

L'importanza della scelta del proxy e del fattore "incertezza" nel monitoraggio dell'evoluzione costiera tramite dati telerilevati

Luca Cenci

Centro di GeoTecnologie - CGT, Università di Siena, Via Vetri Vecchi 34, 52027, San Giovanni Valdarno (AR), Italia.
Ora a: WRR Programme, UME School, IUSS Pavia, Via Ferrata 1, 27100, Pavia, Italia, luca.cenci@gmail.com

Riassunto

Nel monitoraggio dell'evoluzione della linea di riva tramite dati telerilevati la scelta del *proxy* da adottare è un passaggio fondamentale che influenza il risultato finale. I *proxy* sono *feature* costiere (e.g. linea della vegetazione, scarpata dunale, *wet/dry line*) facili da mappare in quanto ben riconoscibili, la cui evoluzione viene studiata per trarre conclusioni riguardo l'evoluzione della linea di riva. Studi diversi, effettuati sulla medesima area, possono condurre a risultati dissimili se i *proxy* analizzati seguono dinamiche differenti. L'accuratezza del risultato è subordinata all'incertezza del dato misurato che, a sua volta, dipende da tutti quei fattori che influenzano l'identificazione del *proxy*. La scelta finale di questo dipende anche dalle caratteristiche fisiche dell'area di studio e dai dati a disposizione. Il lavoro qui proposto descrive lo studio dell'evoluzione della linea di riva dell'area centrale del Portogallo (Ovar–Marinha Grande, ca. 140 km) nell'intervallo temporale 1984-2011 tramite un confronto tra più *proxy* estratti da immagini satellitari Landsat i cui risultati finali sono stati confrontati per individuare il *proxy* più adatto da utilizzare per il monitoraggio dell'evoluzione costiera nell'area di studio.

Abstract

The monitoring of shoreline evolution by means of remote sensing techniques is highly influenced by the proxy adopted. Proxies are stable coastal features (e.g. the vegetation line, wet/dry line, base/top of bluff/cliff) that are mapped instead of the proper shoreline, which is a dynamic boundary more difficult to detect and delineate. The analysis of different proxies for the same study area may conduct to different results. Every proxy has an uncertainty that depends on all the factors which affect the accuracy of the proxy's delineation and that must be taken into account when interpreting results. In this paper, the shoreline evolution of the central region of Portugal (Ovar–Marinha Grande, ca. 140 km) was evaluated for the time span 1984-2011 by exploiting the Landsat archive's potentialities. Different proxies were analysed in order to find the more reliable proxy for monitoring the coastal evolution of the study area.

1. Introduzione

La visione multitemporale e sinottica dell'ambiente costiero offerta dai dati telerilevati (satellitari e/o aerei) è di fondamentale importanza nello studio dell'evoluzione della linea di riva (White, El Asmar, 1998). In questo contesto assume molta rilevanza la continuità temporale offerta dalla missione satellitare Landsat (e.g. White, El Asmar, 1998; Mukhopadhyay, 2012) e la possibilità di usufruire gratuitamente di questo archivio. La media/bassa risoluzione spaziale del dato (30 m) viene quindi compensata dalla ripetitività dell'acquisizione dello stesso. Di solito l'evoluzione della linea di riva (*shoreline*) è un fenomeno che viene misurato indirettamente tramite lo studio dell'evoluzione dei *proxy*. Queste sono altre *feature* costiere (e.g. linea della vegetazione, scarpata dunale, *wet/dry line*) più facili da mappare in quanto più stabili e riconoscibili del generico e dinamico confine acqua/terra (Boak, Turner, 2005; Milli, Surace, 2011). Lo studio qui presentato

nasce con lo scopo di approfondire il precedente lavoro di Cenci *et al.* (2013), integrato nel *Coastal zone Management Plan* dell'area Ovar–Marinha Grande (Portogallo; APA, 2013), nel quale è stata studiata l'evoluzione della linea di riva usando come *proxy* la linea della vegetazione dunale stabile. Sfruttando lo stesso *dataset* di immagini Landsat e le stesse procedure di elaborazione geometrica e radiometrica del dato sono stati studiati altri due *proxy* nel medesimo intervallo temporale (1984 – 2011). Il confronto finale dei tre risultati ottenuti è stato interpretato prendendo in considerazione l'entità del fenomeno misurato (segnale), l'incertezza della misura effettuata (rumore) e la metodologia di lavoro adottata. Questo ha permesso di individuare il *proxy* più adeguato per monitorare l'evoluzione della linea di riva nell'area di studio utilizzando il dato Landsat.

