

Aplicații GIS în Geomorfologie

Introducere

Cercetarea geomorfologică modernă este indisolubil legată de tehnologia geospațială și de sistemele informaționale geografice/știința informațiilor geografice (SIG/GIS). Datorită avansurilor tehnologice rapide ale teledetecției, geodeziei, fotogrammetriei, informaticii și GIS-ului, aplicarea instrumentelor de analiză care utilizează informații digitale ale suprafeței terenului a revoluționat cercetarea cantitativă în geomorfologie (**Bishop, 2013**). În ultimele trei decenii, GIS-ul a influențat din ce în ce mai multe sub-domenii ale geomorfologiei.

Aplicațiile software GIS sunt concepute pentru a facilita investigațiile spațiale, de exemplu, prin analize geostatistice sau descrierea matematică a suprafețelor și, prin urmare, sunt legate în mod inerent de metodologia și conceptele geomorfologiei. Inclusiv apariția GIS este legată de utilizarea suprapunerii în geomorfologie (Roger Tomlinson, “părintele GIS-ului” fiind un geomorfolog specializat în geomorfologie glaciară) extinsă ulterior în utilizarea terenului (**Tomlinson, 1967**).

Instrumentele GIS sunt de folos multor domenii de cercetare de frontieră în geomorfologie, de la descrierea cantitativă a formelor de relief până la modelarea proceselor, investigarea interrelațiilor forme-proces și legăturilor cu condițiile climatice și de mediu sau evaluarea fluxurilor de sedimente. Mai mult, procesarea și modelarea formelor de relief, analiza statistică și regionalizarea suprafețelor, precum și vizualizarea grafică și crearea hărților sunt caracteristici cheie ale GIS-ului aplicat în geomorfologie. Una dintre ramurile geomorfologiei, în care instrumentele GIS sunt cele mai utilizate este **geomorfometria**.

Un punct de plecare pentru studiile GIS este în mod obișnuit modelul numeric al terenului (MNT/DTM – Digital Terrain Model) cu date raster de diferite tipuri. Cu toate acestea, instrumentele GIS permit, de asemenea, conectarea informațiilor de teledetecție cu date de interpolare, de exemplu, caracteristici ale suprafeței de terenului, rate de proces sau informații subterane, înregistrate cu sisteme de teledetecție sau geofizică. La ora actuală foarte multe MNT-uri (a căror altitudine este a terenului, adică relief+vegetație+antropic=topografie), sunt modele numerice ale altitudinii suprafeței terestre (MNST/DEM – Digital Elevation Model)

Rădăcinile geomorfometriei pot fi identificate în studiile timpurii ale lui **Penck (1894)**. Ideile sale de pionierat privind formele de relief au condus la stabilirea structurilor taxonomice care au fost utilizate în multe studii ulterioare (de exemplu, **Ahnert, 1970**; **Kugler, 1975**; **Evans, 1972**). O nouă eră în aplicarea GIS în studiile geomorfologice a început, însă, aproape 100 ani mai

târziu, în anii '90. Lucrările clasice ale lui **Dikau și al. (1991)**, **Moore și colab. (1991)**, **Pike și Dikau (1995)** sau **Wilson și Gallant (2000)** s-au concentrat pe parametrii geomorfometrici ("terrain attributes"), clasificările digitale ale formelor de teren și progresele geomorfometrice generale utilizând DEM-uri, respectiv.

Primele aplicații ale GIS pe teme geomorfologice tradiționale, cum ar fi alunecările de teren, eroziunea solului și distribuția permafrostului montan a avut succes la scară regională sau locală (**Cararra și al., 1991**; **Chairat și Delleur, 1993**; **Deroo și colab., 1989**; **Dikau și Jäger, 1995**; **Eash, 1994**; **Jäger, 1997**; **Keller, 1992**; **vanWesten și Terlien, 1996**; **Koethe și Lehmeier, 1993**).

De la sfârșitul anilor '90, observăm o utilizare din ce în ce mai mare a GIS-ului în studiile geomorfologice. Această dezvoltare este puternic legată de progresele informaticii, teledetecției și fotogrammetriei, precum și geofizicii superficiale (**Bishop, 2013**). În special, disponibilitatea seturilor de date digitale globale a impulsivat aplicațiile și cercetarea în GIS pentru suprafața terenului și analiza proceselor. La scară globală, DEM-urile cu rezoluții cuprinse între 1 și 30 m sunt acum disponibile pentru întregul glob terestru (GLOBE, SRTM, GDEM, ALOS, Copernicus).

În plus, în special după 2000 au apărut tehnica de scanare cu laser (LiDAR: **Light Detection And Ranging**) și structura din mișcare (SFM), utilizabile atât la sol cât și în aer. Acestea furnizează DEM-uri de înaltă rezoluție (<1 m) la scară locală și regională. Numeroase programe GIS, atât comerciale (ArcGIS), cât și open source (GRASS GIS, QGIS, SAGA GIS), sunt disponibile astăzi, oferind oportunități nelimitate pentru cercetători (prin scripting). În consecință, utilizarea instrumentelor GIS pentru analize geomorfologice a devenit tot mai populară. Recenzii complete asupra elementelor de bază ale tehnicilor de teledetecție și aplicarea GIS în cercetarea geomorfologică sunt furnizate de **Bishop (2013)** și **Oguchi și Wasklewicz (2011)**.

Aplicațiile GIS în geomorfologie se extind de la abordări de vizualizare pură, clasificare a reliefului, a suprafeței terenului și analiză hidrologică, modelarea proceselor geomorfologice și eroziunii, detectarea modificărilor topografice și modelarea hazardului și riscului. În timp ce multe aplicații care se concentrează pe analiza suprafeței terestre, detectarea schimbărilor topografice sau modelarea riscului sunt efectuate în aplicații specifice GIS, unele abordări folosesc software statistic (de exemplu, pachetul software R) sau software special de modelare (de exemplu, Matlab, IDL) pentru a efectua analize geospațiale. De exemplu, modelarea proceselor erozionale și evoluția reliefului necesită deseori cerințe care depășesc capacitățile software GIS și sunt folosite alte resurse (de exemplu, **Chen și al., 2014**; **Coulthard, 2001**; **Tucker and Hancock, 2010**).

În timp ce software-ul GIS a devenit mai puternic și chiar a furnizat instrumente grafice avansate, o dezvoltare simultană a cartării geomorfologice digitale nu s-a realizat. Acest lucru este oarecum surprinzător, deoarece suprapunerea diferitelor straturi geomorfologice reprezintă unul dintre cele mai importante instrumente în aplicațiile GIS și îmbunătățesc aplicabilitatea hărților (**Otto și Smith, 2013**). Cu toate acestea, cartografierea geomorfologică și GIS-ul au devenit o combinație evidentă (**Gustavsson și al., 2006**; **Otto și Dikau, 2004**; **Schoeneich, 1993**). Mai mult, hărțile geomorfologice spre exemplu servesc acum ca un produs intermediar pentru analizele cantitative ale bugetului de sedimente. Pentru aceasta, modelarea GIS a modelelor numerice ale

terenului este combinată cu informații subterane, cum ar fi grosimea solului sau a regolitului, care este derivată din sondaje geofizice. Cunoștințele acumulate despre distribuția spațială a tipurilor de depozite și a sedimentelor joacă un rol important în studiile bugetelor cantitative de sedimente (Otto și al., 2009; Schrott și al., 2003b; Theler și al., 2008).

