

## IT e metodologie di analisi del territorio

Andrea Favretto<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Università di Trieste, via Tigor 22 34124 Trieste, 040 5583641, afavretto@units.it

### Introduzione

Lo studio del territorio, tradizionalmente appannaggio della Geografia, si è arricchito di nuovi e stimolanti strumenti che spesso influenzano i risultati delle analisi geografiche. Ciò si deve alla maggiore quantità di dati cartografici e telerilevati a disposizione dei ricercatori ma anche alla continua evoluzione delle tecniche di gestione ed elaborazione del dato territoriale (con particolare riferimento a Telerilevamento e Sistemi Informativi Geografici).

Parallelamente, le nuove tecnologie legate al Web ed alla telefonia mobile e la loro continua evoluzione hanno da tempo influito su modalità e frequenza con la quale viene creata l'informazione geografica da un pubblico sempre più numeroso e differenziato (per competenze, motivazioni e finalità).

Come è ampiamente noto, l'evoluzione partecipativa del Web alla sua versione 2.0 ha allargato il bacino di utenza attiva, la cui produzione di informazione in rete è cresciuta in misura esponenziale negli ultimi anni (ben 7.930.000.000 visitatori mensili stimati per i 15 più popolari siti Web 2.0 – aggiornato a settembre 2017 – cfr.: <http://www.ebizmba.com/articles/most-popular-websites> ).

Anche se solo una parte di questi numeri va ricondotta all'analisi geografica, l'importanza del Web in tale settore è ormai un fatto consolidato, tanto che si parla di crowdsourcing come un metodo per la produzione di conoscenza geografica, per un mondo più efficiente, equo e sostenibile (Sui et al., 2013).

Gli agenti di tale metodo sono i cosiddetti VGI (Volunteered Geographic Information), così definiti da Goodchild nel suo celebre articolo del 2007.

Fra le tecniche di analisi geografica non basate su rilevamenti diretti del territorio, il Telerilevamento può essere considerato una tecnologia ormai ampiamente consolidata per il controllo ambientale. Esso ha giocato un ruolo importante (e continuerà a farlo nel futuro), nel controllo delle risorse e nella valutazione dei rischi connessi ai cambiamenti globali in conseguenza delle attività umane (Lillesand et al., 1994). I geografi hanno anch'essi imparato ad usare tale metodologia, soprattutto per il controllo degli insediamenti urbani, lo sviluppo delle città e l'uso del suolo (si veda, fra gli altri, Favretto, 2006).

Per quanto riguarda lo studio di aree specifiche ad uso civile, possiamo far risalire agli anni '70 del secolo scorso la costruzione dei primi sistemi per l'acquisizione di dati ambientali (i cosiddetti Earth Observation satellites – EO) attraverso satelliti artificiali senza equipaggio<sup>1</sup>. Risale al 1972 infatti il lancio in

<sup>1</sup> Per chi volesse avere una panoramica delle varie tipologie di sensori e satelliti, nonché del trend evolutivo per l'osservazione della terra ad usi civili, si veda: Toth et al., 2016; Belward et al., 2015.

orbita di ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), successivamente rinominato Landsat -1. Dal suo inizio il programma Landsat ha consentito l'acquisizione di scene a quasi tutte le latitudini (a parte quelle polari più elevate). Degli otto lanci, dal 1972 ad oggi, solo quello di Landsat 6 (ottobre 1993), è fallito (il satellite non è riuscito a raggiungere l'orbita prevista). Il programma ha permesso negli anni di allestire la più grande biblioteca di immagini multispettrali<sup>2</sup> a media risoluzione spaziale<sup>3</sup> del pianeta Terra (vedi: Loveland et al., 2012). I numeri dell'archivio Landsat sono infatti assolutamente notevoli: si tratta di ben 5,5 milioni di immagini al Gennaio 2015 (vedi: Wulder et alii, 2015). Tutte le immagini sono attualmente gestite da NASA, l'ente aerospaziale americano, in collaborazione con USGS (U.S. Geological Survey), l'ente cartografico americano. L'intero archivio è stato reso gratuitamente disponibile in rete dal Dicembre del 2008 (Wulder et alii, 2012). Più recentemente e sempre per quanto riguarda la media risoluzione spaziale: da Aprile 2016 è liberamente scaricabile l'intero archivio delle immagini multispettrali di ASTER mentre le immagini dell'europeo Sentinel 2, lanciato nel Giugno 2015 da ESA (European Space Agency), sono disponibili gratuitamente via Internet dalla seconda metà dello stesso anno.