2. Area Di Studio

L'area di studio è localizzata nella parte centrale del Portogallo, *ca.* 140 km tra le municipalità di Ovar e Marinha Grande (Figura 1). Dal punto di vista geomorfologico l'area di studio è una pianura costiera orientata N21E° caratterizzata da spiagge bordate da un sistema dunale parallelo alla costa. La continuità di questo sistema è interrotta dalla laguna e dal porto di Aveiro e dalle scogliere della Serra da Boa Viagem e São Pedro de Moel. Il tipico profilo trasversale della spiaggia comprende la vegetazione rigogliosa della duna, una fascia transizionale di *barren land* di lunghezza variabile (0-300 m) e la spiaggia (Cenci *et al.*, 2013). L'altezza della cresta della duna primaria varia tra 7 e 18 m (C.D.); la pendenza media delle spiagge varia tra 0.07 e 0.09 e il diametro medio dei sedimenti che la compongono (di natura prevalentemente quarzosa) è 0.5 mm (Vidinha *et al.*, 1988; Ferreira, 1998; Silva *et al.*, 2009). Dal punto di vista meteo-marino è importante sottolineare che l'area ha un regime mesotidale (2-4 m), la direzione prevalente delle onde (altezza media 2 m) rispecchia quella dei venti dominanti (NO) e la corrente litoranea è diretta verso sud. Sebbene i sedimenti che compongono le spiagge dell'area di studio provengano da quattro bacini idrografici diversi (Douro, Vouga, Mondego, Lis) la maggior parte dell'apporto sedimentario dipende dal fiume Douro, localizzato a nord dell'area di studio (MAMAOT/APA I.P., 2012). I problemi di erosione presenti nell'area sono da imputare principalmente alla diminuzione dell'apporto sedimentario di quest'ultimo fiume che, in passato, forniva tra i 1.5 e 2.0×10^6 m³ di sedimenti ogni anno mentre, in tempi recenti, questo valore è inferiore a 0.25×10^6 m³/a (Bettencourt, 1997). Questa diminuzione è stata spiegata con una mutata gestione del bacino idrografico (*e.g.* dighe, cave in alveo; Coelho *et al.*, 2009; Roebeling *et al.*, 2011). L'urbanizzazione delle aree costiere, l'ampliamento del porto di Aveiro e l'introduzione di strutture ingegneristiche per la protezione del litorale (*e.g.* *sea wall* e *groyne*) hanno contribuito ad aggravare la situazione interferendo sulle naturali dinamiche di trasporto sedimentario e trasferendo alle aree più settentrionali i problemi di deficit sedimentario (Taveira-Pinto *et al.*, 2011; MAMAOT/APA I.P., 2012).

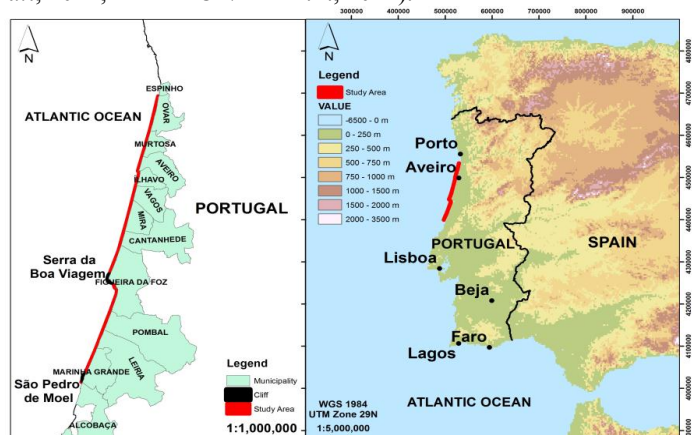


Figura 1. Area di studio.

3. Metodologia

Come già anticipato in precedenza questo studio nasce con l'intento di confrontare i risultati del lavoro di Cenci *et al.* (2013), ottenuti utilizzando come *proxy* la linea della vegetazione dunale stabile (StDVL - *Stable Dune Vegetation Line*), con quelli ricavati analizzandone altri due: la linea della vegetazione (SwDVL - *Seaward Dune Vegetation Line*) e la linea istantanea di riva (IWL - *Instantaneous Water Line*). La StDVL rappresenta la linea che separa la vegetazione rigogliosa della duna dalla fascia di *barren land*; la SwDVL rappresenta la linea che separa la fascia delle *barren land* dalla spiaggia senza vegetazione; la IWL rappresenta la linea che separa l'acqua dalla spiaggia. Il *dataset* di immagini utilizzato, le procedure di elaborazione geometrica e radiometrica delle immagini e l'algoritmo di elaborazione delle statistiche di avanzamento/arretramento sono state le stesse applicate in Cenci *et al.* (2013) al fine di garantire la confrontabilità dei risultati ottenuti.