Multe abordările utile de modelare GIS au fost dezvoltate în domeniul riscurilor naturale. Alunecările de teren, inundațiile, avalanșele sau eroziunea solului sunt hazarduri ale căror caracteristici, cum ar fi magnitudinea sau extinderea spațială depind puternic de pantă, expoziție sau alți parametri care pot fi integrați în mod ideal și afișați în mediile GIS (de ex., Gruber și Mergili, 2013; Gruber și Bartelt, 2007; Lan și al., 2007; vanWesten și Terlien, 1996; Wilford și al., 2004; Wichmann și Becht, 2006). Evaluarea riscului folosind GIS combină adesea analiza geomorfometrică cu analiza geostatistică a parametrilor asociați pentru a genera modele de susceptibilitate spațială (Carrara și Guzzetti, 1995). Recenzii cuprinzătoare privind metodologiile aspecte și evaluări ale riscurilor bazate pe GIS pot fi găsite în Guzzetti și al. (1999), Huabin și al. (2005), și van Westen și al. (2008).

Aplicabilitatea GIS în Geomorfologie a „explodat”, mai ales după apariția calculatoarelor personale (după anii 1980) și a generalizării modelelor numerice ale suprafeței terenului (după anii 2000). SIG este utilizat în cele trei etape ale demersului geomorfologic:

- (i) inventariere/cartare,
- (ii) analiză și
- (iii) modelare,
- (iv) vizualizare și reprezentare.

Inventarierea cu ajutorul GIS se referă la:

- (i) conversia raster/vector prin digitizare,
- (ii) conversia raster/vector a rezultatelor unor analize,
- (iii) conversia datelor alfanumerice obținute prin cartare topografică sau GPS.

Analiza cu ajutorul GIS se referă la: crearea rapoartelor statistice geomorfometrice pe baza datelor raster și vector cu atribut.

Modelarea cu ajutorul GIS se referă la:

- (i) crearea unor modele de reprezentare a dinamicii proceselor geomorfologice, și
- (ii) aplicarea lor.

Oguchi (2006) a identificat o serie de direcții majore care sunt urmărite la ora actuală:

1. analiza geomorfometrică generală a variabilelor geomorfometrice;
2. analiza geomorfometrică a rețelei hidrografice și a bazinelor hidrografice;
3. cartarea semi-automată a reliefului;

4. modelarea proceselor geomorfologice;
5. modelare susceptibilității spațiale pentru estimarea hazardului și riscului geomorfologic;
6. detecția și analiza schimbărilor topografice determinate de procesele geomorfologice.

Parametrii suprafeței terestre și indicii geomorfometrici/geomorfologici

Analiza cantitativă a suprafeței terenului este definită prin termenul geomorfometrie, un domeniu de cercetare extrem de activ în cadrul geomorfologiei (**Hengl și Reuter, 2009; Wilson și Bishop, 2013**). Focusul său este pe cuantificarea parametrilor suprafeței terenului (LSP) și detecția obiectelor geomorfometrice. La rândul său, geomorfometria ca arie de cercetare construiește o bază teoretică și servește ca punte de legătură între GIS și geomorfologie (**Dikau, 1996**). Analiza geomorfometrică poate fi separată în abordări generale și specifice (**Evans, 1972; Goudie, 1990**). Principala distincție între cele două abordări este caracterul continuu sau discontinuu al obiectului studiat. Abordările generale analizează suprafața continuă a terenului, fără a aborda specific formele de teren sau limitele acestora. Geomorfometria specifică își propune să identifice și să descrie formele de relief discrete și morfologia caracteristică a acestora. Un accent al abordărilor specifice este extragerea acestor forme de pe o suprafață continuă, problemă care se află la frontiera cercetării geomorfometriei (**Evans, 2012**).

LSP sunt atribute geometrice sau statistice ale unei suprafețe de teren care pot fi derivate direct de pe un DEM. Ele pot fi cuantificate la nivel local sau implică o abordare regională de analiză (**Olaya, 2009**). În timp ce parametrii locali sunt cuantificați pentru o singură locație în relație cu pixelii înconjurători imediați, parametrii regionali includ relații cu pixelii mai îndepărtați. Cele mai frecvente LSP de bază sunt altitudinea, panta, expoziția și curburile și reprezintă exemple pentru parametrii locali. Parametrii regionali includ aspecte ale fluxurilor de suprafață, de exemplu, utilizarea DEM-urilor în modelarea condițiilor hidrologice, la delimitarea bazinelor de drenaj sau cuantificarea puterii și intensității radiațiilor solare (**Gruber și Peckham, 2009; Böhner și AntoniĆ, 2009**). Exemple de LSP hidrologice sunt direcția de drenaj, acumularea ariei de drenaj și rețelele de drenaj. Relaționarea LSP cu cele trei concepte fundamentale în geomorfologie, (i) forma, (ii) procesul și (iii) materialul (**Gregory și Lewin, 2014**) generează aplicabilitatea în geomorfologie. De exemplu identificarea curburii și a pantei ca descriptori principali ai formei, altitudinii, pantei și ariei de drenaj ca factori ce influențează intensitatea proceselor geomorfologice (în cazul proceselor fluviale și gravitaționale) și a rugozității suprafeței ca indicator al caracteristicilor materialelor de suprafață (**Otto și colab., 2012**) permite corelarea unor analize de teren cu analiza geomorfometrică pentru a analiza geomorfologic un teritoriu.

Pe baza acestor parametri de bază au fost dezvoltăți numeroși indici topografici sau geomorfologici pentru a studia geomorfologic formele și procesele. Indicii geomorfologici sunt

combinații ale atributelor primare care descriu sau caracterizează variabilitatea spațială a proceselor specifice sau a formelor de relief care apar în peisaj și pot fi utilizați pentru a cartografi formele de relief și analiza procesele geomorfologice (**Pike și Wilson, 1971; Wilson și Gallant, 2000**). Acești indici sunt aplicați în modelarea proceselor erozive, modelarea hidrologică sau cartografierea digitală a solului, pentru a numi doar câteva dintre aplicații (**Marthews și colab., 2015; Moore și colab., 1991**). Mulți indici geomorfologici au fost formulați înainte de apariția GIS în perioada geomorfologiei clasice când aceasta avansa spre metode cantitative (de exemplu, **Leopold și colab., 1964; Strahler, 1952, 1957; Bagnold, 1960**). Cu toate acestea, instrumentele GIS facilitează cuantificarea acestor parametri și, în combinație cu DEM-urile, permit aplicarea cu rapiditate și obiectivitate a acestor indici pe suprafețe mari. Trebuie recunoscut, totuși, că unii indici sunt conectați la un spațiu distinct, scara și aplicabilitatea lor având sens doar la scări mari de lucru (scări regionale sau globale). Ele servesc, de exemplu, pentru compararea caracteristicilor bazinelor de drenaj sau ansamblurilor formelor de relief (de exemplu, densitatea de drenaj, hipsometrie, raportul de relief, etc.). Alți indici pot fi aplicați pe mai multe nivele de scări de lucru, de exemplu, rugozitatea terenului poate fi calculată cu ferestre glisantă (kernel) de diverse mărimi.

Sursele de date

Modelele numerice ale terenului

O abundență de date privind altitudinea a fost produsă din diferite surse în ultimele decenii. Extensia spațială și rezoluția unor astfel de seturi de date a crescut odată cu puterea de calcul și capacitățile de stocare digitală. Studii geomorfologice moderne de obicei utilizează un DEM cu o rezoluție între 1 și 90 m. DEM-urile cu rezoluție scăzută (dimensiunea pixelului mai mare de 30 m) sunt utilizate pe scară largă pentru analize ale evoluției reliefului. Acoperirea extinsă, adesea globală, a DEM-urilor cu rezoluție scăzută permite analize la scară largă și comparații între zonele de studiu din întreaga lume. Seturile de date de rezoluție medie până la înaltă (dimensiunea pixelilor între 1 și 30 m) sunt de obicei naționale, cu acces limitat și sunt o alegere bună pentru modelarea regională a diferitelor LSP. Rezoluțiile submetrice sunt în mare parte produse de companii individuale și limitate spațial la areale de ordinul km². Astfel de seturi de date permit analize detaliate ale proceselor geomorfologice.