Parallelamente alla liberalizzazione delle scene satellitari, il progresso delle applicazioni informatiche legato alla loro distribuzione in rete e lo sviluppo di software liberi dedicati, integrati ai sistemi informativi geografici (GIS)<sup>4</sup>, hanno ulteriormente rivoluzionato gli strumenti a disposizione del geografo per le analisi del territorio.

Sono brevemente ricordati i nuovi strumenti informatici che permettono la distribuzione in rete delle scene da satellite nonché le tendenze evolutive dei software per la loro elaborazione (dalle prime integrazioni con i GIS commerciali, per le sole strutture raster, agli attuali GIS open source modulari - vettoriali e raster). Viene poi sottolineato come la liberalizzazione dei dati telerilevati e lo sviluppo degli strumenti informatici in grado di elaborarli siano

---

<sup>2</sup> La risoluzione spettrale si riferisce al numero ed all'ampiezza degli intervalli dello spettro elettromagnetico alle quali il sensore del satellite è sensibile (Jensen, 2000). Il numero degli intervalli corrisponde alle bande rese disponibili in layer diversi nell'immagine. I sensori cosiddetti multispettrali sono in grado di registrare le immagini in numerose bande spettrali con diverse lunghezze d'onda, che formano i vari layer di cui è composta la scena (vedi, per approfondire: Brivio et alii, 2006).

<sup>3</sup> Si possono trovare innumerevoli classificazioni della risoluzione spaziale dei sensori in funzione della dimensione a terra della cella relativa alla griglia che compone l'immagine (i pixel sullo schermo di un computer). Fra le tante, si riporta quella di Wang et al. (2013), che considera alta risoluzione spaziale quella entro i 4 metri, propria dei satelliti commerciali (ad es.: Ikonos e Quickbird); media risoluzione quella entro i 30 metri (ad es.: Landsat - sensori TM ed ETM+); bassa risoluzione quella superiore ai 250 metri (ad es.: sensori MODIS e AVHRR).

<sup>4</sup> Williamson (1997) considera l'integrazione dei GIS con il Telerilevamento uno dei più importanti volani per la diffusione delle scene satellitari. Temporalmente ciò è avvenuto verso la fine del decennio '80 del secolo scorso, insieme alla diffusione dei personal computer, più economici dei main frame e abbastanza potenti da elaborare le immagini satellitari.

stati in grado di determinare un'evoluzione delle metodologie applicate alle immagini stesse. Alcune riflessioni conclusive chiudono il lavoro.

## Gli strumenti software

Un ruolo fondamentale nella diffusione delle immagini satellitari e nella promozione del loro utilizzo per lo studio del territorio lo hanno le applicazioni informatiche che ne permettono la distribuzione e l'elaborazione.

Facendo riferimento alla distribuzione, di grande importanza è stata la possibilità di usufruire in rete di applicazioni accessibili attraverso un comune browser per la scelta delle immagini su basi geografiche (in modalità grafica) e la verifica delle loro caratteristiche attraverso la consultazione di alcuni metadati (ad es.: percentuale di copertura nuvolosa, data della ripresa, ecc.).

Molto utile è sempre stata l'esatta conoscenza di dove si posizionasse il quadrato di territorio ripreso dall'immagine (per essere sicuri che l'area di studio fosse totalmente ricompresa nella scena). Visto poi che le scene satellitari sono raramente libere dalle nubi, altrettanto utile è il poter disporre di un'anteprima dell'immagine, per controllare che, ad esempio, il 10% di copertura nuvolosa della scena non capiti proprio sopra l'area di studio.

