

Applicazione di un metodo di analisi geomorfometrica a supporto della cartografia pedologica in Sardegna

Maria Teresa Melis (*), Stefano Loddo (**), Andrea Vacca (*), Vittorio Alessandro Marrone (*)

(*) Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università degli Studi di Cagliari, Via Trentino 51, 09127 Cagliari, Italy, tel +390706757788, fax +39070282236 titimelis@unica.it

(**) Agenzia AGRIS Sardegna, Dipartimento per la ricerca nelle produzioni vegetali, Viale Trieste 111, 09123 Cagliari, Italy, tel +39(0)70/ 2011237, fax +39(0)70/285381

Riassunto

La Regione Autonoma della Sardegna ha recentemente finanziato il primo lotto della "Carta delle unità di terre e di capacità d'uso dei suoli in scala 1:50.000" quale strumento a supporto della pianificazione territoriale negli ambiti costieri. Lo studio morfometrico svolto nell'ambito del progetto parte dalla necessità di sviluppare una cartografia tematica che descriva le unità fisiografiche definite come areali con omogeneità di tipo litologico e di processo geomorfologico. Si è quindi proposto un approccio basato sulla cartografia geologica riclassificata in termini di parent material e sull'elaborazione di un DEM. Questo lavoro si focalizza sull'estrazione di parametri morfometrici dal DEM e in particolare sulla classificazione dei valori di acclività integrati in un modello di analisi con i valori di convessità. Il prodotto ottenuto è una classificazione del territorio in forme concave e convesse con valori positivi e negativi e classi crescenti con diverso grado di acclività. I primi risultati, relativi alle due aree campione di Pula - Capoterra e di Muravera - Quirra, della superficie, al netto delle aree pianeggianti interessate da coperture detritiche e alluvionali del Quaternario, di circa 54.800 ha su cui sono state effettuate 836 osservazioni, evidenziano come su parent material costituiti da metamorfiti e plutoniti di vario tipo e da lave a composizione intermedio-basica la distribuzione delle tipologie pedologiche sia fortemente influenzata dalla concavità e dalla convessità delle forme. I valori di acclività non sembrano invece avere influenza sulla distribuzione delle tipologie pedologiche. Si ritiene pertanto che l'approccio metodologico utilizzato contribuisca significativamente, per i litotipi considerati, alla realizzazione di carte di semi-dettaglio contenenti informazioni pedologiche e basate sul paradigma suolo-paesaggio.

Abstract

The Autonomous Region of Sardinia has recently funded the first batch of the " Land Unit and Soil Capability Map of Sardinia " at scale 1:50,000, as a support tool for spatial planning in coastal areas. The morphometric study carried out within the project starts from the need to develop thematic maps describing the physiographic units defined as areal homogeneity with type lithological and geomorphologic process . It is therefore proposed an approach based on geological mapping reclassified in terms of parent material and the elaboration of a DEM. This work is focused on the extraction of morphometric parameters from the DEM , and in particular on the classification of values of steepness integrated in an analysis model with the values of curvature. The product obtained is a classification of the territory in concave and convex shapes with positive and negative values and rising classes with different degrees of steepness .The first results for the two sample areas of Pula - Capoterra and Muravera - Quirra surface, net of flat areas affected by shell debris and Quaternary alluvial , has about 54,800 of which were made 836 observations , show how of parent material consisting metamorphites and plutonites of various types and from lave a composition intermediate - basic distribution of soil types is strongly influenced by the concavity and convexity of the forms .. The values of steepness do not seem to

have an influence on the distribution of soil types . It is therefore considered that the methodological approach contributes significantly to the rock types considered , the realization of cards containing semi- detailed soil information and based on soil - landscape paradigm.

Introduzione

La topografia è universalmente riconosciuta come uno dei principali fattori della pedogenesi (Birkeland, 1999; Brady and Weil, 2008; Buol et al., 2011), tanto da essere spesso utilizzata, in caso di assenza o scarsità di dati pedologici, per predire la distribuzione areale delle tipologie di suolo (Florinsky et al., 2002; Tesfa et al., 2009; Häring et al., 2012).

