pixel ed è stato necessario rapportarli alla risoluzione corretta. Ciò implica una maggior variabilità dei valori dipendente dalla risoluzione scelta (29,0142x29,0142), rispetto a valori medi rappresentativi di superfici maggiori a risoluzioni minori (100x100 ossia un ettaro). Nel complesso, il risultato è largamente dipendente dal fattore LS e, indirettamente, dall'efficacia con cui si riesce a creare il DEM virtuale, nonché dai molteplici modelli impiegabili per costruire i *layer* virtuali. In letteratura sono disponibili numerosi modelli (Bosco and Olivieri 2008; van der Knijff, Jones and Montanarella 2000) per applicare la RUSLE e la loro efficacia può dipendere dal contesto nel quale vengono applicati.

In conclusione, i *layer* virtuali sono il risultato di una sequenza di approssimazioni logiche che mirano a riprodurre le caratteristiche dominanti del paesaggio esistente. Tali approssimazioni definiscono il livello di complessità del territorio che si vuole replicare o costruire. Un territorio virtuale per sua natura presenta unicamente i limiti imposti da colui che l'ha costruito, compatibilmente con gli obiettivi prefissati. DEM virtuale a parte (generato con Blender), le procedure impiegate per costruire i *layer* informativi per applicare la RUSLE rappresentano un esempio di come è possibile impiegare i software GIS per costruire un'architettura di mappe virtuali sulla cui base sperimentare e testare modelli.

6.3 Simulazioni e scenari

Le simulazioni effettuate sulla base della mappa raster, prodotta applicando il modello RUSLE, sono il risultato di come si possa testare modelli in un ambiente virtuale controllato per analizzare fenomeni nelle condizioni definite da particolari fattori economici e climatici e dalla base dati disponibile. L'infrastruttura informativa creata può in seguito essere rielaborata, imponendo variazioni a precise caratteristiche, per costruire scenari relativamente ai processi che sono determinati o dipendono proprio dalla componente informativa modificata.

L'esempio presentato in questa tesi consiste nell'applicazione del modello RUSLE per costruire simulazioni dei processi erosivi in un arco temporale di 100 anni, considerando anche differenti

scenari di variazione di tali processi in dipendenza del cambiamento dei regimi pluviometrici, conseguente al cambiamento climatico.

Sulla base dei valori di densità apparente attribuiti alle diverse classi tessiturali, è stata calcolata la riduzione di quota annuale (Figura 4.9) con la precisione desiderata per effettuare delle simulazioni a video, rappresentando l'evoluzione di una mappa dei suoli rispetto alle dinamiche erosive.

Il territorio virtuale creato presenta una pendenza inferiore ad 8° per il 52,58% della sua estensione (AEZ con codice 1*****) (Tabella 5.2). I suoli poco profondi (AEZ con codice *3****) costituiscono solo il 7,09% dell'area mentre sono dominanti i suoli moderatamente profondi (AEZ con codice *2****) con un'estensione del 57,53%. I suoli profondi (AEZ con codice *1****) costituiscono il 34,18% dell'intera estensione dell'area ma il 96,62% di questi è situato a pendenze inferiori a 8°.

La simulazione è stata effettuata sottponendo il territorio virtuale al modello erosivo per un arco temporale di 100 anni. La metodologia AEZ identifica, secondo determinati criteri, l'idoneità delle aree per l'agricoltura dipendente dall'acqua piovana. Nella simulazione ogni cambiamento del colore dei pixel identifica una variazione del codice a sei cifre (la seconda cifra da sinistra) e quindi una transizione di AEZ. Ciascuna transizione implica un cambiamento dell'attitudine dei suoli virtuali (indirettamente tramite le caratteristiche dominanti definite dall'AEZ stessa) e permette allo sperimentatore di effettuare previsioni nel contesto virtuale da lui stesso costruito.

Considerando le categorie di pendenza della mappa dei suoli iniziale, dopo cento anni i suoli profondi costituiscono solo il 18,05% dell'estensione della mappa e non sono più presenti laddove le pendenze superavano i 16° (Tabella 5.3). I suoli moderatamente profondi e quelli sottili si estendono rispettivamente per il 19,27% e per il 13,72% del territorio virtuale. Il 75,92% dei suoli rimasti è concentrato nelle aree a pendenze inferiori a 8°. La riduzione dell'estensione dei suoli nell'area, conseguente all'erosione, si è verificata maggiormente nei suoli moderatamente profondi a pendenze iniziali comprese fra 8-16° e 16-32°, i quali presentano una perdita rispettivamente dell'88,37% e del 91,35%. I suoli sottili in aree pianeggianti hanno invece registrato un incremento del 451,50% e inizialmente occupavano solo l'1,67%. La frazione di suoli completamente erosa costituisce il 48,92% del totale iniziale e il 71,79% di questa risulta dell'erosione delle superfici con pendenza iniziale superiore a 8° che costituiscono il 47,42% dell'estensione del territorio virtuale. Ciò spiega perché, come si può vedere in figura 5.6, dopo un arco temporale di 100 anni i suoli a basse pendenze hanno conservato in misura maggiore la propria integrità. Questi confronti tuttavia si basano sui dati di estensione dei suoli iniziali e finali e non tengono conto dell'erosione parziale

dei suoli (ad esempio quelli che non hanno subito una transizione di AEZ). La perdita di suolo effettiva, conseguente a 100 anni di azione dei processi erosivi, si attesta a $6,3790 \times 10^{10}$ tonnellate (Tabella 5.4). In considerazione dell'estensione e della dislocazione delle aree dove si è verificata l'erosione completa dei suoli, è stata calcolata la perdita di suolo, espressa in tonnellate, in zone con precise caratteristiche morfologiche. Ne è risultato che le superfici con pendenza maggiore di 8° , che si estendono per il 47,42% dell'area, hanno subito una perdita complessiva di $3,4925 \times 10^{10}$ tonnellate di suolo, di cui oltre la metà a quote superiori a 600 m. Questo valore rappresenta circa la metà della massa erosa totale. Ciò può dipendere dal fatto che nelle zone pianeggianti, con pendenze inferiori a 8° , è presente una dominanza di suoli profondi. In queste aree, dopo un arco temporale di 50 anni, le dinamiche erosive avanzano, seppur lentamente, mentre in aree a maggior pendenza, in corrispondenza dei rilievi, si osserva una rapida degradazione dei suoli che determina in breve tempo la fine dei processi erosivi (Figura 5.5).

Considerando invece la finalità pratica delle zone agro-ecologiche, le tabelle 5.5 e 5.6 sono esplicative della distribuzione iniziale e finale dei suoli rispetto all'area iniziale delle stesse AEZ.

L'AEZ priva di limitazioni (111111) costituisce il 14,26% dell'estensione del territorio virtuale.

Dopo 100 anni:

- solo l'1,96% preserva la propria integrità;
- il 7,23% viene completamente eroso;
- il 7,03% subisce una transizione di AEZ rispetto alla categoria di profondità.

I suoli nell'AEZ che presenta soltanto una ridotta limitazione di pendenza sono stati completamente erosi od hanno subito una transizione di AEZ.

Nel complesso il 43,51% del territorio virtuale comprende le aree prive di limitazioni o con, eventualmente, con una ridotta limitazione di pendenza o che presentano al massimo una limitazione significativa (nello specifico, suoli profondi con tendenza alla fessurazione o suoli con profondità non superiore a 100 cm o suoli profondi con pendenza compresa fra 16 e 30°). Dopo 100 anni i processi erosivi hanno determinato una perdita completa di suolo del 58,30% in queste AEZ od una sostanziale transizione di AEZ: i suoli con la sola limitazione significativa legata alla profondità (suoli moderatamente profondi) hanno subito una riduzione quasi dell'80% e di questi solo il 40% non è stato eroso completamente.