Tehnicile de achiziție variază și cuprind teledetecția activă (radar, LiDAR) și pasivă (optică). În timp ce LiDAR terestru și aeropurtat a dominat achiziția de modele de înaltă rezoluție din ultimele două decenii, fotogrammetria are a cunoscut o renaștere datorită tehnologiei dronelor accesibile și DEM-urilor de înaltă rezoluție obținute prin tehnicile SFM. Cel mai utilizat DTM global cu o rezoluție <90 m este Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (**Farr și colab., 2007**), disponibil de la 60° latitudine nordică la 60° latitudine sudică cu o rezoluție de 1 secundă de arc (aproximativ 30 m la ecuator) și ASTER GDEM (**Gesch și colab., 2012**), un DSM global derivat din imagini satelitare ASTER¹ prin fotogrammetrie stereo și disponibil de la 83° latitudine nordică la 83° latitudine sudică cu o rezoluție de 1 secundă de arc. Mai mult, HydroSHEDS²

¹ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

² Seamless hydrographic data for global and regional applications

(Lehner și colab., 2008) derivat din SRTM furnizează informații hidrografice la nivel global. WorldDEM bazat pe interferometrie radar (<http://www.intelligence-airbusds.com/worlddem/>) a datelor Misiunii TanDEM-X de către Centrul Aerospațial German tocmai a fost finalizată în octombrie 2016 și pentru prima dată oferă la nivel global un model al terenului cu o rezoluție de 12 m (Zink și colab., 2006, 2011). Pe baza acestuia ESA (European Space Agency) a derivat un model global la o rezoluție de 30 m, COPDEM30³ disponibil gratuit și care este înlocuitorul SRTM.

Imaginile Optice

Geomorfologii folosesc imagini cu teledetecție de când au devenit disponibile în prima jumătate a secolului XX. Șerb Troll a fost unul dintre primii geografi fizicieni care au folosit sistematic imagini aeriene pentru domeniul emergent al geomorfologiei (Lautensach, 1959).

În timp ce fotografia aeriană convențională este încă aplicată pe scară largă pentru studii locale, teledetecția prin satelit a devenit un instrument util atunci când se analizează zone mai extinse. Odată cu primul satelit Landsat în 1972, a intrat observația convențională a pământului din spațiu într-o nouă eră. De atunci a devenit posibilă cercetarea continuă a suprafețelor mari din spațiu, cu revenire asupra aceeași localități la numai 18 zile. De atunci, orbita inferioară a pământului (160-2000 km deasupra solului) a devenit plină de sateliți ai diferitelor agenții. Pe lângă marea flotă de sateliți lansată de Administrația Națională Aeronautică și Spațială a SUA (NASA) din anii '70, alte câteva agențiile spațiale naționale și companiile private au lansat propriile lor misiuni de observare a pământului, de exemplu, sateliții SPOT 1-7 (lansați între 1986 și 2014) de CNES (Franța), familia de sateliți IRS (lansată între 1988 și 1996), operată de ISRO (India), sateliții World-View 1-4 (Digital Globe) (lansați între 2007 și 2016) și sateliții Sentinel 1–3 de ESA (lansați între 2015 și 2017), pentru a numi doar câteva.

Odată cu dezvoltarea continuă de noi senzori (și lansarea de noi sateliți), rezolvarea spațială la sol a imaginilor optice a fost îmbunătățit foarte repede. În timp ce primii sateliți Landsat aveau o rezoluție maximă la sol de 60 m (reeșantionată), WorldView-3 colectează imagini cu o rezoluție la sol de 31 cm, un nivel de detaliu la care doar imaginile aeriene ajungeau înainte. Serviciile precum GoogleEarth sau BingMaps fac aceste imagini de înaltă rezoluție disponibile pentru interpretarea și compararea vizuală a diferitelor etape temporale.

Pentru aplicațiile geomorfologice, rezoluția temporală a imaginilor prin satelit poate fi cel puțin la fel de importantă ca și în continua creștere a rezoluției spațiale a misiunilor recent lansate. Pentru detectarea modificărilor geomorfologice, ambele serii de timp îndelungate de imagini satelitare și perioade scurte de revizuire ale aceleiași localități au o importanță vitală. Creșterea puterii de calcul, dar și deciziile politice de finanțare a unor misiuni publice din ultimul deceniu au sporit utilizarea produselor de teledetecție satelitară în domeniul științelor (Wulder și Coops, 2014).

De la o modificare a politicii de date din 2008, milioane de imagini achiziționate de familia sateliților Landsat între 1972 și prezent au devenit disponibile fără costuri. Satelitul Landsat 8, lansat

³ <https://spacedata.copernicus.eu/web/cscda/dataset-details?articleId=394198>

în 2013 pentru a asigura continuitatea datelor cu aceleași specificații ca și înainte, colectează câteva sute de imagini în fiecare zi, revenind la aceeași locație la fiecare 16 zile. Distribuția gratuită a acestor imagini prin intermediul USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) a stimulat utilizarea produselor satelitare în cercetarea geomorfologică, permițând detectarea schimbărilor geomorfologice din spațiu pe parcursul a peste patru decenii. La scurt timp după 2008, studii geoștiințifice utilizând imaginile Landsat disponibile liber a crescut brusc.

În 2016, datele înregistrate de ASTER, un senzor de pe satelitul Terra (rezoluție senzor: 15–90 m), au devenit disponibile și libere (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/>). Din 2014, imaginile Sentinel de la Agenția Spațială Europeană (ESA) au fost distribuite prin intermediul Centrului științific ESA (<https://scihub.copernicus.eu>) fără costuri, primele date fiind cele radar ale sateliților Sentinel1A și 1B. Lansat în 2015, satelitul Sentinel-2A colectează deja imagini optice cu rezoluție de 10 m la sol și interval de revizitare de 10 zile la ecuator, oferind o rezoluție comparabilă la sol și specificații spectrale ca Imagini Landsat și ASTER. Împreună cu satelitul Sentinel-2B (lansat la începutul lui 2017), Misiunea Sentinel-2 va livra imagini optice cu un timp de revizuire de 5 zile la ecuator (2 - 3 zile la latitudinile medii). Pe lângă cu produsele de teledetecție, ESA oferă o serie de instrumente software de sine stătătoare, pentru procesarea imaginilor Sentinel sau altor imagini de teledetecție.

Potențialul cercetării geomorfologice de a dobândi cunoștințe prin cantitatea enormă de produse de teledetecție este imens. Una dintre cele mai proeminente aplicații în geomorfologie este detectarea schimbărilor glaciare din spațiu (Kääb et al., 2016; Paul și colab., 2015), dar imagini satelitare multitemporale au fost aplicate și studiilor alunecărilor de teren (Scaioni și colab., 2014; Stumpf și colab., 2017), geomorfologie fluvială (Legleiter și Fonstad, 2012; Rowland și colab., 2016) și eroziune litorală (Hara și colab., 2015; Li și Damen, 2010).

Vehiculele aeriene fără pilot (UAVs) și structura din mișcare (SfM)

În ceea ce privește rezoluția la sol, fotografia aeriană convențională depășește de departe imaginile satelitare. Dezavantajul major al fotografiei aeriene convențională este totuși achiziția de date costisitoare din avioane mici sau elicoptere. Tehnologic progresele din ultimul deceniu au revitalizat utilizarea fotografiei aeriene în geoștiințe. De asemenea, vehicule aeriene fără pilot (UAV) denumite drone sau multicoptere, sunt disponibile la costuri reduse și fac achiziția de date ieftină și relativ ușoară. Mai ales în zone îndepărtate și pe terenuri abrupte și accidentate, unde efectele de umbră limitează utilizarea fotografiei aeriene convenționale achiziția de fotografii aeriene de înaltă rezoluție de pe platformele UAV oferă noi posibilități. Mai mult, sondaje repetate fac posibilă detectarea schimbărilor geomorfologice la scări mici pe care datele de teledetecție de la sateliți nu le pot rezolva în detalii comparabile.