Questo studio è basato sull'applicazione di un modello di analisi geomorfometrica del territorio della Sardegna per l'elaborazione della cartografia delle unità fisiografiche in scala 1:50000. Questa cartografia supporta il processo di elaborazione della Carta delle Unità delle Terre e della derivata carta della Land Capability, obiettivo finale del progetto regionale.

Obiettivi generali di questa ricerca, che ha dato uno specifico supporto alle elaborazioni geopedologiche, sono legati alla necessità di elaborare una classificazione in unità morfologiche che risponda ai seguenti criteri:

- le unità definite devono mostrare alcune delle proprietà dei suoli omogenee al loro interno;
- le procedure di classificazione devono essere basate su un singolo modello di analisi e produrre un output semplice con un numero limitato di classi morfologiche con caratteristiche definite e controllabili;
- il modello di analisi deve essere indipendente dalla scala di rappresentazione.

Pertanto sono stati analizzati diversi processi di classificazione geomorfometrica che portano a cartografie anche molto elaborate in termini di definizione di classi (Shary et al., 2002; Iwahashi et al., 2007; Batuk et al, 2008) ma che risultano in questo studio di difficile validazione vista l'estrema variabilità in termini fisiografici del territorio della Sardegna, oggetto dello studio.

Metodologia di analisi

La geomorfometria si definisce come la scienza che studia l'analisi quantitativa della superficie terrestre (Pike, 2001, 2009). La quantificazione delle forme si ottiene poiché l'analisi geomorfometrica permette di assegnare un valore definito ad ogni pixel e quindi ad ogni porzione del terreno. Il limite di ogni classe può essere quindi utilizzato in ambiente GIS correlandolo alle altre informazioni per produrre cartografie tematiche. La risoluzione spaziale del DEM rappresenta il limite di utilizzo del dato in termini cartografici.

In geomorfometria si possono identificare tre gruppi principali di parametri (Pike et al., 2009):

- parametri e oggetti morfometrici di base;
- parametri e oggetti specifici per l'analisi idrologica;
- parametri e oggetti specifici per studi sul clima e la meteorologia.

I parametri morfometrici di base descrivono la morfologia locale (es. acclività, esposizione, curvatura, etc.). I parametri utilizzati in idrologia riflettono il movimento potenziale di materiale (acqua e sedimenti) sulla superficie del terreno (es. Indice di erosione, indici di accumulo, etc.). I parametri del terzo gruppo vengono elaborati partendo dai dati climatici e analizzando l'influenza della superficie del terreno (es. Movimento delle masse d'aria, indici di precipitazione potenziale, etc.). Inoltre, introducendo il concetto di gerarchia nelle forme del terreno (Dikau, 1989) e quindi la scala di osservazione, l'associazione di più parametri morfometrici elementari può condurre alla classificazione della superficie in forme del terreno (*land elements* e *landforms*). Una *landform* è una forma del terreno definita, quale un bacino idrografico o una duna, ovvero è legata ad uno specifico processo geomorfologico. Essa può essere composta da più *landform elements*, ossia oggetti che mantengono costanti alcune variabili morfometriche. I parametri morfometrici utilizzati si classificano come locali, ossia dipendenti dal solo valore di ogni punto, per distinguerli da quelli regionali, che analizzano invece insiemi di punti e relazioni tra essi. In particolare sono stati utilizzati i parametri basati sulle caratteristiche geometriche delle superfici: l'acclività e la

curvatura. L'acclività dei versanti in questo studio viene calcolata come definito in Burrough et al. (1998) e noto come metodo di Horn e in particolare:

$$\text{slope_degrees} = \text{ATAN}(\sqrt{[\text{dz}/\text{dx}]^2 + [\text{dz}/\text{dy}]^2}) * 57.29578$$

ossia rappresenta la variazione della quota z nelle due direzioni x e y, in questo caso espressa in gradi, così come previsto dalla metodologia.