- Dataset Di Partenza e Pre-Elaborazioni

Le immagini utilizzate sono delle immagini Landsat (Level 1T - *Standard Terrain Correction*) che coprono l'intervallo temporale 1984-2011 (Tabella 1) e delle ortofoto datate 2011 (risoluzione spaziale 0.5 m). Nelle analisi multitemporali di *change detection* è di fondamentale importanza la coregistrazione geometrica e radiometrica del *dataset* (Lunetta, Elvidge, 1998). In questo caso la coregistrazione geometrica delle immagini è stata valutata analizzando i residui dei GCP presenti nell'area di studio ottenuti dal processo di ortorettifica delle immagini (quindi inclusi nei metadati delle immagini stesse). Questi valori (RMSe in Tabella 1), inferiori di mezzo *pixel*, sono stati considerati accettabili e nessun operazione di coregistrazione geometrica è stata eseguita. Per quanto riguarda la radiometria delle immagini per prima cosa i valori di DN sono stati convertiti in radianza al sensore utilizzando le equazioni e i coefficienti descritti in Chander *et al.* (2009). Successivamente gli effetti relativi alla diffusione atmosferica sono stati attenuati utilizzando il metodo *image based DOS (Dark Object Subtraction)*; Song *et al.*, 2001). Infine le differenze radiometriche residue tra le immagini sono state mitigate applicando una procedura di Normalizzazione Radiometrica Relativa (RRN - *Relative Radiometric Normalization*) lineare basata sulle *Pseudo Invariant Feature (PIF)* (Schott *et al.*, 1988) utilizzando come immagine di riferimento la Landsat TM 2003 (Cenci *et al.*, 2013).

Data	08 - 09 - 1984	31 - 07 - 1987	24 - 06 - 2000	12 - 08 - 2003	07 - 08 - 2007	15 - 10 - 2009	05 - 10 - 2011
Sensore	TM	TM	ETM +	TM	TM	TM	TM
RMSe (m)	8	7	1	5	7	7	7

Tabella 1. Dataset di immagini satellitari Landsat a disposizione e valori di RMSe nel subset dell'area di studio.

- Estrazione dei proxy

La SwDVL è stata estratta dalle immagini Landsat utilizzando il *software* ESRI ArcGIS 9.3 e seguendo la procedura semi-automatica sviluppata da Cenci *et al.* (2013). La SwDVL è stata prima digitalizzata manualmente sulle ortofoto del 2011 in alcune aree fisiografiche campione rappresentative della diversa ampiezza della fascia delle *barren land*. Questa linea è stata tracciata più volte per poter ottenere una *best fit line* di riferimento che fosse influenzata il meno possibile dall'interpretazione dell'operatore. Successivamente questa linea è stata sovrapposta all'immagine Landsat coeva alla quale era stato applicato, in precedenza, il *Difference Vegetation Index (DVI = NIR-R; Lillesand, Kiefer, 1987)*. Sull'immagine Landsat 2011-DVI sono stati campionati 1342 *cluster* di *pixel (bilinear interpolation)* rispettivamente localizzati ai due lati della linea nelle aree campione. Il valore di radianza mediano (-7) di questa popolazione statistica è stato applicato a tutte le immagini Landsat-DVI per estrarre le SwDVL attraverso le procedure GIS "*reclassify*", "*raster to polygon*", "*polygon to line*" ed, infine, selezionando manualmente la linea in questione. Dal

momento che l'IWL è qualcosa che è istantaneo per definizione non è stato possibile utilizzare il *dataset* di ortofoto come dato di riferimento ad alta risoluzione spaziale. Il confine acqua/spiaggia, rappresentativo dell'IWL, è stato mappato individuando un valore soglia nella banda 7 delle immagini Landsat (Jupp, 1985; Wilson, 1997; White, El Asmar, 1999). La soglia in questione (1) è stata scelta cercando di individuare il valore massimo di radianza capace di identificare i corpi d'acqua. Il valore 0 non è stato adottato considerando gli effetti di riflettanza del fondo nella *swash zone* e di spuma nella *breaker zone* che generavano anomalie locali che non garantivano la coerenza nel tempo e nello spazio della mappatura dell'IWL. In conclusione, il *proxy* in questione è stato estratto in ogni immagine Landsat ancora attraverso procedure GIS descritte precedentemente. In ogni caso i *proxy* sono stati mappati solo nelle aree prive di insediamenti urbani perché questi sono protetti dall'erosione attraverso interventi antropici. Anche le falesie sono state escluse dalle analisi perché il loro arretramento è stato considerato non rilevabile nell'intervallo di tempo considerato, data la risoluzione spaziale dei sensori TM e ETM+. In totale le aree urbane e le falesie escluse rappresentano circa 26 km (meno del 20% dell'area di studio).