Queste simulazioni rappresentano il trend dei processi erosivi nel territorio virtuale rispetto alle caratteristiche imposte e, con un certo livello di approssimazione dipendente dalla complessità dell'ambiente creato, potrebbero rappresentare le dinamiche di tali processi anche nel territorio

esistente. La procedura non pone limiti alla complessità od al tipo di variabili utilizzabili, diversamente da alcuni strumenti ampiamente diffusi nell'ambito della modellazione dei sistemi di usi del suolo. Il modello RUSLE, ad esempio, differisce dai comuni modelli che analizzano il cambiamento dei sistemi di usi del suolo ed è stato impiegato per riprodurre l'evoluzione del territorio virtuale rispetto a caratteristiche fisiche spesso non considerate da questi modelli (paragrafo 1.4). Un ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di modificare l'infrastruttura GIS per osservare l'evoluzione del territorio virtuale creato rispetto alla variazione delle variabili impiegate dai modelli. A dimostrazione della possibilità di rielaborare la componente informativa, la variabile R del modello RUSLE è stata modificata per quantificare l'effetto della variazione dei regimi di precipitazione, conseguente ad un incremento della temperatura media superficiale terrestre in accordo con i due scenari (RCP 2.6 ed RCP 8.5) proposti dal quinto *report* di valutazione dei cambiamenti climatici dell'IPCC. Assumendo un incremento delle precipitazioni di 0,07 mm/giorno (RCP 2.6), in un arco temporale di 100 anni l'estensione dei suoli completamente erosi aumenterebbe dell'1,62% (Tabella 5.7) mentre la massa di suoli erosa subirebbe un incremento dell'1,00%, pari $6,3641 \times 10^8$ tonnellate (Tabella 5.8). Assumendo invece un incremento di 0,16 (RCP 8.5) mm/giorno la perdita di suolo completa coinvolgerebbe più del 50 % dell'estensione dell'area con un incremento del 3,62%, rispetto al regime pluviometrico attuale. In questo secondo caso, la massa di suoli erosa aumenterebbe del 2,22%, pari a $1,4170 \times 10^9$ tonnellate. Nell'ipotesi di voler quantificare le misure anti-erosione necessarie a mitigare l'ulteriore perdita di suolo conseguente ai cambiamenti climatici, è sufficiente calcolare i *layer* dei fattori P, in ambiente GIS, per i diversi scenari.

7 Conclusione

Lo studio dei cambiamenti climatici e degli usi del suolo rappresentano ambiti di ricerca che si avvalgono di conoscenze multi-disciplinari e richiedono lo sviluppo di nuovi strumenti e tecnologie per migliorare la capacità di monitorare nel tempo questi fenomeni. In questo contesto, si è cercato di dimostrare la possibilità di costruire dei territori virtuali, cercando di replicare le caratteristiche morfologiche, ecologiche e di copertura del suolo di ambienti reali, sui quali poter sperimentare e testare i fenomeni alla base dei cambiamenti climatici e degli usi del suolo. Un territorio virtuale è un'infrastruttura di dati fra loro coerenti, sul quale è possibile applicare modelli preesistenti o testare nuovi modelli, per la costruzione di scenari, impiegando una base dati anche ad alta risoluzione (valida a scale da regionale a locale), nonché informazioni biofisiche e geomorfologiche spesso non incluse nella modellazione dei sistemi di usi del suolo. In generale, la procedura per costruire questi territori virtuali non pone limiti ai modelli utilizzabili o alle base dati necessaria per costruirli e non sono esclusivamente utilizzabili nell'ambito di ricerca delle Scienze Ambientali: possono essere applicati in campo economico, ecologico, demografico, ecc. La complessità del territorio creato dipende unicamente dagli scopi dello sperimentatore.

Per la costruzione del modello digitale alla base della componente informativa è stata generata una superficie multirattata in un software di *graphic design* (Blender). A partire dal DEM, l'architettura di *layer* informativi che costituiscono il territorio virtuale è stata generata e rielaborata nei software GIS QGIS/GRASS e IDRISI. Il territorio virtuale è stato creato in modo tale da presentare caratteristiche statisticamente simili ad un territorio esistente, situato fra i monti della Lessinia e l'alta pianura veronese. L'applicazione del modello RUSLE ha avuto lo scopo di dimostrare la potenzialità d'utilizzo del territorio virtuale creato per costruire simulazioni e scenari, senza essere vincolati da modelli dei sistemi di usi del suolo preesistenti. Sono stati presentati i risultati di una simulazione dei processi erosivi della durata di 100 anni, dalla quale è stato possibile caratterizzare le aree ad elevato rischio erosivo rispetto alle caratteristiche fisiche del territorio e rispetto ad una ripartizione dello stesso per categorie agro ecologiche, secondo una specifica finalità d'uso del suolo. La possibilità di estendere i risultati al territorio esistente dipende dal livello di complessità del territorio creato. Tuttavia l'effettivo vantaggio consiste nelle elaborazioni che permettono di modificare l'infrastruttura informativa per poter sperimentare modelli in differenti scenari. In questo

caso sono stati costruiti due scenari di esempio, per i quali è stato ricalcolato il modello RUSLE assumendo due potenziali incrementi dei regimi pluviometrici, conseguenti ai cambiamenti climatici.

I software GIS sono gli strumenti più utili per la generazione e l'elaborazione della componente informativa dei territori virtuali ma non sono dotati di strumenti per generare DEM multifrattali. Ciò ha reso necessario l'utilizzo di diversi software in sequenza. La costruzione dei DEM dei territori virtuali in ambiente GIS potrebbe essere automatizzata e migliorata in un'unica estensione, programmando una procedura di confronto iterativa per generare una base dati di multifrattali (direttamente come immagini raster) e definire una relazione statistica fra i parametri che ne determinano la morfologia e le statistiche calcolabili sul DEM del territorio esistente.

Per le elaborazioni della componente informativa gli strumenti comunemente offerti dai software GIS sono indispensabili. Tuttavia la procedura descritta deve essere adattata agli scopi specifici dello sperimentatore ed ai modelli da applicare nel territorio virtuale.

Bibliografia

- Alexander L. V., Allen S. K., Bindoff N. L. and Bréon F., 2013. "IPCC, 2013: Summary for Policymakers." In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–27.
- Bosco C. and Olivieri S., 2008. "Natural Hazard Report Chapter 3: Soil Erosion in the Alpine Space." In *Strategic INTERREG III B Project CLIMCHALP: Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space*, 1–55.
- Campi A., et al., 2011. *Introduzione Alla Programmazione in Matlab*. Esculapio.
- Cian F., 2014. "Natural Resources and Land Cover/Land Use Change: Trends, Open Issues and Potential of Remote Sensing Technologies." : 1–9.
- Claessens L., et al., 2009. "Modelling Interactions and Feedback Mechanisms between Land Use Change and Landscape Processes." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 129(1-3): 157–170.
- Collins M., et al., 2013. "Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility." In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: 1029–1136.
- Cubasch U., Wuebbles D., Chen D. and Facchini M. C., 2013. "Introduction." In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 119–158.
- Eastman J. R., 2009. *IDRISI Taiga: Guide to GIS and Image Processing - Manual Version 16.02*. eds. Clark Labs, Clark University, and Worcester.
- Ebert D. S., Musgrave F. K., Peachey D., Perlin K. and Worley S., 2003. *Texturing & Modeling: A Procedural Approach*. Elsevier.
- Eliasson Å., 2007. *Review of Land Evaluation Methods for Quantifying Natural Constraints to Agriculture*. The Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, Ispra, (Italy)

EU, 2014. *General Union Environment Action Programme to 2020 - Living Well, within the Limits of Our Planet.*

Ferrari R., et al., 2005. "Assessment of Soil Erosion Estimate Based on a High Temporal Resolution Rainfall Dataset." In *Proc. 7th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), Utrecht, Netherlands*, 12–16.