La curvatura è invece un parametro più complesso e rappresenta la variazione di acclività lungo una determinata direzione. La scelta di quest'ultima permette di calcolare diverse tipologie di curvature: *profile, longitudinal, plan, tangential, cross-sectional, total e general curvature*. (Shary et al., 2002; Jenness, 2011). Il significato morfologico dei diversi tipi di curvatura, analizzando lo scorrimento dell'acqua a partire da un punto, si sintetizza come:

- *plan, tangential e cross-sectional curvature* possono descrivere come l'acqua converga o diverga dal punto di partenza;
- *profile e longitudinal curvature* possono far capire dove l'acqua potrebbe accelerare o decelerare nel suo scorrimento;
- *total e general curvature* sono descrizioni generali della forma della superficie e in particolare la *general curvature* può assumere valori positivi o negativi in corrispondenza delle superfici convesse o concave, rispettivamente.

La classificazione sopra riportata non è esaustiva e sono veramente molto numerosi gli autori che riportano definizioni diverse. La scelta della definizione da adottare trova una sua soluzione cercando di capire quale tipo di fenomeno si voglia analizzare e con quale finalità si voglia classificare la superficie del terreno.

Nella Figura 1 sono riportati alcuni esempi di rappresentazioni di curvature, così come definiti da Moore et al. (1993), Wilson & Gallant (2000), Porres de la Haza & Pardo Pascual (2002) e Schmidt et al. (2003).

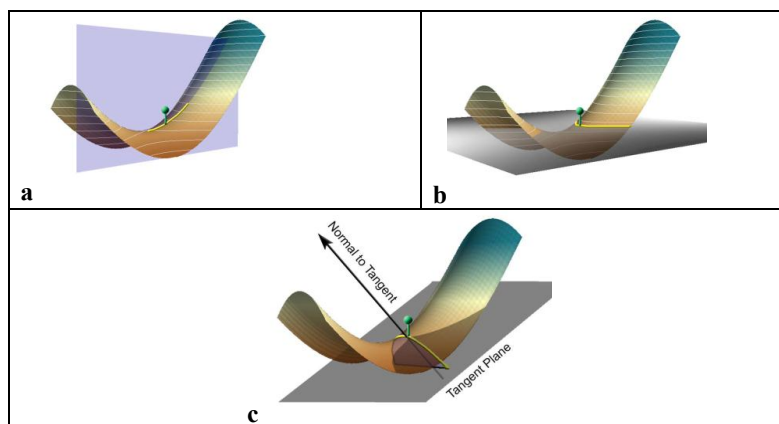


Figura 1. **a**: *profile curvature*, la curvatura calcolata lungo la linea di massima pendenza; **b**: *plan curvature*, la curvatura calcolata lungo la linea di intersezione tra la superficie e il piano orizzontale XY; **c**: *tangential curvature*, la curvatura calcolata lungo la linea ortogonale alla linea con il gradiente più forte (Jenness, 2011).

Diversi sono i metodi proposti in letteratura e molto ampie le discussioni sul significato geomorfologico di questi prodotti (Evans, 1979; Zevenbergen and Thorne, 1987; Florinsky, 1998). Si possono distinguere in generale due approcci che utilizzano entrambi una finestra di 3x3 celle che si muove nella griglia calcolando il valore della curvatura per ogni nodo. Tutti i metodi per calcolare la curvatura della superficie terrestre sono basati sul calcolo delle derivate prime e seconde parziali che passano per i nove punti di elevazione della griglia 3x3.

Il sistema di classificazione della curvatura applicato in questo studio è quello che si rifà all'equazione di Zevenbergen & Thorne (1987):

$$K = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial S^2} \right) \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial S} \right)^2 \right]^{3/2} \quad [1]$$

dove Z è la superficie quadratica calcolata con l'equazione:

$$Z = Ax^2 + By^2 + Cx^2y + Cy^2x + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad [2]$$

i cui coefficienti sono i 9 valori di elevazione dei nodi della matrice 3×3 e S è la direzione dell'acclività massima, rispetto all'angolo di massima pendenza.

I valori che si ottengono sono positivi o negativi in corrispondenza delle forme convesse o concave, rispettivamente.