Alături de avansările în achiziția de date, software-ul și algoritmi de procesare a imaginilor recent dezvoltate oferă noi oportunități pentru cercetare geoscientifică. Fotogrammetria digitală, bazată pe aceleași principii ca fotogrammetria clasică, este o metoda puternică pentru extragerea topografiei digitale din imagini suprapuse (Baltsavias și colab., 2001; Keutterling și Thomas, 2006;

Lane și colab., 2000). În ultimii doi ani, SFM, o nouă metodă fotogrammetrică cu buget redus pentru a crea DEM-uri de la suprapunere imagini, a atras atenția comunității de științe (Fig. 1). Spre deosebire de fotogrammetria clasică, geometria imaginii, orientarea și poziția camerelor spre obiectul de interes nu sunt o condiție prealabilă. Software-ul SFM calculează aceste parametrii prin potrivirea caracteristicilor comune într-un set de imagini digitale suprapuse (Snavely și colab., 2008). Pentru un cuprinzător rezumat al instrumentelor SFM și al aplicațiilor lor în științe, vezi Westoby et al. (2012).

Alte surse de date

GIS oferă numeroase posibilități de a combina seturi de date din diferite surse pentru analiză și vizualizare. Pe lângă DEM și imagine date, tot felul de date de teren și laborator pot fi importate în GIS pentru analiză. Date privind caracteristicile materialelor de suprafață produse de eșantionarea, coringul sau geofizica de suprafață aproape, datele de cartografiere, precum și măsurătorile ratelor de proces și a datelor de laborator, de exemplu, analiza sedimentelor sau informații de datare, pot fi combinate cu date digitale ale suprafeței terestre. O condiție necesară pentru combinarea câmpul / laboratorul și datele digitale sunt corecte. Sistemele de poziționare globală (GPS-uri) au devenit o cerință standard pentru teren muncă. Receptoarele GPS moderne combinate cu semnale de corecție transferate prin comunicații mobile oferă o precizie ridicată date de poziționare. În plus, poziționarea cu rezoluție scăzută este disponibilă în fiecare smartphone, care pare aproape omniprezent azi. Un mare potențial constă în combinarea informațiilor de suprafață și suprafață. Mai ales cu cele obișnuite tehnici de geofizică de suprafață aproape, formele de teren pot fi studiate în trei dimensiuni. Cele mai frecvent utilizate tehnici în geomorfologia este radar care pătrunde la sol, metode seismice, rezistivitate și metode EM și metode de gravitație (Kruse, 2013; Schrott și Sass, 2008). Deoarece majoritatea sistemelor geofizice au un format de date distinct și multe metode furnizează date de-a lungul unui sondaj linie, transferul informațiilor subterane necesită adesea o conversie a, de exemplu, informații de profunzime în date punctuale sau linii, înainte de procesarea ulterioară a software-ului GIS este posibilă. Cartarea geomorfologică digital

Crearea hărților

Cartografia geomorfologică este un instrument fundamental pentru geomorfologi. Hărțile geomorfologice sunt tematice extrem de complexe hărți care conțin diferite straturi diferite de informații geomorfologice. Crearea hărților digitale necesită o bună proiectare a hărții și instrumente grafice sofisticate pentru a produce o hartă lizibilă și de înțeles. Evoluțiile grafice și analitice funcțiile din software GIS oferă numeroase instrumente valoroase care facilitează crearea și distribuția hărților. Comparativ cu analogul metodele de creare a hărților, aplicarea instrumentelor software GIS reprezintă o simplificare semnificativă a procesului de producție și o reducere importantă a timpului de creare și a costurilor de producție.

În cadrul programelor GIS, manipularea și analiza diferitelor tipuri de informații geomorfologice, de exemplu, delimitarea, măsurare, operații matematice și altele, precum și proiectarea și producerea mapare posibilă. În plus, Structura de stocare logică a datelor

geomorfologice permite producerea rapidă a hărților derivate cu focus tematic special, cum ar fi domenii de proces, procese de suprafață, materiale de suprafață sau altele. Hărțile geomorfologice sunt create cu ajutorul datelor colectate în timpul campaniilor de teren și / sau a datelor extrase din surse de date digitale precum fotografie aeriană, imagini prin satelit și DEM-uri. Camp cartografierea este îmbunătățită semnificativ folosind dispozitive mobile precum tablete sau computere portabile conectate cu GPS. Cartare de camp software, de obicei un software de tip GIS, permite colectarea directă a observațiilor într-un sistem de baze de date georeferențiate care poate fi ulterior să fie transferat pe GIS-ul de desktop utilizat pentru crearea hărții (Gustavsson și colab., 2008; Minar și colab., 2005). Procesul de mapare poate fi efectuate manual, automatizate sau semiautomate. Cartografierea manuală se bazează pe experiența și competența cartografului folosind euristică vizuală pentru identificarea formelor de interes. Metoda este simplă și rapidă de implementat, iar precizia este în general ridicată.

Cartografierea automată sau semiautomată permite generarea de informații mai obiective și repetabile, dar, de obicei, rămâne în urmă precizie în comparație cu abordările manuale. Metodele corespondente se bazează pe tehnici de extracție a caracteristicilor aplicate satelitului / aerianului imagini sau diferite tipuri de DEM-uri și instrumentele derivate ale acestora (vezi Secțiunea „Clasificarea automată a suprafeței de teren”). Reprezentarea a unei forme de teren pe o imagine depinde de (i) forma de teren în sine, (ii) sursa de date și (iii) metoda de vizualizare (Otto și Smith, 2013; Smith, 2011). Smith și Wise (2007) au identificat trei controale principale asupra reprezentării formelor de teren imagini: (i) dimensiunea relativă: mărimea formei de teren în raport cu rezoluția spațială, (ii) polarizarea azimutului: orientarea forma terenului în raport cu azimutul solar și (iii) puterea semnalului formei de teren: diferențierea tonală / texturală a formei terestre.

În consecință, reflectarea relativă a formei de teren în raport cu caracteristicile înconjurătoare determină detectabilitatea a landform. DEM-urile sunt aplicate folosind derivate de creștere care oferă diverse forme de vizualizare a informațiilor inerente incluzând umbrirea în relief, gradientul (unghiul de înclinare) sau clasificarea curbării. Conținutul complex al hărților geomorfologice este descris folosind simboluri compuse și deseori ilustrative (Otto și colab., 2011). Software-ul GIS oferă instrumente pentru crearea simbolurilor personalizate reprezentând funcții și funcții geomorfologice proiectare cartografică și producție de hărți. Hărțile produse digital sunt distribuite cu ușurință în diferite formate, de la tipărire hărți către serviciile web online, utilizând la maxim structura de organizare a datelor și georeferențierea datelor (Smith și colab., 2013). În plus, formatul PDF standard (format de document portabil) a fost extins într-un GeoPDF pentru afișare și difuzare a datelor de hartă referite. Funcționalitatea geospațială a unui GeoPDF include afișarea hărții scalabile, controlul vizibilității stratului, accesul pentru a atribui date, coordonarea interogărilor și măsurători spațiale (www.terragotech.com).