Lo sviluppo dei programmi implementabili nel linguaggio html (ad es.: JavaScript), così da rendere una pagina Web in grado di eseguire del codice e di richiamare altri programmi disponibili sulla nuvola/Internet (sono le cosiddette API – Application Programming Interface<sup>5</sup>), ha reso disponibili tutte le opzioni ricordate (e anche molte altre), attraverso applicazioni “user friendly”, accessibili da un comune browser. L'utente può infatti scegliere le immagini, metterle nel “carrello” e scaricarle sul proprio computer unicamente previo un login presso il sito distributore. Le basi cartografiche sulle quali vengono posizionati i riquadri indicanti i confini e/o le anteprime delle scene che si stanno scegliendo sono costituite anch'esse da immagini telerilevate ad alta definizione, fornite attraverso la nuvola ad esempio da Google Maps, Bing Maps o Esri<sup>6</sup>. Queste moderne applicazioni hanno reso molto semplice, veloce e, per certi versi, divertente (dipende dai gusti), procurarsi un'immagine satellitare rispetto alle macchinose procedure di appena 15 anni addietro, quando era necessario dotarsi di quadri di coordinate, precisi metadati relativi ai sentieri di acquisizione di questo o quel satellite (path e row), tanta buona volontà e pazienza (e alla fine era spesso necessaria una lunga telefonata all'operatore di turno).

Facendo invece riferimento all'elaborazione delle immagini, successivamente alla ricordata integrazione fra GIS e Telerilevamento, la situazione, nella seconda metà degli anni '90, era la seguente: erano disponibili due tipologie di software GIS, quelli specializzati nel trattamento delle strutture raster e quelli dedicati alle strutture vettoriali. Gli applicativi erano prevalentemente limitati

<sup>5</sup> Si veda, per approfondire tali strumenti, Favretto, 2016.

<sup>6</sup> Si veda, fra i tanti, il nuovo prototipo: LandastLook Viewer di USGS (US Geological Survey, l'ente cartografico americano distributore delle immagini Landsat), che permette la visualizzazione online di tutto l'archivio Landsat (su base cartografica di ESRI), nonché l'accesso ai dati: [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Search\\_and\\_Download.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Search_and_Download.php).

alla sfera commerciale (i GIS open source del periodo, sia raster che vector, non erano semplici da utilizzare). Il mercato era spartito a poche grandi società internazionali, che facevano degli ottimi prodotti, li aggiornavano spesso e li vendevano a dei prezzi considerevolmente elevati (anche la modalità cosiddetta "educational", per scuole ed università, non era per niente a buon mercato). Di fatto, chi voleva lavorare in modo completo con un GIS (utilizzando cioè sia layer raster che vector), doveva avere due software diversi, che si integravano per alcune funzioni (overlay, ad esempio) e non molti formati. Esisteva una certa modularità nei software, che potevano essere potenziati con funzionalità aggiuntive specifiche non comprese nel pacchetto base (ad es.: il modulo vettoriale per i GIS raster, quello raster per il GIS vettoriale oppure il modulo per la correzione atmosferica o per l'ortorettificazione delle immagini o, ancora nell'ambito vettoriale, il pacchetto di analisi geo-statistica).

La successiva evoluzione del settore, avvenuta in poco più di un decennio, ha riguardato sia le versioni commerciali che quelle open source (ed è proprio qui che si sono registrati i maggiori cambiamenti). Vediamone brevemente alcune caratteristiche:

- ← si è progressivamente attenuata la specializzazione dei vari applicativi nel trattamento delle strutture grafiche raster e vector. Oggi è possibile eseguire operazioni di una certa complessità su un layer raster anche con un software GIS tradizionalmente specializzato in campo vettoriale (e viceversa);
  - ← i software GIS hanno generalmente una struttura modulare, nel senso che al pacchetto base possono essere aggiunte, in una sorta di personalizzazione funzionale, delle estensioni specifiche per lo svolgimento di determinate elaborazioni. Questo è vero sia nel settore commerciale (ove questa personalizzazione permette di economizzare le risorse monetarie dell'utente), che nel settore open source. In quest'ultimo sono molto utilizzati i cosiddetti plugin, estensioni residenti in repository (depositi) remoti, installabili a richiesta dall'utente, realizzate da ricercatori, accademici e/o semplici appassionati, che permettono di fare operazioni fra le più varie;
- ← i software open source si sono evoluti notevolmente, diventando una valida alternativa a quelli commerciali sia per quanto riguarda le funzioni disponibili che la solidità dell'applicativo (assenza di errori e crash improvvisi, un tempo purtroppo abbastanza frequenti). Inoltre, i programmi sono abbastanza intuitivi da utilizzare e generalmente disponibili per diverse piattaforme (Windows, Mac o Linux - anche se spesso le versioni per le piattaforme più diffuse sono quelle maggiormente curate e con più numerose funzionalità). Infine, va ricordata la manualistica, tradizionale tallone d'Achille dei prodotti open source che, invece, oggi è abbastanza curata e soprattutto disponibile in rete. Sono poi facilmente reperibili in Internet anche diversi tutorial e molti blog specializzati. Questi ultimi si possono consultare ed anche interrogare con domande specifiche, alle quali la comunità degli utilizzatori/sviluppatori generalmente risponde velocemente.

## Le procedure di trattamento delle immagini

L'evoluzione tecnica delle scene telerilevate ha in primo luogo cambiato alcune procedure comunemente applicate dagli utilizzatori/analisti in fase di pre-elaborazione.

Non molto tempo addietro (fine anni '90 del secolo scorso) le immagini erano composte e consegnate all'utente sotto forma di tanti file binari diversi; questi file dovevano essere organizzati in griglie, imponendo alla sfilza dei numeri a disposizione il corretto numero di righe e colonne; se si voleva poi utilizzare le scene telerilevate in ambito GIS (insieme ad altri dati cartografici, vettoriali o raster), queste dovevano poi essere sottoposte a lunghe ed accurate georeferenziazioni. Generalmente, un'immagine copre un'area abbastanza estesa di territorio. Se la scena era più estesa dell'area di studio, la stessa veniva ritagliata, in modo da economizzare il tempo necessario al riconoscimento dei punti di controllo (GCP – Ground Control Point). Una volta georiferita, l'immagine poteva ancora non essere corretta geometricamente, vuoi per vizi della procedura applicata (pochi GCP, un alto errore RMS – Root Mean Square, una funzione polinomiale con i parametri non ben stimati, ecc.), oppure per la tipologia del terreno ripreso, che poteva presentare una topografia mossa ed accidentata (aree montane, ad esempio). In questo caso, era necessario procedere con un'ortorettificazione dell'immagine, utilizzando un modello digitale del terreno. Quest'ultimo doveva avere una risoluzione spaziale sufficientemente elevata e non sempre era disponibile per l'area di studio<sup>7</sup>. Oggi, invece, le scene satellitari sono quasi sempre consegnate già ortorettificate<sup>8</sup>, in un formato immagine (geotiff o jpg2, ad esempio), rendendo in tal modo inutili le procedure ricordate.

Quando le immagini telerilevate non erano libere, poteva accadere che, a causa di risorse economiche limitate, si fosse costretti ad utilizzare scene riprese in stagioni diverse e/o con condizioni atmosferiche non omogenee. Si pensi ad esempio ad uno studio sulla vegetazione. E' facilmente comprensibile che il calcolo di un indice della vegetazione sia influenzato dalla stagione in cui è ripresa l'immagine. Una scena estiva, registrata magari dopo un periodo di siccità, darà dei risultati diversi rispetto ad un'altra, primaverile o autunnale. Ancora: sempre riguardo alle stagioni diverse, va ricordato l'effetto dell'altezza