Elaborazione dei dati e risultati

In questo progetto sono stati utilizzati i dati ufficiali della cartografia regionale della Sardegna pubblicati nel Geoportale della Regione Sardegna (<http://www.sardegnageoportale.it>) e in particolare, in questa fase dello studio, è stato utilizzato il DEM elaborato a partire dalle curve di livello e dai punti quotati del database topografico 10K. Il dato copre l'intero territorio regionale con una griglia di 10 metri di risoluzione spaziale e 2,5 metri di accuratezza orizzontale e verticale.

Basandosi sull'assunto che il più piccolo oggetto da generare deve avere almeno il doppio della risoluzione del pixel (Dikau, 1989), il DEM con 10 metri di risoluzione può essere considerato pienamente idoneo in relazione alla scala richiesta in questo progetto.

Sono stati elaborati i due indici topografici dell'acclività e della curvatura, estratti applicando le funzioni descritte sopra, e sono state prodotte le due prime elaborazioni dell'acclività e della curvatura. Nella Figura 2 è riportata l'immagine dell'elaborazione della curvatura per un settore della Sardegna meridionale prima della ri-classificazione in due classi.

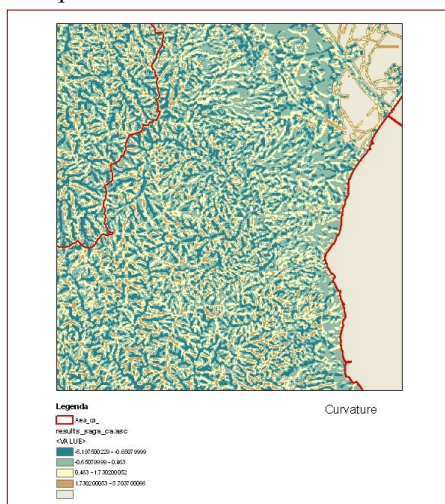


Figura 2. Immagine di un settore della Sardegna meridionale che rappresenta l'elaborazione della curvatura secondo il metodo proposto nello studio; i toni del verde rappresentano le superfici concave e i toni ocra le superfici convesse.

La metodologia che si propone prevede di riclassificare questi dati. In particolare, la griglia dell'acclività è stata classificata in 4 classi secondo le conoscenze sviluppate sull'influenza dell'acclività sui suoli della Sardegna (Arangino et al., 1986; Aru et al., 1990; Madrau et al., 2006; Marrone et al., 2008), (Figura 3) e la griglia della curvatura è stata classificata in due classi in base all'appartenenza dei pixel a valori negativi e positivi.

Classi di acclività	Valori espressi in %
1	0 - 2,49
2	2,50 – 15,00
3	15,01 – 35,00
4	> 35,00

Figura 3. Classi di acclività utilizzate.

L'elaborazione finale prevede l'applicazione del prodotto:

$$M = S \times C \quad [3]$$

dove S è la griglia dell'acclività e C la curvatura.

Questo prodotto attribuisce ad ogni pixel un valore compreso tra -1 e +4, per un totale di 8 valori: 4 positivi e 4 negativi, con valori di acclività crescenti.

Per mantenere una omogeneità della classe pianeggiante ai pixel con valore +1 e -1 è stata attribuita una nuova classe 0 (Figura 4).

Combinazioni delle classi		Classificazione	Riclassificazione
Acclività	Concavità/convessità	prodotto	Accorpamento (7 classi)
Superficie pianeggiante 0 (0-2,49%)	+1	0	0
	-1	0	
Pendenza moderata 1 (2,50-15,00%)	+1	+1	+1
	-1	-1	-1
Pendenza forte 2 (15,01-35,00%)	+1	+2	+2
	-1	-2	-2
Pendenza molto forte 3 (>35,00%)	+1	+3	+3
	-1	-3	-3

Figura 4. Classificazione morfometrica finale.

La descrizione geomorfologica delle 7 classi è riportata in Figura 5.