Clasificarea automată a reliefului

Clasificările generale

Extragerea entităților discrete dintr-o imagine digitală continuă a fost un domeniu de cercetare principal în cadrul geomorfometriei de zeci de ani. Evans (2012) subliniază necesitatea

de a face distincția între forma terenului și forma suprafeței terestre. Diferența dintre cele două rezultă din întreruperea sau continuitatea caracteristicii, respectiv (referindu-ne la conceptul de geomorfometrie generală și specifică, vezi discuția anterioară). Sarcinile legate de descrierea suprafeței continue a terenului sunt abordate aici ca clasificare generală a suprafeței de teren, în timp ce formele de teren discontinue vor fi tratate în capitolul următor privind clasificarea specifică a suprafeței de teren. Cadre teoretice pentru clasificarea generală a suprafeței de teren au fost dezvoltate de mai mulți autori, abordând în mare parte LSP-uri de bază, cum ar fi altitudinea, panta, aspectul sau curbura. Pe baza acestor caracteristici suprafața continuă a terenului este împărțite în părți discrete denumite elemente de suprafață a terenului. Principala lor caracteristică este omogenitatea geometrică (Minár și Evans, 2008).

Dikau (1989), de exemplu, a propus nouă elemente de formare a terenului, definite prin profilul și curbura planului lor, pentru a reprezenta blocuri de construcție a suprafeței de teren (Fig. 4). MacMillan et al. (2000) și Schmidt și Hewitt (2004) au folosit atât planul, cât și profilul poziția de curbură, pantă și pantă pentru segmentarea automatizată a formelor de teren în elemente de formă de teren bazate pe DEM, euristic reguli și logică fuzzy. Ele extind modelul lui Dikau (1989) cu nouă elemente cu clase pentru creste, vârfuri, văi, pintenuri, terase, goluri, câmpii, șa și poziția pantei. Shary și colab. (2005) au prezentat 12 tipuri de pantă, în timp ce Minár și Evans (2008) au prezentat chiar distinge între 25 de forme de teren elementare. Funcția principală a acestor forme elementare constă în relația lor cu procesul mai degrabă decât delimitarea unor forme de teren reale discrete. Modificările de curbură evocă o accelerare sau o decelerare a gravitației fluxul și rezultă dispersia sau concentrarea materiei transportate (Minár și Evans, 2008). Cu toate acestea, suprafața generală a terenului clasificarea poate fi folosită ca punct de plecare pentru abordări specifice de clasificare (Drağut, și Blaschke, 2006).

Clasificările speciale

Clasificarea specifică a formelor de teren vizează ambițios combinarea pixelilor unici sau a elementelor de formă terestră cu formele de teren percepute de experți și, prin urmare, este ceva mai subiectiv și adaugă multă complexitate suplimentară (Hengl și Reuter, 2009). Încearcă să clasifica scene întregi sau cel puțin tipuri specifice de formă de land au avut doar parțial succes. Acest lucru se datorează în mare parte excepționalului complexitate imanentă în peisajele Pământului. Suprafața peisajelor din lumea reală sau chiar părți mici ale acestuia nu poate fi niciodată exact asortate cu reprezentări matematice ale formelor de teren. În consecință, trebuie să existe variații ale aspectului formelor de teren luate în considerare și trebuie aplicate măsuri pentru similaritate. Dincolo de aceste probleme tehnice, diferite procese geomorfologice poate produce forme de teren similare, un mecanism care este cunoscut sub numele de „egalitate” și împiedică considerabil interpretarea forma peisajului.

Analiza datelor de teledetecție, inclusiv DEM-uri, precum și imagini aeriene și prin satelit, se realizează în principal într-un pixel manieră. Fiecare pixel este tratat separat și sunt disponibile doar câteva atribute pentru caracterizare și clasificare. Adoptarea tehnici de segmentare a imaginii și clasificare a obiectelor de la informatică la aplicații GIS (Blaschke și Strobl, 2001) a permis depășirea acestor limitări care pot fi utile în special pentru interpretarea automatizată a formelor de teren complexe.

Segmentele de imagine sunt regiuni care sunt combinate automat de la pixeli care se referă la unul sau mai multe criterii de omogenitate într-unul sau mai multe dimensiuni ale spațiului caracteristicilor (de exemplu, reflectanța spectrală sau altitudinea). Obiectele rezultate pot fi descrise și clasificate folosind suplimentar informații spectrale (de exemplu, medii, medii, variații), geometrice (de exemplu, circularitate), texturale și ierarhice (Blaschke, 2010). Schneevoigt și colab. (2008) au combinat imagini prin satelit ASTER cu date DEM pentru a detecta 20 de tipuri diferite de forme alpine. Ei raportează o precizie generală de 92%, cu rezultate bune pentru o serie de forme, dar probleme de detectare pentru depozitele fluviale, glaciare și martori de eroziune. Printre cele mai de succes abordări pentru o clasificare fără gol a unui peisaj în Forme de teren individuale, Anders și colab. (2011) a folosit o abordare bazată pe obiecte pentru extragerea carstului, glaciarelor, fluvialului și denudării formele de teren de la un DTM de înaltă rezoluție și au atins o precizie generală de aproximativ 70%. Concentrându-se doar pe anumite forme de teren, d'Oleire-Oltmanns și colab. (2013) și Eisank și colab. (2014) a ajuns la precizii în jurul valorii de 60% la detecția automată. Analiza imaginilor bazate pe obiecte este o tehnică promițătoare pentru clasificarea formelor de relief, dar în mod clar cercetări suplimentare sunt necesare pentru a gestiona complexitatea excepțională a formelor din lumea reală în rutinele automate de cartografiere a formelor de relief.

Concluzii

Cercetările geomorfologice moderne cantitative pot fi considerate în mod inextricabil legate de analiza GIS. Disponibilitatea datelor de înaltă rezoluție și la nivel global ale altitudinii suprafeței terenului au contribuit semnificativ la progresele fundamentale recente ale disciplinei și au deschis noi direcții de cercetare. Aplicațiile GIS în geomorfologie se extind de la abordări de vizualizare pură, clasificarea formelor de relief, a suprafeței terenului și analize hidrologice (de obicei derivate doar pe baza DEM-urilor), modelarea proceselor geomorfologice și a eroziunii, detecția modificărilor topografice, zonarea hazardului și riscului sau modelarea susceptibilității. Aici, analiza statistică și interpolarea spațială a datelor de tip suprafață, precum și vizualizarea grafică și crearea hărților reprezintă caracteristici cheie ale aplicării GIS în geomorfologie. Numeroase variabile și indici topografici și geomorfologici au fost dezvoltați pentru a studia formele de relief și procesele geomorfologice folosind tehnici GIS.

Referințe bibliografice

- Abermann J, Lambrecht A, Fischer A, Kuhn M (2009) Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969–1997–2006). *The Cryosphere* 3: 205.
- Ahnert F (1970) Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large, mid-latitude drainage basins. *American Journal of Science* 268: 243–263.

- Allen TR (1998) Topographic context of glaciers and perennial snowfields, Glacier National Park, Montana. *Geomorphology* 21: 207–216.
- Anders NS, Seijmonsbergen AC, Bouten W (2011) Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment* 115: 2976–2985.
- Bagnold RA (1960) Sediment discharge and stream power—a preliminary announcement. Circular Reston, Virginia: US Geological Survey 421.
- Baltsavias EP, Favey E, Bauder A, Bosch H, Pateraki M (2001) Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. *The Photogrammetric Record* 17: 243–273.
- Benn DI, Lehmkuhl F (2000) Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* 65–66: 15–29.
- Bennett GL, Molnar P, Eisenbeiss H, Mcardell BW (2012) Erosional power in the Swiss Alps: characterization of slope failure in the Illgraben. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 1627–1640.
- Bennett GL, Molnar P, Mcardell BW, Schlunegger F, Burlando P (2013) Patterns and controls of sediment production, transfer and yield in the Illgraben. *Geomorphology* 188: 68–82.
- Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un mode`le a` base physique de zone d`appel variable de l`hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin* 24: 43–69.
- Bishop MP (2013) Remote sensing and GIScience in geomorphology: introduction and overview A2. In: Shroder JF (ed.) *Treatise on geomorphology*. San Diego: Academic Press.
- Blaschke T (2010) Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65: 2–16.
- Blaschke T, Strobl J (2001) What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *Image Rochester NY* 6: 12–17.
- Böhner J, AntoniĆ O (2009) Land-surface parameters specific to topo-climatology. In: Tomislav H and Hannes IR (eds.) *Developments in soil science*. Amsterdam: Elsevier. Chapter 8.
- Borselli L, Cassi P, Torri D (2008) Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena* 75: 268–277.
- Bremer M, Sass O (2012) Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology* 138: 49–60.
- Brocklehurst SH, Whipple KX (2004) Hypsometry of glaciated landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 907–926.