<sup>7</sup> A livello globale, due sono state le principali fonti che hanno permesso di realizzare un modello di elevazione del terreno (DEM – Digital Elevation Model): una è la missione SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), dello Shuttle Endeavour nel 2000; l'altra è il satellite Terra, il cui sensore ASTER è in grado di effettuare misure stereoscopiche utilizzando due bande nell'infrarosso vicino (NIR – NearInfraRed - Nadir looking e NIR Backward looking). La prima ha reso disponibile un DEM con una risoluzione spaziale di 30 metri negli USA e di 90 nel resto del mondo. La seconda, un DEM con 30 metri di risoluzione spaziale per tutto il globo. Recentemente, i due archivi sono stati integrati in una nuova versione potenziata (SRTM Plus, vedi: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Non volendo utilizzare un DEM costruito mediante dati telerilevati, si può realizzare un modello digitale del terreno utilizzando una carta tecnica regionale digitale (scala 1:5000). Attualmente, sono abbastanza diffusi dei DEM ad altissima risoluzione (metrica), realizzati con rilievi LIDAR (Light Detection And Ranging).

<sup>8</sup> Ad esempio, per le informazioni sulla geometria dei prodotti Landsat, si veda: <http://landsat.usgs.gov//geometry.php>.

del sole sull'orizzonte, che determina delle zone d'ombra in prossimità dei rilievi. Infine, si pensi alle condizioni atmosferiche: le immagini possono essere più o meno nitide a causa del tasso di umidità oppure per la presenza di inquinanti vari nell'aria e ciò è più marcato per la banda del blu, a causa della sua limitata lunghezza d'onda (rispetto alle dimensioni delle particelle disperse nell'atmosfera). Se il primo fattore ricordato (stagionalità diversa delle immagini), ha ben poche soluzioni, per gli altri due si cercava di risolvere il problema attraverso delle correzioni radiometriche e atmosferiche, in modo da rendere le scene il più omogenee possibile prima di indagare il fenomeno allo studio. A parte il lavoro oneroso da fare, bisogna considerare che ogni correzione altera tutti i valori dei pixel dell'immagine, introducendo cambiamenti che si ripercuotono sull'analisi finale. Tale situazione è molto cambiata: non avendo più limiti di budget l'utente può oggi scegliere in tutto l'archivio le scene più adatte (omogenee), per il lavoro che si intende svolgere, evitando in tal modo di dover eseguire molte delle correzioni ricordate. Per contro, il progressivo incremento della qualità delle immagini telerilevate dal 1972 ad oggi (in termini di risoluzioni spaziali, spettrali e radiometriche), ha reso necessarie alcune nuove attenzioni/correzioni. Lavorando diacronicamente, ovvero utilizzando immagini di anni diversi è bene tener conto della:

- 1) differente risoluzione spaziale (rs): se il differenziale è elevato (ad esempio: una vecchia immagine Landsat con una rs di 80 metri rispetto ad una più nuova, con una rs di 30 metri), può essere opportuno un ricampionamento dell'immagine a bassa risoluzione. Si ricordi però che la procedura semplicemente rende uguali le celle delle due immagini ma non aumenta le informazioni dell'immagine a bassa risoluzione spaziale (alla fine si avranno pixel più piccoli ma tutti riportanti la stessa informazione del pixel iniziale, non ricampionato). Un'altra opzione, avendo a disposizione un'immagine con una banda pancromatica, è quella di fare una fusione di risoluzione ("resolution merge") fra le bande multispettrali e quella pancromatica. In questo modo si incrementa la risoluzione spaziale delle bande multispettrali (che diventa pari alla pancromatica): attenzione però che l'informazione multispettrale resta quella di partenza. Infine, se si hanno più immagini a varie risoluzioni spaziali e non si desidera portarle tutte alla risoluzione più elevata per la macchinosità delle procedure e considerato che, anche facendolo, il contributo informativo dell'immagine resta sempre quello di partenza (anche se con una griglia più densa), si può classificare ogni singola immagine, creando tante immagini tematiche, una per anno di riferimento. Poi si può ricampionare i pixel delle immagini tematiche, in modo da portarle tutte alla stessa risoluzione spaziale, così da poter fare i confronti che si desidera;
- 2) differente risoluzione spettrale: lavorando con immagini di sensori differenti vanno controllati i valori di riferimento (lunghezza d'onda), delle singole bande che si vogliono utilizzare per la costruzione di eventuali indicatori ambientali. Ad esempio, se si vuole costruire un indice di