Classi	Descrizione
0	Aree da pianeggianti a subpianeggianti concave e convesse con pendenza <2,50%. In relazione alla litologia sono comprese le aree delle piane alluvionali, le superfici terrazzate, le superfici di spianamento, le superfici strutturali e le piane di erosione e/o accumulo.
+1	Superfici convesse con pendenza compresa tra 2,50 e 15,00%. In relazione alla litologia sono comprese le superfici sommitali dei crinali e dei dossi, le superfici convesse delle conoidi, superfici di erosione e superfici convesse nelle fasce di raccordo con la piana.
-1	Superfici concave con pendenza compresa tra 2,50 e 15,00%. In relazione alla litologia sono comprese le basi dei versanti di raccordo con la piana, le fasce fluviali dell'alveo di piena, le superfici concave delle conoidi, superfici di erosione e superfici concave nelle fasce di raccordo con la piana, superfici di erosione.
+2	Superfici convesse con pendenza compresa tra 15,00 e 35,00 %. In relazione alla litologia sono comprese le superfici alte dei crinali, le superfici convesse delle porzioni alte delle conoidi, le superfici strutturali.
-2	Superfici concave con pendenza compresa tra 15,00 e 35,00 %. In relazione alla litologia sono comprese le superfici concave delle fasce medie dei versanti montani, le superfici concave dei versanti collinari, le superfici concave delle porzioni alte delle conoidi.
+3	Superfici convesse con pendenza > 35,00%. In relazione alle litologie sono compresi i crinali, gli orli delle superfici strutturali.
-3	Superfici concave con pendenza > 35,00%. In relazione alle litologie sono comprese le superfici concave dei versanti montani, le fasce concave più alte dei versanti collinari.

Figura 5. Descrizione geomorfologica delle classi morfometriche.

In Figura 6 è riportato il risultato dell'elaborazione per il settore delle piane costiere del Fiume Flumendosa, a sud, e del Rio Quirra nella Sardegna sud-orientale .

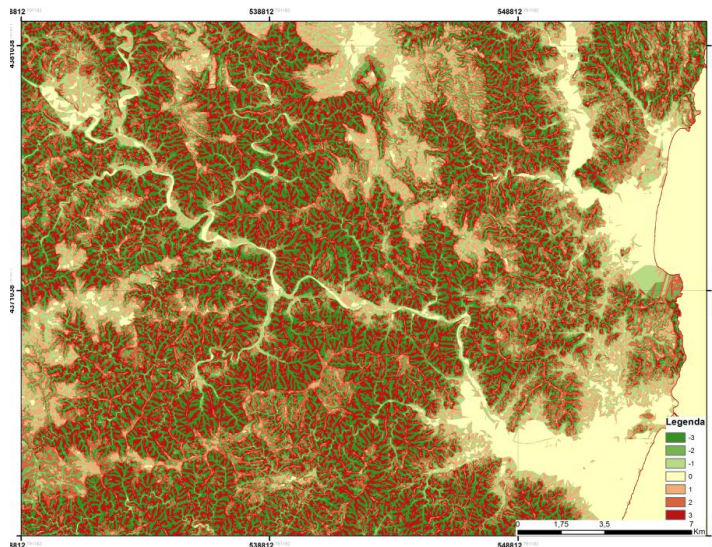


Figura 6. Settore della Sardegna sud-orientale della Carta geomorfometrica elaborata.

Validazione dei risultati

La validazione dell'elaborazione morfometrica è avvenuta in due aree campione, caratterizzate da morfologie collinari e montane, localizzate nella Sardegna sudoccidentale (area di Pula-Capoterra) ed in quella sudorientale (area di Muravera). La dimensione dell'area d'indagine al netto delle aree pianeggianti interessate da coperture alluvionali e detritiche quaternarie è di 54.800 ha (29.800 ha per Pula-Capoterra e 25.000 ha per Muravera-Quirra). Il rilevamento di campagna è stato pianificato sia sulla base delle classi morfometriche ipotizzate che per unità di parent material (metamorfiti e plutoniti paleozoiche di vario tipo, affioranti in entrambe le aree, e lave cenozoiche a composizione intermedio-basica, affioranti nella sola area di Pula-Capoterra). Complessivamente sono state fatte 856 osservazioni (618 per Pula-Capoterra e 238 per Muravera-Quirra).