- Burbank DW, Anderson RS (2011) Tectonic geomorphology. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd.
- Campbell D, Church M (2003) Reconnaissance sediment budgets for Lynn Valley, British Columbia: Holocene and contemporary time scales. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40: 701–713.
- Carrara A (1983) Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 15: 403–426.
- Carrara A, Guzzetti F (1995) Geographical information systems in assessing natural hazards. Dordrecht: Springer.
- Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, Marchi L (2013) Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188: 31–41.
- Chairat S and Delleur JW (1993) Effects of the topographic index distribution on predicted runoff using grass. *Water Resources Bulletin* 29: 1029–1034.
- Champagnac JD, Molnar P, Anderson RS, Sue C, Delacou B (2007) Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology* 35: 195–198.
- Chen A, Darbon J, and Morel J-M (2014) Landscape evolution models: a review of their fundamental equations. *Geomorphology* 219: 68–86.
- Costa-Cabral MC, Burges SJ (1994) Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research* 30: 1681–1692.
- Coulthard TJ (2001) Landscape evolution models: a software review. *Hydrological Processes* 15: 165–173.
- Curry AM (1999) Paraglacial modification of slope form. *Earth Surface Processes and Landforms* 24: 1213–1228.
- Dadson SJ, Church M (2005) Postglacial topographic evolution of glaciated valleys: a stochastic landscape evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 1387–1403.
- Deroo APJ, Hazelhoff L, Burrough PA (1989) Soil-erosion modeling using answers and geographical information-systems. *Earth Surface Processes and Landforms* 14: 517–532.
- Dikau R (1989) The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper JF (ed.) *Three dimensional applications in geographical information systems*, London: Taylor & Francis.
- Dikau R (1996) Geomorphologische Reliefklassifikation und -analyse. *Heidelberger Geographische Arbeiten* 104: 15–36.

- Dikau R, Jäger S (1995) Landslide hazard modelling in New Mexico and Germany. In: Mcgregor D and Thompson D (eds.) *Geomorphology and land management in a changing environment*, Chichester: John Wiley.
- Dikau, R., Brabb, E. E. Mark, R. M. (1991). *Landform classification of New Mexico by computer*. Open-File Report.—ed.
- D'Oleire-Oltmanns S, Eisank C, Dragut L, Blaschke T (2013) An object-based workflow to extract landforms at multiple scales from two distinct data types. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 10: 947–951.
- Drăguț L, Blaschke T (2006) Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81: 330–344.
- Eash DA (1994) A geographic information-system procedure to quantify drainage-basin characteristics. *Water Resources Bulletin* 30: 1–8.
- Egholm DL, Pedersen VK, Knudsen MF, Larsen NK (2012) Coupling the flow of ice, water, and sediment in a glacial landscape evolution model. *Geomorphology* 141–142: 47–66.
- Eisank C, Smith M, Hillier J (2014) Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models. *Geomorphology* 214: 452–464.
- Erskine RH, Green TR, Ramirez JA, Macdonald LH (2006) Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research* 42: 1–9.
- Evans IS (1972) General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley RJ (ed.) *Spatial analysis in geomorphology*. London: Methuen.
- Evans IS (2012) Geomorphometry and landform mapping: what is a landform? *Geomorphology* 137: 94–106.
- Fairfield J, Leymarie P (1991) Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research* 27: 709–717.
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D (2007) The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* 45:RG2004.
- Fischer L, Eisenbeiss H, Kääb A, Huggel C, Haerberli W (2011) Monitoring topographic changes in a periglacial high-mountain face using high-resolution DTMs, Monte Rosa East Face, Italian Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 22: 140–152.
- Fischer A, Seiser B, Stocker Waldhuber M, Mitterer C, Abermann J (2015) Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based highresolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere* 9: 753–766.
- Flint JJ (1974) Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research* 10: 969–973.

- Freeman TG (1991) Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences* 17: 413–422.
- Frey H, Machguth H, Huss M, Huggel C, Bajracharya S, Bolch T, Kulkarni A, Linsbauer A, Salzmann N, Stoffel M (2013) Ice volume estimates for the Himalaya–Karakoram region: evaluating different methods. *The Cryosphere Discuss* 7: 4813–4854.
- Gay A, Cerdan O, Mardhel V, Desmet M (2016) Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments* 16: 280–293.
- Gesch D, Oimoen M, Zhang Z, Meyer D, Danielson J (2012) Validation of the Aster Global Digital Elevation Model Version 2 over the conterminous United States. In: *Proceeding of the XXII ISPRS Congress*, pp. 281–286, Melbourne: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Gómez H, Kavzoglu T (2005) Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78: 11–27.
- Götz J, Otto JC, Schrott L (2013) Postglacial sediment storage and rockwall retreat in a semi-closed inner-alpine sedimentary basin (Gradenmoos, Hohe Tauern, Austria). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 36: 63–80.
- Goudie AS (ed.) (1990) *Geomorphological techniques*. London: Unwin Hyman.
- Gregory KJ, Lewin J (2014) *The basics of geomorphology: key concepts*. London: Sage.
- Grieve SWD, Mudd SM, Hurst MD, Milodowski DT (2016) A nondimensional framework for exploring the relief structure of landscapes. *Earth Surface Dynamics* 4: 309–325.
- Grohmann CH, Smith MJ, Riccomini C (2011) Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 49: 1200–1213.
- Gross G, Kerschner H, Patzelt G (1977) Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 12: 223–251.
- Gruber U, Bartelt P (2007) Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software* 22: 1472–1481.
- Gruber FE, Mergili M (2013) Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13: 2779–2796.
- Gruber S, Peckham S (2009) Land-surface parameters and objects in hydrology. In: Hengl T and Reuter HI (eds.) Amsterdam: Elsevier. Chapter 7.
- Gustavsson M, Kolstrup E, Seijmonsbergen AC (2006) A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology* 77: 90–111.

- Gustavsson M, Seijmonsbergen AC, Kolstrup E (2008) Structure and contents of a new geomorphological GIS database linked to a geomorphological map—with an example from Liden, central Sweden. *Geomorphology* 95: 335–349.
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181–216.
- Hack JT (1957) Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. *Shorter Contributions to General Geology*: 45–97.
- Hack JT (1973) Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey* 1: 421–429.
- Haeberli W, Hülzle M (1995) Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology* 21: 206–212.
- Hara K, Zhao Y, Harada I, Tomita M, Park J, Jung E, Kamagata N, Hirabuki Y (2015) Multi-scale monitoring of landscape change after the 2011 tsunami. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—ISPRS Archives XL-7/W3*: 805–809.
- Harbor J, Wheeler DA (1992) On the mathematical description of glaciated valley cross section. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 477–485.
- Harvey AM (2001) Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. *Catena* 42: 225–250.
- Heckmann T, Schwanghart W (2013) Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment—exploring sediment cascades using graph theory. *Geomorphology* 182: 89–103.
- Hengl T, Reuter HI (eds.) (2009) *Geomorphometry—concepts, software, applications*, Oxford: Elsevier.
- Hickey R, Smith A, and Jankowski P (1994) Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO grid. *Computers, Environment and Urban Systems* 18: 365–380.
- Hinderer M (2001) Late Quaternary denudation of the Alps, valley and lake fillings and modern river loads. *Geodinamica Acta* 14: 231–263.
- Funk M, Hoelzle M (1992) A model of potential direct solar radiation for investigating occurrences of mountain permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes* 3(2): 139–142.
- Hoffmann T, Schrott L (2002) Modelling sediment thickness and rockwall retreat in an Alpine valley using 2D-seismic refraction (Reintal, Bavarian Alps). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band* 127: 153–173.