Florinsky I. V., 2012. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. First. ed. Elsevier. Boston: Academic Press.

Gallant J. C., Moore I. D., Hutchinson F. M. and Gessler. P., 1994. "Estimating Fractal Dimension of Profile: A Comparison of Methods" *Mathematical Geology* 26(4): 455–481.

Giordano A., 1999. *Pedologia*. UTET.

Griffon S., Nespolous A., and Cheylan J.P., 2011. "Virtual Reality for Cultural Landscape Visualization." *Virtual reality* 15(4): 279–294.

Halliday D., Walker J., Resnick R. and Cicala L., 2006. *Fondamenti Di Fisica. Meccanica, Termologia, Elettrologia, Magnetismo, Ottica*. CEA.

Van der Knijff J. M., Jones R. J. A. and Montanarella L., 2000. *Soil Erosion Risk Assessment in Europe*.

Lo A., El-Swaify S. A., Dangler E. W. and Shinshiro L., 1985. "Effectiveness of EI30 as an Erosivity Index in Hawaii." *Soil erosion and conservation*: 384–392.

Meiyappan P., Dalton M., O'Neill B. C. and Jain A. K., 2014. "Spatial Modeling of Agricultural Land Use Change at Global Scale." *Ecological Modelling* 291: 152–174.

Orshoven J. V., et al., 2012. *Updated Common Bio-Physical Criteria to Define Natural Constraints for Agriculture in Europe*.

Porter J. R., et al., 2014. "Food Security and Food Production Systems." In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–82.

Regione Veneto, 2013. *Atlante Ricognitivo Degli Ambiti Paesaggistici (PTRC Del Veneto) - ALLEGATO B3 Dgr N. 427 Del 10/04/2013*.

- Renard K. G., et al., 1997. "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)." *US Department of Agriculture, Agriculture Handbook* 703.
- Romkens M. J. M., Prased S. N. and Poesen J. W. A., 1986. "Soil Erodibility and Properties." In *Trans. 13th Congress of Th Int. Soc. Of Soil Sci.*, Hamburg, Germany, 492–504.
- Saupe D., 1988. "Algorithms for Random Fractals." In *The Science of Fractal Images*, 71–136.
- Steiniger S. and Hunter A.J.S., 2013. "The 2012 Free and Open Source GIS Software map—A Guide to Facilitate Research, Development, and Adoption." *Computers, Environment and Urban Systems* 39: 136–150.
- Toth C. K., et al., 2014. "Spatial Spectrum Analysis of Various Digital Elevation Model." In *ASPRS 2014 Annual Conference*, Louisville, 1–7.
- Verburg P. H., et al. 2002. "Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model." *Environmental Management* 30(3): 391–405.
- Verburg, P. H., Veldkamp, A., and Rounsevell M. D. A., 2006. "Scenario-Based Studies of Future Land Use in Europe." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 1–6.
- Verburg P.H. and Van De Steeg J., 2009. "From Land Cover Change to Land Function Dynamics: A Major Challenge to Improve Land Characterization." *Journal of Environmental Management* 90(3): 1327–1335.
- Voinov A., et al., 1999. "Patuxent Landscape Model: Integrated Ecological Economic Modeling of a Watershed." *Environmental Modelling & Software* 14: 473–491.
- Wischmeier W. H. and Smith D. D., 1978. "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning." *US Department of Agriculture, Washington DC, Agricultural Handbook* (537): 1–58.

Sitografia

[1] ESRI Shapefile import/export and georeferenced raster importer

<http://blenderartists.org/forum/showthread.php?277883-Addons-ESRI-Shapefile-import-export-and-georeferenced-raster-importer> [Data ultimo accesso: 16-04-14]

[2] ANT Landscape

http://wiki.blender.org/index.php/Extensions:2.6/Py/Scripts/Add_Mesh/ANT_Landscape
[Data ultimo accesso: 16-04-14]

[3] MATLAB CENTRAL - *File Exchange*

<http://www.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/> [Data ultimo accesso: 17-04-14]

[4] Octave GNU

<https://www.gnu.org/software/octave/about.html> [Data ultimo accesso: 18-04-14]

[5] *Automatic Terrain Generation*

http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39559-automatic-terrain-generation/content/html/terrain_generation_introduction.html

[Data ultimo accesso: 19-04-14]

[6] Funzione di Matlab per estrarre x,y e z di vertici e superfici di *file* in formato obj.

<http://www.alecjacobson.com/weblog/?p=917> [Data ultimo accesso: 02-06-14]

[7] Funzione di Matlab che converte griglie di valori x,y e z in formato Arc ASCII Grid Format

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16176-arcgridwrite>

[Data ultimo accesso: 02-06-14]

[8] Funzione wfbmesti di Matlab

<http://www.mathworks.it/help/wavelet/ref/wfbmesti.html> [Data ultimo accesso: 25-10-14]

[9] Guida al modulo "i.fft" di GRASS

<http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/i.fft.html>

[Data ultimo accesso: 17-11-14]

[10] Corine Land Cover (2000)

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-raster-3>

[Data ultimo accesso: 25-11-14]

[11] Corine Land Cover (1990)

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-1990-raster-3>

[Data ultimo accesso: 25-11-14]

[12] Guida al modulo "v.surf.rst" di GRASS

<http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/v.surf.rst.html> [Data ultimo accesso: 03-01-14]

[13] Guida al modulo "r.watershed" di GRASS

<http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/r.watershed.html>

[Data ultimo accesso: 05-01-15]

[14] *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century*

<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/SAEZ/index.html>

[Data ultimo accesso: 06-01-15]

[15] Densità apparente

<http://www.pedosphere.com/resources/bulkdensity/>

[Data ultimo accesso: 15-01-15]

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il Prof. Giupponi per la pazienza e la disponibilità dimostratemi, per l'aiuto e gli utili suggerimenti per superare le sfide di questa tesi.

Ringrazio il Dr. Mojtahed ed il Dr. Gain per l'aiuto e il supporto, specialmente nella fase iniziale del lavoro di introduzione ai software.

Ringrazio i miei genitori per la loro gentilezza ed il loro supporto costante, che mi ha permesso di arrivare fino in fondo al mio percorso di studi.

Ringrazio infine Silvia, dalla quale ho ricevuto e ricevo costantemente la forza e la motivazione necessarie per affrontare le sfide della vita.