Le osservazioni hanno evidenziato come, in entrambe le aree d'indagine e sui *parent material* costituiti da metamorfiti paleozoiche di vario tipo, la distribuzione delle tipologie pedologiche sia fortemente influenzata dalla concavità e dalla convessità delle forme. Infatti, nelle aree concave sono largamente diffusi suoli profondi, sviluppatisi su depositi di versante e colluviali, associati a suoli sottili sviluppatisi direttamente sui litotipi considerati. Viceversa, nelle aree convesse prevalgono largamente i suoli sottili e solo in tratti molto limitati sono presenti suoli profondi sviluppatisi su depositi. Sui parent material costituiti dalle plutoniti paleozoiche, in entrambe le aree d'indagine, la distribuzione delle tipologie pedologiche segue lo stesso schema riscontrato per le metamorfiti paleozoiche. A differenza di queste ultime però, nelle aree di affioramento delle plutoniti i volumi dei depositi sono minori. Ciò è sicuramente determinato dalla maggiore facilità di trasporto, ad opera delle acque di ruscellamento, dei prodotti di alterazione delle plutoniti, di dimensioni assai più ridotte rispetto a quelli delle metamorfiti. Anche sui parent material costituiti dalle lave cenozoiche a composizione intermedio-basica la distribuzione delle tipologie pedologiche segue lo stesso schema riscontrato per i parent material precedenti. In questo caso i depositi sono però unicamente di tipo colluviale. Per quanto invece concerne i valori di acclività, non è stato riscontrato alcun evidente rapporto con la distribuzione delle tipologie pedologiche. Pertanto, sui substrati pedogenetici considerati, l'acclività sembra avere una influenza minore rispetto alla curvatura nei confronti delle proprietà dei suoli.

Conclusioni

Lo sviluppo dei sistemi di analisi del DEM per estrarre gli indici geomorfometrici e quantificare la forma della superficie terrestre è legato alla necessità di cartografare e descrivere le forme del terreno secondo schemi di classificazione generali. La disponibilità di dati con una buona risoluzione geometrica permette di poter applicare questi metodi anche in progetti applicativi che richiedono risultati immediatamente utilizzabili. In questo senso il supporto dato dall'analisi morfometrica proposta ha permesso di ottimizzare i tempi di elaborazione della cartografia di base necessaria alla classificazione pedologica sviluppata nel progetto. Si ritiene pertanto che l'approccio metodologico utilizzato contribuisca significativamente, per quanto riguarda i litotipi considerati, alla realizzazione di carte di semi-dettaglio contenenti informazioni pedologiche e basate sul paradigma suolo-paesaggio.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i colleghi rilevatori dell'AGRIS Sardegna, Rita Puddu, Stefania Fanni, Gianluca Serra, Daniele Manca, Massimo Melis, e Lorenzo Zucca per il prezioso contributo nella raccolta dei dati in campagna.

Questo lavoro è inserito nelle attività inerenti il Progetto Carta delle Unità delle Terre e della capacità d'uso dei suoli – 1° lotto, finanziato dalla Regione Autonoma della Sardegna con deliberazione DGR n. 56/36 del 29.12.2009.

Riferimenti bibliografici

- Arangino, F., Aru, A., Baldaccini, P., Vacca, S. (1986). *I suoli delle aree irrigabili della Sardegna, in scala 1:100.000*. Assessorato Regionale alla Programmazione Bilancio ed Assetto del Territorio, Ente Autonomo del Flumendosa, Cagliari.
- Aru, A., Baldaccini, P., Delogu, G., Dessena, M.A., Madrau, S., Melis, R.T., Vacca, A., Vacca, S., (1990). *Carta dei suoli della Sardegna, in scala 1:250.000*. Dipartimento Scienze della Terra Università di Cagliari, Assessorato Regionale alla Programmazione Bilancio ed Assetto del Territorio, SELCA, Firenze.
- Batuk F., Emem O., Gorum T., Gokasan E. (2008). *Implementation of GIS for Landforms of Southern Marmara*. Integrating Generations FIG Working Week 2008 Stockholm, Sweden 14-19 June 2008.
- Birkeland, P.W. (1999). *Soils and Geomorphology*, 3rd Edition. Oxford University Press, New York.
- Brady, N.C., Weil, R.R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*, 14th Edition. Prentice Hall/Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey.
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniel, P.A. (2011). *Soil Genesis and Classification*, 6th Edition. John Wiley, Chichester, UK.
- Burrough, P. A. and McDonell, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* (Oxford University Press, New York), p. 190.
- Dikau R. (1989). *The application of a digital relief model to landform analysis*. Irt Raper, J.F. (Ed.). Three dimensional Application in Geographical Information Systems. Taylor & Francis, London, pp. 55-77.
- Evans, I.S. (1979). *An integrated system of terrain analysis and slope mapping*. Final report on grant DA-ERO-591-73-G0040, University of Durham, England.
- Florinsky, I.V. (1998) *Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid*. International Journal of Geographical Information Science, 12: 8, 829 – 852.
- Florinsky, I.V., Eilers, R.G., Manning, G.R., Fuller, L.G. (2002). *Prediction of soil properties by digital terrain modeling*. Environmental Modelling & Software 17 (3), 295-311.
- Häring, T., Dietz, E., Osenstetter, S., Koschitzki, T., Schröder, B. (2012). *Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian forest soils*. Geoderma 185-186, 37-47.