- Horton RE (1932) Drainage–basin characteristics. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 13: 350–361.
- Horton RE (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* 56: 275–370.
- Huabin W, Gangjun L, Weiya X, Gonghui W (2005) GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography* 29: 548–567.
- Humlum O (1998) The climatic significance of rock glaciers. *Permafrost and Periglacial Processes* 9: 375–395.
- Huss M, Farinotti D (2012) Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117: F04010.
- Jaboyedoff M, Derron MH (2005a) A new method to estimate the infilling of alluvial sediment of glacial valleys using a sloping local base level. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 28: 37–46.
- Jaboyedoff M, Derron MH (2005b) A new method to estimate the infilling of alluvial sediment of glacial valleys using a sloping local base level. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 28: 37–46.
- Jäger S (1997) Fallstudien zur Bewertung von Massenbewegungen als geomorphologische Naturgefahr. Heidelberg: Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität.
- James LA (1996) Polynomial and power functions for glacial valley cross-section morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 413–432.
- Jenson SK, Domingue JO (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54: 1593–1600.
- Kääb A, Winsvold S, Altena B, Nuth C, Nagler T, Wuite J (2016) Glacier remote sensing using sentinel-2. Part I: radiometric and geometric performance, and application to ice velocity. *Remote Sensing* 8: 598.
- Keller F (1992) Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 133–138.
- Keutterling A, Thomas A (2006) Monitoring glacier elevation and volume changes with digital photogrammetry and GIS at Gepatschferner glacier, Austria. *International Journal of Remote Sensing* 27: 4371–4380.
- Kirkby MJ (1987) Modelling some influences of soil erosion, landslides and valley gradient on drainage density and hollow development. *Catena Supplement* 10: 1–14.

- Koethe R, Lehmeier F (1993) SARA—Ein Programmsystem zur Automatischen Relief-Analyse. *Zeitschrift für Angewandte Geographie* 4: 11–21.
- Kruse S (2013) 3.5 Near-surface geophysics in geomorphology A2. In: Shroder JF (ed.) *Treatise on geomorphology*, San Diego: Academic Press.
- Kugler H (1975). *Das Georelief und seine kartographische Modellierung*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle.
- Lan H, Derek Martin C, Lim CH (2007) RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences* 33: 262–279.
- Lane SN, James TD, Crowell MD (2000) Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record* 16: 793–821.
- Lane SN, Bakker M, Gabbud C, Micheletti N, Saugy JN (2017) Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession. *Geomorphology* 277: 210–227.
- Lautensach H (1959) Carl Troll—Ein Forscherleben. *Erdkunde* 13: 245–258.
- Legleiter CJ, Fonstad MA (2012) An introduction to the physical basis for deriving river information by optical remote sensing. *Fluvial remote sensing for science and management*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lehner B, Verdin K, Jarvis A (2008) New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 89: 93–94.
- Leopold LB, Wolman MG, Miller JP (1964) *Fluvial processes in geomorphology*. San Francisco: W.H. Freeman and Co.
- Li X, Damen MCJ (2010) Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems* 82 (Suppl.): S54–S61.
- Liu BY, Nearing MA, Shi PJ, Jia ZW (2000) Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1759–1763.
- Macmillan RA, Pettapiece WW, Nolan SC, Goddard TW (2000) A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 113: 81–109.
- Marthews TR, Dadson SJ, Lehner B, Abele S, Gedney N (2015) High-resolution global topographic index values for use in large-scale hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 91–104.
- Messenzehl K, Hoffmann T, Dikau R (2014) Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschans, Swiss National Park—linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. *Geomorphology* 221: 215–229.

- Mey J, Scherler D, Wickert AD, Egholm DL, Tesauro M, Schildgen TF, Strecker MR (2016) Glacial isostatic uplift of the European Alps. *Nature Communications* 7: 13382.
- Micheletti N, Lambiel C, Lane SN (2015) Investigating decadal-scale geomorphic dynamics in an alpine mountain setting. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 120: 2155–2175.
- Minár J, Evans IS (2008) Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology* 95: 236–259.
- Minar J, Mentlik P, Jedlicka K, Barka I (2005) Geomorphological information system: idea and options for practical implementation. *Geograficky Casopis* 57: 247–264.
- Montgomery DR, Foufoula-Georgiou E (1993) Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research* 29: 3925–3934.
- Moore ID, Burch GJ (1986) Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss Equation1. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1294–1298.
- Moore ID, Grayson RB, Ladson AR (1991) Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5: 3–30.
- Napieralski J, Harbor J, Li Y (2007) Glacial geomorphology and geographic information systems. *Earth-Science Reviews* 85: 1–22.
- Oguchi T, (2006) GIS applications in Geomorphology - a review, Regional Conference on Geomorphology, Tropical and Subtropical Geomorphology: processes, methods and techniques, Brazil, Goiania-GO, September 6-10, 2006.
- Oguchi T, Wasklewicz TA (2011) Geographic information systems in geomorphology. In: Gregory KJ and Goudie AS (eds.) *The SAGE handbook of geomorphology*, London: SAGE.
- Olaya V (2009) Basic land-surface parameters. In: Tomislav H and Hannes IR (eds.) *Developments in soil science*. Amsterdam: Elsevier. Chapter 6.
- Olyphant GA (1977) Topoclimate and the Depth of Cirque Erosion. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography* 59: 209–213.
- Otto J-C, Dikau R (2004) Geomorphologic system analysis of a high mountain valley in the Swiss Alps. *Zeitschrift für Geomorphologie, NF* 48: 323–341.
- Otto JC, Smith M (2013) Section 2.6 Geomorphological mapping. In: Clarke LE (ed.) *Geomorphological techniques* (online edition). London: British Society for Geomorphology.
- Otto J-C, Schrott L, Jaboyedoff M, Dikau R (2009) Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmantal, Switzerland). *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1726–1742.