Allegati

Allegato 1

(Ebert et al. 2003)

```
/* Ridged multifractal terrain model.
*
* Some good parameter values to start with:
*
* H:          1.0
* offset: 1.0
* gain: 2.0
*/
double RidgedMultifractal( Vector point, double H, double lacunarity,
                           double octaves, double offset, double gain )
{
    double      result, frequency, signal, weight, Noise3();
    int         i;
    static int first = TRUE;
    static double *exponent_array;

    /* precompute and store spectral weights */
    if ( first ) {
        /* seize required memory for exponent_array */
        exponent_array =
            (double *)malloc( (octaves+1) * sizeof(double) );
        frequency = 1.0;
        for (i=0; i<=octaves; i++) {
            /* compute weight for each frequency */
            exponent_array[i] = pow( frequency, -H );
            frequency *= lacunarity;
        }
        first = FALSE;
    }

    /* get first octave */
    signal = Noise3( point );

    /* get absolute value of signal (this creates the ridges) */
    if ( signal < 0.0 ) signal = -signal;
    /* invert and translate (note that "offset" should be ~ = 1.0) */
    signal = offset - signal;
    /* square the signal, to increase "sharpness" of ridges */
    signal *= signal;
    /* assign initial values */
    result = signal;
    weight = 1.0;

    for( i=1; i<octaves; i++ ) {
        /* increase the frequency */
        point.x *= lacunarity;
        point.y *= lacunarity;
        point.z *= lacunarity;

        /* weight successive contributions by previous signal */
        weight = signal * gain;
        if ( weight > 1.0 ) weight = 1.0;
        if ( weight < 0.0 ) weight = 0.0;
        signal = Noise3( point );
        if ( signal < 0.0 ) signal = -signal;
        signal = offset - signal;
        signal *= signal;

        /* weight the contribution */
        signal *= weight;
        result += signal *exponent_array[i];
    }

    return( result );
} /* RidgedMultifractal()
```

Allegato 2

	Worldmachine Basic	Terragen 3	Seamless Landscape Explorer	ATG - Alternate terrain Generator	Grome by Quad Software (Graphite per il rendering)	Vue Pioneer	Outerra - Anteworld
Licenza	Freeware	Freeware	Freeware open source	Mod fanmade di un gioco a pagamento	Freeware	Freeware	Freeware (alpha)
Versione/i a pagamento	Si	Si	No	No	Si	Si	Si (alpha)
Requisiti di sistema	Pc windows 2000 o più recenti; supporta i sistemi operativi a 32 bit; requisiti raccomandati: Windows 7 64bit, Dual Core AMD o Intel CPU 2 Ghz o superiore, scheda grafica ATI o NVIDIA, 8GB di RAM	32bit o 64bit Windows XP, Vista, Windows 7 e Windows 8 (Windows 2000 e ME non supportati); minimo 2 GB di RAM (4GB raccomandati); minimo 2 Ghz CPU (Dual Core raccomandata)	Windows XP o Vista, QGIS 0.11.0	-	Requisiti minimi: sistema operativo a 32 bit, 256 Mb di RAM, Windows 2000 o più recente	Windows 32/64 bit XP, Vista, 7, 8; Raccomandato un OS a 64 bit con 4 Gb di RAM	Requisiti minimi: Windows Vista o più recente; supporto limitato per Windows XP (RAM limitata); Nvidia serie 8xxx o migliore, AMD/ATI serie 5xxx o migliore con driver ; aggiornati; 512 MB di VRAM; 2GB di RAM; <u>Intel graphics non ancora supportata</u>
Massima risoluzione rendering	512x512	1280x900	-	-	Nessun limite software trovato	Nessun limite software trovato	-
File import	tga, bmp, tiff, raw (8 o 16 bit), bt (vtp format), hfz, hf2, hf2.gz, ter, raw-fp32	tgo, obj, lwo	-	-	Disabilitato in versione freeware	Disabilitato in versione freeware	-
File export	heightfield: tga, raw, bmp, terragen, leveller, png, povray-tga, raw16, raw-fp32, bt (vtp format), pgm (ascii), tiff (16 bit), hfz; Bitmap: bmp, tiff, png; Mesh: obj	Disabilitato in versione freeware	-	-	Disabilitato in versione freeware	Disabilitato in versione freeware	-
Gestione dati	Blocchi	Blocchi	-	-	Layer	Layer	Versione freeware semplicemente esplorativa di un mondo precostruito
Conservazione dati spaziali georiferiti e attributi	No	No	Si	-	No	No	No
Dettagli aggiuntivi	-	-	Software installato correttamente come <i>plug in</i> di QGIS 0.11.0 tuttavia caricando dei file, nell'interfaccia del SLE appare un messaggio di errore	-	-	-	Hardware non compatibile (scheda grafica Intel integrata alla scheda madre)

	Trian 3D Builder	Profantasy - Fractal Terrein 3 (solo 2D)	Starscene software - Fractscape	Sycode - TerrainCAD	Python3 Terrain Generator	Fractal Terrain Generator	Blender + add on	Bionatics - Blueberry3 D	Bionatics - Landsim3D
Licenza	Versione dimostrativa <i>freeware</i> 30 gg su richiesta	<i>Freeware trial</i> 14 gg	<i>Freeware</i>	<i>Commercial</i>	<i>Prealpha</i> , non disponibile per <i>download</i>	<i>Demo online</i>	<i>Freeware open source</i>	<i>Commercial</i>	Versione dimostrativa <i>freeware</i> su richiesta
Versione/i a pagamento	Si	Si	Si	Si	-	-	No	Si	Si
Requisiti di sistema	Windows 2000, Vista o 7; 1 GB di RAM; scheda grafica con 256 MB di VRAM; Raccomandati Windows 7, CPU da 2,4 Ghz multicore, 8 GB di RAM e scheda grafica con 1 GB di VRAM	Windows XP 32 bit o più recente; 128 MB di RAM;	-	Windows XP, Vista, solo 32 bit; minimo 1 GB di RAM	-	-	32-bit dual core CPU da 2Ghz; 2 GB di RAM; Scheda grafica compatibile OpenGL con 256 MB di VRAM; raccomandati una CPU quad core e 8 Gb di RAM	-	-
Massima risoluzione rendering	Nessun limite software trovato	-	<i>Terrain</i> 4097x4097; <i>textures</i> 2048x2048	-	-	-	Nessun limite software trovato	-	-
File import	Import 3D: kmz, kml, ac, flt, dae, osg, osga, osgb, osgx, ive, 3ds, lwo, dxf, fbx, geo, obj, tpx, x (DirectX), shp, xml, stl, sta, gml, p3d, srt; import geo image: tif, tiff, png, jpeg, jpg2, jp2, bil, bip, bsq, ecw, sid, img, ntf, thf, bsb, xml; import geo object: kmz, kml, ac, flt, dae, osg, osga, osgb, osgx, ive, 3ds, lwo, dxf, fbx, geo, obj, tpx, x (DirectX), shp, xml, stl, sta, gml, p3d, srt	bmp, jpeg, pmg, gif	png, obj, tif (4-channel)	-	-	-	dae, bvh, svg, tif (twf), lwo, ply, raw, stl, 3ds, fbx, obj, x3d, wrl, shp	-	-
File export	Disabilitato in versione <i>freeware</i> ; formati supportati: elevation data: asc, adfe00, bag, bt, dt0, dt1, dt2, hgt, dem, tif, tiff, xyz, gxf, hf2, mem, ter, ddf, hdr, raw, bl, ntf, pgm, ppm; land cover maps: tif, tiff, png, jpg, jp2, bil, bip, bsq, ecw, img, ntf, thf, bsb; satellite image: tif, tiff, png, jpg, jp2, bil, bip, bsq, ecw, img, ntf, thf, bsb, xml; vector data: vec, E00 (ASCID), E00 (BINARY), catd.ddf, shp, kml, kmz, mif, tab, dxf, Iht, bna, csv, geojson, dgn, 000, gpx, gmt, gtm, gtz, dat, gtx, vrt, ntf, r1, rta, osm	png, bmp, jpeg, kmz, vrm	png	-	-	-	dae, bvh, ply, raw, stl, 3ds, fbx, obj, x3d, shp	-	-
Gestione dati	-	-	Slider	-	-	-	Blocchi, <i>layer</i> o altro, a seconda delle diverse interfacce utilizzate	-	-
Conservazione dati spaziali georiferiti e attributi	Si, ma solo nella versione 32 bit	No	No	-	-	-	Si (parziale)	Si	Si
Dettagli aggiuntivi		-	-	Versione trial disponibile solo a pagamento con licenza valida 7 gg	-	-	-	Non disponibile in versione <i>trial</i>	Disponibile su richiesta in versione <i>trial</i>