vegetazione, bisogna vedere a quali bande di ciascun sensore corrispondono le lunghezze d'onda del rosso e dell'infrarosso vicino;

- 3) differente risoluzione radiometrica: come si è visto, è aumentata (da 8 a 12 bit). Questo vuol dire che i valori dei pixel di una determinata banda in due immagini radiometricamente diverse hanno rispettivamente una variabilità di 0-255 e di 0-4095. In questo caso, prima di qualsiasi elaborazione, è necessaria una correzione radiometrica delle due immagini ovvero la trasformazione dei DN dell'immagine in radianza assoluta o in riflettività<sup>9</sup>.

Sempre facendo riferimento a studi di carattere diacronico mediante il Telerilevamento, un'altra importante osservazione va fatta sulle procedure cosiddette di controllo delle differenze territoriali.

L'accresciuta disponibilità di scene telerilevate e la calibrazione fra i vari sensori che le hanno riprese nel tempo (si veda: Vogelmann et alii, 2016), ha determinato un'ulteriore importantissima evoluzione nel modo di applicare le procedure di elaborazione alle varie immagini. Tradizionalmente l'attenzione era focalizzata su due o più immagini; queste venivano elaborate singolarmente (magari operando una classificazione in differenti classi di copertura del suolo), ed infine alle immagini così elaborate venivano applicate delle procedure di controllo delle differenze. Oggi il nuovo paradigma per il trattamento di serie storiche di immagini satellitari parte dagli elementi che compongono l'immagine (i singoli pixel), a questi viene applicato un determinato algoritmo (ad esempio una semplice regressione lineare), che elabora ogni singolo pixel separatamente, insieme ai pixel delle altre immagini che hanno le stesse coordinate territoriali ma sono riprese in un momento temporale diverso (Vogelmann, op. cit). Non è un cambiamento da poco, che richiede potenze di calcolo non indifferenti per la gestione di corpose serie storiche di scene satellitari e, naturalmente, adattamenti dei software GIS, inserendo algoritmi di statistica multivariata (ad esempio: si veda il pacchetto raster per R, il diffuso linguaggio di programmazione ed ambiente di sviluppo per l'analisi statistica, Hijmans, 2016).

---

<sup>9</sup> La riflettività è una grandezza adimensionale, anche conosciuta come albedo. E' il rapporto fra l'energia riflessa da una superficie illuminata e la corrispondente energia incidente. Può assumere valori compresi tra 0 e 1 (si veda: Brivio et alii, op. cit.).

## Conclusioni

L'evoluzione tecnica delle immagini satellitari, dal 1972 (lancio di Landsat 1) ad oggi, è stata ricordata, così come l'odierna politica di liberalizzazione di diversi archivi "satellitari", oggi accessibili in rete. Parallelamente, il Telerilevamento si è giovato anche di una migliore distribuzione delle scene satellitari, attraverso i nuovi software residenti nella nuvola/Internet, accessibili attraverso un comune browser. Inoltre, si è visto come i tradizionali software GIS commerciali si siano evoluti nei nuovi applicativi modulari, che integrano le strutture grafiche raster e vector; tali nuovi software sono oggi reperibili sia in modalità commerciale che gratuita (open source); pur in modalità libera, si tratta di applicativi informatici di pari efficienza rispetto a quelli a pagamento. Questi fattori hanno contribuito alla diffusione del Telerilevamento per lo studio del territorio anche in ambito geografico. Le ricerche in questo settore, infatti, evidenziano sempre nuovi elementi, che contribuiscono a delineare un quadro globale complesso e controverso; un quadro dove le certezze sono periodicamente negate dalle evidenze di nuovi punti di vista, scoperti anche grazie all'analisi della grande massa dei dati satellitari raccolti<sup>10</sup>, che sono in continuo incremento.