- Otto JC, Gustavsson M, Geilhausen M (2011) Cartography: design, symbolisation and visualisation of geomorphological maps. In: Smith MJ, Paron P, and Griffiths J (eds.) Geomorphological mapping: methods and applications, London: Elsevier.
- Otto J-C, Keuschnig M, Götz J, Marbach M, Schrott L (2012) Detection of mountain permafrost by combining high resolution surface and subsurface information—an example from the Glatzbach catchment, Austrian Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94: 43–57.
- Otto, Jan-Christoph & Prasicek, Günther & Blöthe, Jan & Schrott, Lothar. (2017). GIS Applications in Geomorphology. In: Shroder JF (ed.) *Treatise on geomorphology*, San Diego: Academic Press Elsevier.
- Paul F, Bolch T, Kääb A, Nagler T, Nuth C, Scharrer K, Shepherd A, Strozzi T, Ticconi F, Bhambri R, Berthier E, Bevan S, Gourmelen N, Heid T, Jeong S, Kunz M, Lauknes TR, Luckman A, Merryman Boncori JP, Moholdt G, Muir A, Neelmeijer J, Rankl M, Vanlooy J, Van Niel T (2015) The glaciers climate change initiative: methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sensing of Environment* 162: 408–426.
- Penck A (1894) *Morphologie der Erdoberfläche*, 2nd edn Stuttgart: Engelhorn.
- Pike R, Dikau R (1995) Advances in Geomorphometry. Proceedings of the Walter F. Wood Memorial Symposium. *Zeitschrift für Geomorphologie/Supplement*, vol. 101, 238 p.
- Pike RJ, Wilson SE (1971) Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin* 82: 1079–1084.
- Porter SC (1975) Equilibrium-line altitudes of late Quaternary glaciers in the Southern Alps, New Zealand. *Quaternary Research* 5: 27–47.
- Prasicek G, Otto J-C, Montgomery DR, Schrott L (2014) Multi-scale curvature for automated identification of glaciated mountain landscapes. *Geomorphology* 209: 53–65.
- Prasicek G, Larsen IJ, Montgomery DR (2015) Tectonic control on the persistence of glacially sculpted topography. *Nature Communications* 6:8028.
- Rabatel A, Deline P, Jaillet S, Ravanel L (2008) Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: a case study in the Mont Blanc area. *Geophysical Research Letters* 35(10): L10502.
- Racoviteanu A, Williams M, Barry R (2008) Optical remote sensing of glacier characteristics: a review with focus on the Himalaya. *Sensors* 8: 3355.
- Riseborough D, Shiklomanov N, Etzelmüller B, Gruber S, Marchenko S (2008) Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes* 19: 137–156.
- Rosser NJ, Petley DN, Lim M, Dunning SA, Allison RJ (2005) Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 38: 363–375.

- Rowland JC, Shelef E, Pope PA, Muss J, Gangodagamage C, Brumby SP, Wilson CJ (2016) A morphology independent methodology for quantifying planview river change and characteristics from remotely sensed imagery. *Remote Sensing of Environment* 184: 212–228.
- Salcher BC, Kober F, Kissling E, Willett SD (2014) Glacial impact on short-wavelength topography and long-lasting effects on the denudation of a deglaciated mountain range. *Global and Planetary Change* 115: 59–70.
- Sass O (2007) Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics* 3: 254–269.
- Sattler K, Anderson B, Mackintosh A, Norton K, DE Ro'iste M (2016) Estimating permafrost distribution in the maritime Southern Alps, New Zealand, based on climatic conditions at rock glacier sites. *Frontiers in Earth Science* 4.
- Scaioni M, Longoni L, Melillo V, Papini M (2014) Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing* 6: 9600.
- Schmidt J, Hewitt A (2004) Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma* 121: 243–256.
- Schneevoigt NJ, Van der Linden S, Thamm H-P, Schrott L (2008) Detecting Alpine landforms from remotely sensed imagery. A pilot study in the Bavarian Alps. *Geomorphology* 93: 104–119.
- Schoeneich P (1993) Comparaison des systémes de le'gendes francais, allemand et suisse principes de la le'gende IGUL. *Travaux et Recherches* 9: 15–24.
- Schrott L, Adams T (2002) Quantifying sediment storage and Holocene denudation in an Alpine basin, Dolomites, Italy. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 128(Suppl. Bd): 129–145.
- Schrott L, Sass O (2008) Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology* 93: 55–73.
- Schrott L, Hufschmidt G, Hankammer M, Hoffmann T, Dikau R (2003a) Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology* 55: 45–63.
- Schrott L, Hufschmidt G, Hankammer M, Hofmann T, Dikau R (2003b) Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology* 55: 45–63.
- Schrott L, Otto JC, Keller F (2013) Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. *Austrian Journal of Earth Science* 105: 169–183.
- Seibert J, Mcglynn B (2007) A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research* 43: 1–8.

- Shary PA, Sharaya LS, Mitusov AV (2005) The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 28: 81–101.
- Shroder JF, Scheppy RA, Bishop MP (1999) Denudation of small alpine basins, Nanga Parbat Himalaya, Pakistan. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 31: 121–127.
- Small EE, Anderson RS (1998) Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges, western United States. *Geology* 26: 123–126.
- Smith MJ (2011) Digital mapping: visualisation, interpretation and quantification of landforms. In: Smith MJ, Paron P, and Griffiths J (eds.) *Geomorphological mapping: methods and applications*. London: Elsevier.
- Smith MW (2014) Roughness in the Earth Sciences. *Earth-Science Reviews* 136: 202–225.
- Smith MJ, Wise SM (2007) Problems of bias in mapping linear landforms from satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9: 65–78.
- Smith MJ, Rose J, Booth S (2006) Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: an evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality. *Geomorphology* 76: 148–165.
- Smith MJ, Hilier J, Otto JC, Geilhausen M (2013) Geovisualisation. In: Shroder JF (ed.) *Treatise on geomorphology*, San Diego: Academic Press Elsevier.
- Snavely N, Seitz SM, Szeliski R (2008) Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80: 189–210.
- Sternai P, Herman F, Fox MR, Castellort S (2011) Hypsometric analysis to identify spatially variable glacial erosion. *Journal of Geophysical Research* 116: F03001.
- Strahler AN (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63: 1117–1142.
- Strahler AN (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 38: 913–920.
- Stumpf A, Malet JP, Delacourt C (2017) Correlation of satellite image time-series for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sensing of Environment* 189: 40–55.
- Svensson H (1959) Is the cross-section of a glacial valley a parabola? *Journal of Glaciology* 3: 362–363.
- Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I (1991) On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes* 5: 81–100.
- Theler D, Reynard E, Bardou E (2008) Assessing sediment dynamics from geomorphological maps: Bruchi torrential system, Swiss Alps. *Journal of Maps* 4: 277–289.

- Tomlinson RF (1967) An introduction to the geo-information system of the Canada Land Inventory. ARDA. Department of Forestry and Rural Development, Ottawa, Canada.
- Tucker GE, Bras RL (1998) Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology. *Water Resources Research* 34: 2751–2764.
- Tucker GE, Hancock GR (2010) Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 35: 28–50.
- Tucker GE, Whipple KX (2002) Topographic outcomes predicted by stream erosion models: sensitivity analysis and intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107. ETG 1-1–ETG 1-16.
- Tunncliffe J, Church M, Clague JJ, Feathers JK (2012) Postglacial sediment budget of Chilliwack Valley, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 1243–1262.
- Van Westen CJ, Castellanos E, Kuriakose SL (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology* 102: 112–131.
- Vanwesten CJ, Terlien MTJ (1996) An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 853–868.
- Warrick JA, Ritchie AC, Adelman G, Adelman K, Limber PW (2017) New techniques to measure Cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry. *Journal of Coastal Research* 33: 39–55.
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM (2012) ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300–314.
- Whipple KX (2004) Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32: 151–185.
- Whipple KX, Tucker GE (1999) Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104: 17661–17674.
- Whipple KX, Dibiase RA, Crosby BT (2013) Bedrock rivers. In: Shroder JF and Wohl E (eds.) *Treatise on geomorphology*. San Diego: Academic Press.
- Wichmann V, Becht M (2006) Rockfall modelling: methods and model application in an Alpine basin. Göttingen: Goltze.
- Wilford DJ, Sakals ME, Innes JL, Sidle RC, Bergerud WA (2004) Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides* 1: 61–66.
- Wilson JP, Bishop MP (2013) 3.7 Geomorphometry A2. In: Shroder JF (ed.) *Treatise on geomorphology*, San Diego: Academic Press.

- Wilson JP, Gallant JC (eds.) (2000) Terrain analysis: principles and applications, New York: Wiley.
- Wulder MA, Coops NC (2014) Make Earth observations open access. Nature 513: 30–31.
- Zink M, Fiedler H, Hajnsek I, Krieger G, Moreira A, Werner M (2006) The TanDEM-X mission concept. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing 1938–1941.
- Zink M, Bartusch M, Miller D (2011) TanDEM-X mission status. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2011: 2290–2293.