Allegato 3

```
function [FD_raster, H_matrix] = FD_Estimation(DEM, kernel_dim,
method)

% La funziona stima l'Hurst Exponent (H) di 4 profili campionati su kernel
% di dimensione e con metodi definiti nei parametri di input:
% DEM = Modello digitale del terreno sul quale stimare la dimensione
% frattale;
% Kernel_dim = 3(7*7), 4(9*9)... n((n*2)+1)*((n*2)+1));
% Method = 1(migliore), 3.
% Si ottengono due matrici (FD_raster, H_matrix) che contengono i valori di H e
% la dimensione frattale stimati per ogni pixel.

% Calcolo della lunghezza laterale del kernel.
kernel_size = (kernel_dim*2)+1;

% Calcolo del numero di righe e colonne del DEM.
[r,c] = size(double(DEM));

% Preallocazione di matrici e vettori costruiti iterativamente con lo
% svolgersi dei cicli.
H_matrix = zeros(r,c);
FD_raster = zeros(r,c);
Vector_1 = sum(zeros(kernel_size));
Vector_2 = sum(zeros(kernel_size));
Vector_3 = sum(zeros(kernel_size));
Vector_4 = sum(zeros(kernel_size));

for m = 1:r
    for n = 1:c
        if m+kernel_size-1 <= r && n+kernel_size-1 <= c
            K = DEM((m:m+kernel_size-1),(n:n+kernel_size-1));
            for v = 1:kernel_size
                % Estrazione di 4 profili da ciascun kernel.
                Vector_1(1,v) = K(v,kernel_dim+1); %
                Vector_2(1,v) = K(kernel_dim+1,v); %
                Vector_3(1,v) = K(v,v); %
            end
            % Processo i 4 profili per stimare la dimensione frattale
            % e calcolare il valore di H per quel pixel.
            % Aggiorna le matrici FD_raster e H_matrix.
        end
    end
end
```

```

    Vector_4(1,v) = K(v,kernel_size-v+1); % /
end
% Calcolo del parametro H di ciascun profilo, per ciascun
% kernel.
HK_1 = wfbmesti(Vector_1);
HK_2 = wfbmesti(Vector_2);
HK_3 = wfbmesti(Vector_3);
HK_4 = wfbmesti(Vector_4);
% Calcolo della media dei valori di H dei profili, stimata per
% il kernel e allocata nella cella centrale.
H_pixel = mean([HK_1(1,method),HK_2(1,method),...
    HK_3(1,method),HK_4(1,method)]);
H_matrix(m,n) = H_pixel;
% Calcolo della dimensione frattale per ciascun pixel.
FD_raster(m,n) = 3-H_pixel;
end
end

```

Allegato 4

Definizione degli attributi in tabella 4.4 (esclusa la pendenza) per i suoli presenti nell'area oggetto di studio, di coordinate: latitudine nord 45,6535°, latitudine sud 45,3900°, longitudine ovest 10,8250°, e longitudine est 11,2144°.

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
AA1.1	50-75% Luvic Calcic Kastanozems (Endoskeletal, Endoarenic)	10000	1000	300	10	1
	25-50% Hypercalcic Calcisols (Endoskeletal, Endoarenic)	20000	2000	300	10	1
AR1.1	25-50% Haplic Phaeozems (Calcaric)	10000	1000	100	10	1
	25-50% Endogleyic Fluvic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric)	20000	2000	100	20	1
	25-50% Calcic Kastanozems (Endoskeletal, Endoarenic)	20000	1000	300	10	1
AR2.2	25-50% Fluvic Cambisols (Hypercalcaric, Humic, Hypereutric, Endosiltic)	10000	1000	100	10	1
	25-50% Fluvic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	25-50% Fluvic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	10000	1000	100	10	1
BR2.2	50-75% Fluvic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	10000	1000	100	10	2
	25-50% Haplic Arenosols (Calcaric, Hypereutric)	10000	2000	300	10	2
	10-25% Endogleyic Fluvic Cambisols (Calcaric, Hypereutric, Orthosiltic)	10000	2000	100	20	2

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
BR4.2	50-75% Endogleyic Fluvic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Orthosiltic)	10000	2000	100	20	2
	25-50% Endogleyic Fluvic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Orthosiltic)	20000	2000	100	20	2
	10-25% Gleyic Endosalic Phaeozems (Pachic, Orthosiltic, Thaptolithic)	20000	2000	100	20	2
GA2.4	25-50% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Rendzic Phaeozems (Calcaric, Pachic, Episkeletic, Episiltic)	10000	1000	300	10	1
	10-25% Rendzic Phaeozems (Hypercalcaric, Endoskeletal)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Cutanic Luvisols (Humic, Hyperutric, Skeletic, Clayic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
GG1.1	25-50% Aric Regosols (Calcaric, Hypereutric)	30000	1000	300	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Luvisols (Hyperutric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Hypercalcic Gleyic Luvisols (Hypereutric)	20000	2000	100	20	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
LB1.3	25-50% Endoleptic Phaeozems	30000	1000	100	10	1
	25-50% Endoleptic Phaeozems (Episkeletic, Chromic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Vertic Cutanic Luvisols (Hypereutric, Profondic, Endoclayic, Chromic)	10000	1000	200	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
LB1.4	25-50% Vertic Cutanic Luvisols (Hypereutric, Profondic, Endoclayic, Chromic)	10000	1000	200	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Phaeozems (Episkeletic, Chromic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Endoleptic Phaeozems	30000	1000	100	10	1
LB1.5	50-75% Vertic Cutanic Luvisols (Hypereutric, Profondic, Endoclayic, Chromic)	10000	1000	200	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Vertic Cambisols (Hypereutric, Orthoclayic)	10000	1000	200	10	1
LB1.6	50-75% Vertic Cutanic Luvisols (Hypereutric, Profondic, Endoclayic, Chromic)	10000	1000	200	10	1
	25-50% Endoleptic Cambisols (Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Phaeozems	30000	1000	100	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
LB2.2	25-50% Epileptic Cutanic Luvisols (Humic, Hypereutric, Clayic)	30000	1000	100	10	1
	25-50% Haplic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	25-50% Epileptic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Hypercalcaric, Humic, Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
LB2.5	25-50% Endoleptic Cambisols (Hypercalcaric, Humic, Hypereutric)	20000	1000	100	10	1
	25-50% Epileptic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Epileptic Cutanic Luvisols (Humic, Hypereutric, Clayic)	30000	1000	100	10	1
LB2.6	25-50% Endoleptic Phaeozems	20000	1000	100	10	1
	25-50% Epileptic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	30000	1000	100	10	1
	25-50% Haplic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Haplic Cambisols (Calcaric, Hypereutric, Skeletic, Orthoclayic)	10000	1000	300	10	1
	< 10% Vertic Cutanic Luvisols (Hypereutric, Profondic, Orthoclayic, Chromic)	10000	1000	200	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
LB3.1	25-50% Endoleptic Aric Regosols (Hypercalcaric, Humic, Episkeletic)	20000	1000	300	10	1
	25-50% Haplic Cambisols (Calcaric, Hypereutric, Skeletic, Orthoclayic)	10000	1000	300	10	1
	10-25% Epileptic Cambisols (Calcaric, Hypereutric)	30000	1000	100	10	1
LB3.2	50-75% Endolptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	25-50% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
	<10% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Episiltic)	30000	1000	100	10	1
LB3.3	25-50% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	25-50% Haplic Cambisols (Hypercalcaric, Hypereutric, Skeletic)	10000	1000	300	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Episiltic)	30000	1000	100	10	1
	< 10% Cutanic Alisols (Hyperdystric, Profondic, Endosiltic, Chromic)	10000	3000	100	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
LB3.4	25-50% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
	25-50% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	< 10% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	< 10% Cutanic Luvisols (Humic, Hypereutric, Skeletic, Clayic)	10000	1000	300	10	1
LB3.5	25-50% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1
	25-50% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
SA1.10	25-50% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	<10 Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1
	< 10% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
SA1.3	25-50% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Epidystric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Alisols (Hyperdystric, Profondic, Endosiltic, Chromic)	10000	3000	100	10	1
	< 10% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
SA1.4	25-50% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Orthosiltic)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Epileptic Luvisols (Humic, Hypereutric, Orthosiltic)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Epidystric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Alisols (Hyperdystric, Profondic, Endosiltic, Chromic)	10000	3000	100	10	1
SA1.5	10-25% Rendzic Leptosols (Humic, Eutric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
SA2.3	50-75% Endolptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Luvisols (Clayic, Chromic)	10000	1000	100	10	1
	10-25% Rendzic Leptosols (Dystric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Episiltic)	30000	1000	100	10	1
SI1.1	25-50% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1
	25-50% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols	20000	1000	100	10	1
SI2.1	25-50% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Orthosiltic)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
SI2.2	25-50% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Endoleptic Cambisols (Calcaric)	20000	1000	100	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	30000	1000	300	10	1
	< 10% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
SI3.2	25-50% Endoleptic Cutanic Luvisols (Humic, Orthosiltic)	20000	1000	100	10	1
	25-50% Epileptic Phaeozems (Calcaric, Episiltic)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1
	10-25% Cutanic Alisols (Hyperdystric, Profondic, Endosiltic, Chromic)	10000	3000	100	10	1
	10-25% Epileptic Regosols (Hypercalcaric, Hypereutric, Episiltic)	30000	1000	300	10	1