- Iwahashi J, Pike R J. (2007). *Automated classifications of topography from SYMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature*, *Geomorphology* 86, pp 409–440.
- Jenness, J. (2011). *DEM Surface Tools v. 2.1.292*. Jenness Enterprises. Available at: http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area.htm.
- MacMillan, R.A., Shary, P.A. (2009). *Landforms and Landform Elements in Geomorphometry*. In: T. Hengl and H.I. Reuter (Ed.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, 227-254.
- Madrau, S., Deroma, M., Loj, G., Baldaccini, P. (2006). *Carta ecopedologica della Sardegna, in scala 1:250.000*. Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Università degli Studi di Sassari, Sassari.
- Marrone, V.A., Vacca, A., Vecchio, G., Apollaro, C., Caruso, A.M., Scarciglia, F., Aru, A., De Rosa, R. (2008). *Pedopaesaggi e suoli del foglio IGMI 549-Muravera (Sardegna sud-orientale)*. In: Ottonello, G. (Ed.), *GEOBASI – Il Foglio IGMI N° 549-Muravera*, Pacini Editore, Pisa, pp. 59-85.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. and Peterson, G.A. (1993). *Soil attribute prediction using terrain analysis*. *Soil Science Society of America Journal*. Vo. 57(2). 443 – 452.
- Pike, R.J., (2001). *Geometric signatures—experimental design, first results* (abs.): Int'l. Conference on Geomorphology 5th, Chuo Univ., Tokyo, Japan, August 2001; *DEMs and Geomorphology*, Geographic Information Systems Association (Japan) Special Publication, v. 1, p. 50-51; and *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, v. 22, no. 4, p. C-192.
- Pike R.J., Evans I.S., Hengl T. (2009). *Geomorphometry: A Brief Guide*. In: T. Hengl and H.I. Reuter (Ed.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, 227-254.
- Porres de la Haza, M.J. and Pardo Pascual, J.E. (2002). *Comparison between the different curvature models of terrain for determining the degree of soil humidity*. P. 238 – 245 in *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, José A. Sobrino, Ed., Publicacions de la Universitat de València
- Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V. (2002). *Fundamental quantitative methods of land surface analysis*, *Geoderma* 107 (2002),pp 1 –32.
- Schmidt, J., Evans, I.S. and Brinkmann, J. (2003). *Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation*. *International Journal of Geographical Information Science*, 17: 8, 797 – 814.
- Tesfa, T.K., Tarboton, D.G., Chandler, D.G., McNamara, J.P. (2009). *Modeling soil depth from topographic and land cover attributes*. *Water Resources Research* 45, W10438, doi:10.1029/2008WR007474.
- Zevenbergen, L.W., and C.R. Thorne (1987). *Quantitative analysis of the land surface topography*. *Earth Surf. Proc. And Landf.*, 12, 47-56.
- Woods, J. (1996). *The geomorphological characterization of Digital Elevation Models*. PhD thesis Department of Geography, University of Lancaster, UK.
- Wilson, J.P., and Gallant, J.C. editors, (2000), *Terrain Analysis: Principles and Applications* (Chichester: Wiley).