L'efficienza e la maggiore semplicità d'uso dei nuovi software GIS open source ha inoltre semplificato e reso più economico l'utilizzo delle scene satellitari, incrementandone ulteriormente la diffusione.

Tutto ciò ci porta a considerare l'attuale momento storico come uno dei più favorevoli per l'impiego del Telerilevamento in campo geografico. Si pensa infatti che mai come oggi tale disciplina sia alla portata dei ricercatori. Ciò è vero sia dal lato economico (immagini e software distribuiti gratuitamente), che da quello operativo/intellettuale (accresciuta facilità di reperimento delle istruzioni per l'uso di tali strumenti in biblioteche tradizionali e virtuali - Web 2.0).

---

<sup>10</sup> Si può citare, ad esempio, il recente studio di Zhu et alii (2016), che ha evidenziato il cosiddetto fenomeno del rinverdimento della vegetazione a scala globale. Sulla base di una serie storica di scene satellitari ultra-trentennale (1982-2015), si è riscontrato un aumento dell'indice dell'area fogliare delle piante, per spiegare il quale sono stati costruiti dei modelli che bilanciano variabili quali l'incremento dell'anidride carbonica nell'atmosfera, dell'azoto nei terreni, la variazione nella copertura del suolo, della temperatura globale, delle precipitazioni e dell'irraggiamento solare.

## Bibliografia

- Belward A. S., Skoien J. O. (2015), "Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 115-128.
- Brivio P. A., Lechi G., Zilioli E. (2006), *Principi e metodi di Telerilevamento*, Torino, CittàStudi Edizioni.
- Favretto A. (2016), *Cartografia nelle nuvole*, Patron, Bologna.
- Favretto A. (2006), *Strumenti per l'analisi geografica GIS e Telerilevamento*, Bologna, Patron Editore, (2 a Edizione).
- Goodchild M., (2007), "Citizen as Sensors: the World of Volunteered Geography", *GeoJournal*, 69, 111-121.
- Hijmans R. J. (2016), "Introduction to the 'raster' package", <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/vignettes/Raster.pdf> .
- Jensen J. R. (2000), *Remote Sensing of the Environment*, NJ, Prentice Hall.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W. (1994), *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York, Wiley & Sons.
- Loveland T. R., Dwyer J. L. (2012), "Landsat: Building a strong future", *Remote Sensing of Environment*, 122, 22-29.
- Sui D., Goodchild M., Elwood S., (2013), "Volunteered Geographic Information, the Exaflood, and the Growing Digital Divide", in: Sui D., Elwood S., Goodchild M. (a cura di), *Crowdsourcing Geographic Knowledge Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, Springer.
- Toth C., Grzegorz J. (2016), "Remote sensing platforms and sensors: a survey", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.
- Vogelmann J. E., Gallant A. L., Shi H., Zhu Z. (2016), "Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data", *Remote Sensing of Environment*, 185, 258-270.
- Wang G., Weng Q. (2013), *Remote Sensing of Natural Resources*, CRC Press.
- Williamson R. A. (1997), "The Landsat Legacy: Remote Sensing Policy and the Development of Commercial Remote Sensing", *PE&RS*, 877-885.
- Wulder M. A., Masek J. G., Cohen W. B., Loveland T. R., Woodcock C. E. (2012), "Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat", *Remote Sensing of Environment*, 122, 2-10.
- Zhu Z., Piao S., Myneni R. B., Huang M., Zeng Z., Canadell J. G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian X., Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T. A. M., Stocker B. D., Viovy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zeng N. (2016), "Greening of the Earth and its drivers", *Nature Climate Change*, 791-795.