Unità cartografica	Classificazione WRB e frequenza	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
SM1.2	25-50% Mollic Rendzic Leptosols (Hyperhumic, Hypereutric)	30000	3000	100	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic)	30000	1000	300	10	1
	10-25% Endoleptic Rendzic Phaeozems (Calcaric, Skeletic, Epiclayic)	20000	1000	300	10	1
	10-25% Epileptic Phaeozems (Calcaric)	30000	1000	100	10	1
VB1.1	25-50% Haplic Regosols (Hypercalcaric, Hypereutric, Skeletic, Arenic)	30000	1000	300	10	1
	10-25% Haplic Cambisols (Calcaric, Humic, Hypereutric, Skeletic, Endoarenic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Rendzic Phaeozems (Hypercalcaric, Skeletic)	30000	1000	300	10	1
	< 10% Haplic Cambisols (Calcaric, Hypereutric, Skeletic)	20000	1000	300	10	1
	< 10% Haplic Regosols (Calcaric, Hypereutric, Skeletic)	30000	1000	300	10	1

Sintesi qualitativa delle caratteristiche dominanti di ogni sottosistema di suoli del file vettoriale "c0507021_CartaSuoliVeneto"

	Profondità	Fertilità	Tessitura	Drenaggio	Chimica del suolo
AA1.1	10000	1000	300	10	1
AR1.1	20000	1000	100	10	1
AR2.2	10000	1000	100	10	1
BR2.2	10000	1000	100	10	2
BR4.2	10000	2000	100	20	2
GA2.4	20000	1000	300	10	1
GG1.1	20000	1000	100	10	1
LB1.3	20000	1000	100	10	1
LB1.4	20000	1000	200	10	1
LB1.5	10000	1000	200	10	1
LB1.6	10000	1000	200	10	1
LB2.2	30000	1000	100	10	1
LB2.5	20000	1000	100	10	1
LB2.6	20000	1000	100	10	1
LB3.1	20000	1000	300	10	1
LB3.2	20000	1000	100	10	1
LB3.3	20000	1000	100	10	1
LB3.4	20000	1000	100	10	1
LB3.5	20000	1000	100	10	1
SA1.10	20000	1000	100	10	1
SA1.3	20000	1000	100	10	1
SA1.4	30000	1000	100	10	1
SA1.5	20000	1000	100	10	1
SA2.3	20000	1000	100	10	1
SI1.1	20000	1000	100	10	1
SI2.1	30000	1000	100	10	1
SI2.2	20000	1000	300	10	1
SI3.2	30000	1000	100	10	1
SM1.2	30000	1000	100	10	1
VB1.1	30000	1000	300	10	1

Allegato 5

Metadati

I metadati sono stati riportati tenendo conto del Regolamento (CE) N. 1205/2008, recante attuazione della direttiva 2007/2/CE che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità Europea (INSPIRE).

L'allegato presenta i metadati delle mappe impiegate e le mappe derivate più importanti per gli scopi di questa tesi.

1. Modello digitale del terreno della Regione Veneto

Identificazione	Titolo della risorsa	Modello digitale del terreno dell'intero territorio regionale
	Breve descrizione della risorsa	DTM regionale con celle di 25 m
	Tipo di risorsa	Serie di set di dati territoriali
	Localizzazione della risorsa	http://idt.regionev.it/app/metacatalog/
	Identificatore univoco della risorsa	c0103014_DTM25
	Lingua della risorsa	Italiano
Classificazione dei dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Categoria di argomento	Mappe di base, Immagini, Copertura terrestre
Parola chiave	Valore della parola chiave	Elevazione
	Vocabolario controllato di origine	GEMET - INSPIRE themes, version 1.0

Localizzazione geografica	Sistema di riferimento	ROMA40/OVEST
	Riquadro di delimitazione geografica	Longitudine Ovest: 10.600117
		Longitudine Est: 13.182679
		Latitudine Sud: 44.765940
		Latitudine Nord: 46.724687
Riferimento temporale	Estensione temporale	Inizio: 01/01/2007
		Fine: 01/01/2007
	Data di pubblicazione	-
	Data dell'ultima revisione	05/09/2006
	Data di creazione	-
Qualità e validità	Genealogia	Curve di livello e punti quotati desunti dalle tavolette IGM 1:25.000, dalla CTRN e dal microrilievo realizzato dall'ARPAV - Curve di livello desunte dalle tavv. IGM 1:25.000, integrate da Microrilievo prodotto dall'ARPAV sul Bacino Scolante nella Laguna di Venezia, alcune curve di livello della CTRN (prevalentemente in pianura). Generazione del TIN utilizzando i dati così ottenuti. Ritaglio del DEM sulle sezioni di CTR e generazione dei file ascii per ciascuna sezione.
	Tipo di rappresentazione spaziale	Dati vettoriali (curve di livello dalle quali è stato ottenuto il DEM)
	Risoluzione spaziale (scala equivalente)	25 m
Conformità	Specifiche	REGOLAMENTO (UE) N. 1089/2010 DELLA COMMISSIONE del 23 novembre 2010 recante attuazione della direttiva 2007/2/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'interoperabilità dei set di dati territoriali e dei servizi di dati territoriali
	Grado	Non conforme (INSPIRE)

Vincoli relativi all'accesso e all'uso	Condizioni di accesso Condizioni d'uso Limitazioni dell'accesso pubblico	iodl2.0 iodl2.0 Nessuna limitazione
Organizzazioni responsabili dell'istruzione, della gestione, della manutenzione e della distribuzione dei set di dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Parte responsabile Ruolo della parte responsabile	Nome dell'Ente: Regione del Veneto, Unita di Progetto per il SIT e la Cartografia Telefono: 0412792577 E-mail: sit@regione.veneto.it Proprietario, punto di contatto, distributore
Metadati concernenti i metadati	Punto di contatto dei metadati Data dei metadati Lingua dei metadati	Nome dell'Ente: Regione del Veneto, Unita di Progetto per il SIT e la Cartografia Telefono: 0412792577 E-mail: sit@regione.veneto.it 25/01/2007 Italiano

Mappe derivate dal dato "c0103014_DTM25"		
DEM dell'area in esame	Mappa raster ritagliata con la funzione "Clip" di QGIS	
Mappa della dimensione frattale	Mappa raster generata col comando "TEXTURE" di IDRISI	Latitudine Nord: 45,6535 Latitudine sud: 45,3900 Longitudine Ovest: 10,8250 Longitudine Est: 11,2144
Mappa della pendenza	Mappa raster generata con lo strumento di QGIS "DEM (analisi geomorfologica)" in modalità "pendenza". La pendenza è stata calcolata in gradi. Sono stati inclusi i margini.	

2. Confini amministrativi regionali

Identificazione	Titolo della risorsa	Confini amministrativi regionali in versione non generalizzata
	Breve descrizione della risorsa	File vettoriale che identifica i confini amministrativi del Veneto
	Tipo di risorsa	Set di dati territoriali
	Localizzazione della risorsa	http://www.istat.it/it/archivio/24580
	Identificatore univoco della risorsa	-
	Lingua della risorsa	Inglese
Classificazione dei dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Categoria di argomento	Unità amministrative

Parola chiave	Valore della parola chiave	-
	Vocabolario controllato di origine	-
Localizzazione geografica	Sistema di riferimento	ED50 / UTM zone 32N
	Riquadro di delimitazione geografica	Longitudine Ovest: 10.6057610
		Longitudine Est: 13.1785646
		Latitudine Sud: 44.7733873
		Latitudine Nord: 45.7477085
Riferimento temporale	Estensione temporale	01/01/2011
	Data di pubblicazione	01/04/2011
	Data dell'ultima revisione	-
	Data di creazione	-
Qualità e validità	Genealogia	Acquisizione di informazioni principalmente tramite foto aeree ed altra cartografia.
	Tipo di rappresentazione spaziale	Dati Vettoriali
	Risoluzione spaziale	La scala non è certificabile uniformemente dall'Istat, in quanto le basi di acquisizione utilizzate provengono da fonti e scale differenti, che variano tra ambito urbano ed ambito extraurbano.

Conformità	Specifica	-
	Grado	-
Vincoli relativi all'accesso e all'uso	Condizioni di accesso	Nessuna condizione applicabile
	Condizioni d'uso	-
	Limitazioni dell'accesso pubblico	Nessuna limitazione
Organizzazioni responsabili dell'istruzione, della gestione, della manutenzione e della distribuzione dei set di dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Parte responsabile	Nome dell'Ente: ISTAT Telefono: 06 4673.4425 E-mail: int@istat.it
	Ruolo della parte responsabile	Proprietario, punto di contatto, distributore
Metadati concernenti i metadati	Punto di contatto dei metadati	-
	Data dei metadati	-
	Lingua dei metadati	-

3. Dati meteorologici per la Regione Veneto

Identificazione	Titolo della risorsa	Dati delle principali grandezze meteorologiche (tra cui temperatura, umidità e vento) attraverso un sistema di monitoraggio costituito da una rete di circa 164 stazioni automatiche che coprono l'intero territorio regionale.
	Breve descrizione della risorsa	I dati rilevati vengono utilizzati nell'ambito del monitoraggio ambientale per l'elaborazione di previsioni meteorologiche, di bilanci idrici per l'irrigazione, della climatologia e nello studio delle criticità ambientali presenti nel territorio regionale. Sono presenti i seguenti indicatori: precipitazione (mm) somma, precipitazione (giorni piovosi), radiazione solare globale (MJ/m^2), temperatura aria a 2 m ($^{\circ}C$) media delle minime, temperatura aria a 2 m ($^{\circ}C$) media delle medie, temperatura aria a 2 m ($^{\circ}C$) media delle massime, umidità relativa a 2 m (%) media delle minime, umidità relativa a 2 m (%) media delle medie, umidità relativa a 2 m (%) media delle massime, velocità vento 5 m media aritm. (m/s) media delle medie, direzione vento prevalente a 5 m (SETTORE). I dati si riferiscono alle 164 stazioni di rilevazione in Veneto e sono forniti per mese e per anno, dal 1994 al 2012.
	Tipo di risorsa	Set di dati territoriali
	Localizzazione della risorsa	http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/
	Identificatore univoco della risorsa	c0306010_DatiMeteo
	Lingua della risorsa	Italiano
Classificazione dei dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Categoria di argomento	Climatologia, Meteorologia, Atmosfera
Parola chiave	Valore della parola chiave	Condizioni atmosferiche
	Vocabolario controllato di origine	GEMET - INSPIRE themes, version 1.0

Localizzazione geografica	Sistema di riferimento	ROMA40/OVEST
	Riquadro di delimitazione geografica	Longitudine Ovest: 10.6229368792133
		Longitudine Est: 13.1022304265516
		Latitudine Sud: 44.7944402180517
		Latitudine Nord: 46.680462222327
Riferimento temporale	Estensione temporale	01/01/1994
		31/12/2012
	Data di pubblicazione	08/05/2013
	Data dell'ultima revisione	-
	Data di creazione	-
Qualità e validità	Genealogia	I dati vengono rilevati dalle 164 stazioni presenti sul territorio. Queste sono collegate via radio, in tempo reale, al centro di calcolo. I dati possono essere validati, in tempo reale e da profilatori verticali. I dati validati sono relativi al giorno precedente. I dati trasmessi in automatico dalle centraline dopo la validazione possono subire parziali modifiche. I dati in tempo reale non sono validati e si riferiscono alle ultime 24 ore sulle principali grandezze meteorologiche. I dati non validati rilevati dai profilatori verticali relativi all'intervallo di tempo a cui si riferiscono i dati.
	Tipo di rappresentazione spaziale	Tabella di dati alfanumerici (formato CSV)
	Risoluzione spaziale (scala equivalente)	10000

Conformità	Specifica	INSPIRE Data Specifications
	Grado	Non conforme (INSPIRE)
Vincoli relativi all'accesso e all'uso	Condizioni di accesso	CCBY
	Condizioni d'uso	CCBY
	Limitazioni dell'accesso pubblico	Nessuna limitazione
Organizzazioni responsabili dell'istruzione, della gestione, della manutenzione e della distribuzione dei set di dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Parte responsabile	<p>Nome dell'Ente: A.R.P.A.V. - Dipartimento Regionale Sicurezza Territorio, Servizio Meteorologico Ruolo: Proprietario Telefono: 049 9998111 E-mail:cmt.rete@arpa.veneto.it Sito web: http://www.arpa.veneto.it</p> <hr/> <p>Nome dell'Ente: Regione del Veneto - Unita di Progetto per il SIT e la Cartografia Telefono: +39 0412792577 E-mail: sit@regione.veneto.it</p>
	Ruolo della parte responsabile	Proprietario, punto di contatto: ARPAV Distributore: Regione del Veneto
	Punto di contatto dei metadati	<p>Nome dell'Ente: A.R.P.A.V. - Dipartimento Regionale Sicurezza Territorio, Servizio Meteorologico Ruolo: Proprietario Telefono: 049 9998111 E-mail:cmt.rete@arpa.veneto.it Sito web: http://www.arpa.veneto.it</p>
Metadati concernenti i metadati	Data dei metadati	09/05/2013
	Lingua dei metadati	Italiano

4. Carta dei suoli della Regione Veneto

Identificazione	Titolo della risorsa	Carta dei suoli del Veneto
	Breve descrizione della risorsa	Banca dati dei suoli del Veneto, contenente le unità tipologiche di suolo e la descrizione delle unità cartografiche
	Tipo di risorsa	Set di dati territoriali
	Localizzazione della risorsa	http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/
	Identificatore univoco della risorsa	c0507021_CartaSuoliVeneto
	Lingua della risorsa	Italiano
Classificazione dei dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Categoria di argomento	Informazioni geoscientifiche
Parola chiave	Valore della parola chiave	Copertura del suolo
	Vocabolario controllato di origine	GEMET - INSPIRE themes, version 1.0
Localizzazione geografica	Sistema di riferimento	ROMA40/OVEST
	Riquadro di delimitazione geografica	Longitudine Ovest: 10.6229368792133
		Longitudine Est: 13.1022304265516
		Latitudine Sud: 44.7944402180517
		Latitudine Nord: 46.680462222327

Riferimento temporale	Estensione temporale	01/01/2012 31/12/2012
	Data di pubblicazione	15/12/2012
	Data dell'ultima revisione	-
	Data di creazione	-
Qualità e validità	Genealogia	-
	Tipo di rappresentazione spaziale	Dati vettoriali
	Risoluzione spaziale (scala equivalente)	25000
Conformità	Specifiche	REGOLAMENTO (UE) N. 1089/2010 DELLA COMMISSIONE del 23 novembre 2010 recante attuazione della direttiva 2007/2/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'interoperabilità dei set di dati territoriali e dei servizi di dati territoriali
	Grado	Non conforme (INSPIRE)
Vincoli relativi all'accesso e all'uso	Condizioni di accesso	CCBY
	Condizioni d'uso	CCBY
	Limitazioni dell'accesso pubblico	Nessuna limitazione

Metadati concernenti i metadati	Organizzazioni responsabili dell'istruzione, della gestione, della manutenzione e della distribuzione dei set di dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Nome dell'Ente: ARPAV Servizio Osservatorio Suolo e Bonifiche Telefono: +39 0422 558620 E-mail: ssu@arpa.veneto.it Sito web: http://www.arpa.veneto.it
	Parte responsabile	Nome dell'Ente: Regione del Veneto - Unità di Progetto per il SIT e la Cartografia Telefono: +39 0412792577 E-mail: sit@regione.veneto.it
	Ruolo della parte responsabile	Proprietario, punto di contatto: ARPAV Distributore: Regione del Veneto
	Punto di contatto dei metadati	Nome dell'Ente: ARPAV Servizio Osservatorio Suolo e Bonifiche Ruolo: Punto di contatto Telefono: +39 0422 558620 E-mail: ssu@arpa.veneto.it Sito web: http://www.arpa.veneto.it
	Data dei metadati	15/12/2012
	Lingua dei metadati	Italiano

5. Mappa della copertura del suolo europea

Identificazione	Titolo della risorsa	Corine Land Cover 2006 (raster 100m) - version 17, Dec. 2013
	Breve descrizione della risorsa	With the help of CLC data it is possible to provide support for protecting ecosystems, halting the loss of biological diversity, tracking the impacts of climate change, assessing developments in agriculture and implementing the EU Water Framework Directive. CLC data is an important data set for the implementation of key priority areas of the Sixth Environment Action Programme of the European Community. CLC data can show, for instance, where fragmentation of the landscape by roads and other infrastructure is worsening and thus increasing the risk that ecosystems can no longer connect with each other, putting the survival of their flora and fauna in danger. In the agricultural field CLC data can highlight where major structural changes are continuing or intensifying, such as the conversion of pasture to arable land, expansion or reduction in the area of fallow land and land taken out of production ('set aside'), or the abandonment of farming altogether. CLC serve as input to the EC 'Inspire' (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe - http://inspire.jrc.it) initiative. This initiative intends to trigger the creation of a European spatial information infrastructure that delivers to the users integrated spatial information services. CLC programme is also a contribution to the Global Monitoring for Environment and Security (GMES http://gmes.info) initiative, run by the European Commission and the European Space Agency, to provide environmental information from a combination of air- and space-based observation systems and in-situ monitoring.
	Tipo di risorsa	Set di dati territoriali
	Localizzazione della risorsa	http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/ds_resolveuid/a47ee0d3248146908f72a8fde9939d9d
	Identificatore univoco della risorsa	ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08
	Lingua della risorsa	Inglese

Classificazione dei dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Categoria di argomento	Environment
Parola chiave	Valore della parola chiave	Land cover
	Vocabolario controllato di origine	-
Localizzazione geografica	Sistema di riferimento	ETRS89 / ETRS-LAEA
	Riquadro di delimitazione geografica	West bound: -33.90432
		East bound: 38.1471
		South bound: 26.988714
		North bound: 60.57849
Riferimento temporale	Estensione temporale	- -
	Data di pubblicazione	31/03/2014
	Data dell'ultima revisione	-
	Data di creazione	20/03/2014
Qualità e validità	Genealogia	-
	Tipo di rappresentazione spaziale	Dati raster
	Risoluzione spaziale	100 m

Conformità	Specifica	-
	Grado	-
Vincoli relativi all'accesso e all'uso	Condizioni di accesso	Unless otherwise indicated, re-use of content on the EEA website for commercial or noncommercial purposes is permitted free of charge, provided that the source is acknowledged. The EEA re-use policy follows Directive 2003/98/EC of the European Parliament and the Council on the re-use of public sector information throughout the European Union and Commission Decision 2006/291/EC, Euratom on the re-use of Commission information. The EEA accepts no responsibility or liability whatsoever for the re-use of content accessible on its website. Any inquiries about re-use of content on the EEA website should be addressed to Ove Caspersen, EEA, Kongens Nytorv 6, DK-1050 Copenhagen K, Tel +45 33 36 71 00, Fax +45 33 36 71 99, e-mail copyrights at eea.europa.eu
	Condizioni d'uso	
	Limitazioni dell'accesso pubblico	Nessuna limitazione
Organizzazioni responsabili dell'istruzione, della gestione, della manutenzione e della distribuzione dei set di dati territoriali e dei servizi ad essi relativi	Parte responsabile	European Environment Agency
	Ruolo della parte responsabile	Proprietario, punto di contatto e distributore

Metadati concernenti i metadati	Punto di contatto dei metadati	European Environment Agency
	Data dei metadati	03/01/2015 (data di consultazione)
	Lingua dei metadati	Inglese

Mappe derivate dal dato (ae034043-d8df-4a91-88da-bc7b7269af08)		
Mappa del CLC dell'area in esame	Mappa raster ritagliata con la funzione "Clip" di QGIS	Latitudine Nord: 45,6535 Latitudine sud: 45,3900 Longitudine Ovest: 10,8250 Longitudine Est: 11,2144
Mappa del CLC dell'area in esame riclassificata a due livelli	Mappa raster riclassificata con il modulo "r.reclass" del <i>plug in</i> GRASS di QGIS	