- Incertezza

L'affidabilità dei risultati nei studi di evoluzione di linea di riva dipende anche dall'accuratezza della quantificazione dell'incertezza associata ai dati raccolti (Hapke *et al.*, 2006). L'incertezza associata ad ogni *proxy* è data sia dai fattori fisici che ne influenzano la posizione in un determinato momento (*Positional Uncertainty*; e.g. maree, tempeste, condizione stagionale della spiaggia), sia dai fattori relativi alla natura e al processo di elaborazione del dato (*Measurement Uncertainty*; e.g. dimensione del *pixel*, ortorettifica). Queste incertezze possono essere rappresentate da una singola misura risultante dalla radice quadrata della somma di tutti i fattori di incertezza elevati al quadrato (Fletcher *et al.*, 2003). La quantificazione dell'incertezza è di fondamentale importanza in uno studio come quello qui proposto perché consente di capire il grado di confidenza del risultato alla luce del rapporto segnale/rumore: una misura metrica netta dell'arretramento/avanzamento della *shoreline* (NSM- *Net Shoreline Movement*; Thieler *et al.*, 2009) risulta essere davvero significativa se l'entità del segnale misurato è maggiore dell'incertezza del dato con il quale si lavora. Le Incertezze totali (I_{tot}) dei *proxy* considerati sono espresse in Tabella 2. I fattori che hanno contribuito alla determinazione di questi valori sono stati: **Dimensione del Pixel (P)**: perché in teoria non è possibile risolvere nulla inferiore di questa dimensione (Virdis *et al.*, 2012). **Ortorettifica (O)**: presupposto essere uguale al valore massimo dei residui dei GCP espressi nella Tabella 1 (RMSe). **Digitalizzazione Manuale (DM)**: rappresenta l'errore dell'operatore nel digitalizzare manualmente la stessa *feature*. È stato stimato digitalizzando la SwDVL sulle ortofoto più volte e calcolando la deviazione standard della distanza delle linee rispetto alla *best fit line* di riferimento. **Errore DVI-threshold (DVIT)**: calcolato misurando la distanza media tra la *best fit line* di riferimento e la SwDVL estratta dalla immagini Landsat. **Marea (M)**: equivale all'estensione del *foreshore*, ed è stato calcolato in base all'altezza di marea massima (4 m) e le condizioni più sfavorevoli di pendenza della spiaggia ($0.07 \rightarrow ca. 4^\circ$).

Proxy	P	O	DM	DVIT	M	I_{tot}
StDVL	30	8	5	12	/	34
SwDVL	30	8	5	9	/	33
IWL	30	8	/	/	57	65

Tabella 2. Fattori di errore e Incertezza totale (I_{tot}). Valori espressi in metri.

- Evoluzione della linea di riva - Risultati

La procedura metodologica adottata in questo studio si basa su un metodo di lavoro comunemente utilizzato dalla comunità scientifica per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva (e.g. Hapke *et al.*, 2006; Thieler *et al.*, 2009; Virdis *et al.*, 2012). Esso consiste nel calcolarne, in ambiente GIS, il tasso di avanzamento/arretramento lungo transetti perpendicolari ad essa ricavati analizzando un

dataset multitemporale di dati vettoriali rappresentanti la posizione della *shoreline* (o del *proxy*) nel tempo. Il movimento netto della *shoreline* (NSM) e/o il suo tasso annuale di avanzamento/arretramento (EPR - *End Point Rate*; LRR - *Linear Regression Rate*; WLR - *Weighted Linear Regression*) è direttamente misurato o ottenuto tramite interpolazione lineare delle posizioni assunte da questa in ogni transetto. Nel lavoro qui presentato le statistiche di avanzamento/arretramento dei *proxy* sono state calcolate utilizzando DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*), una applicazione GIS sviluppata dall'USGS (U.S. *Geological Survey*) che implementa questi algoritmi (Thieler *et al.*, 2009). Quest'applicazione si basa sul presupposto che l'avanzamento/arretramento dei *proxy* abbia un *trend* lineare. Quest'assunzione è stata verificata costruendo i grafici delle *time series* e osservando il coefficiente di determinazione (R^2), ottenuto dalla regressione lineare dei dati. Questi grafici rappresentano la relazione tra il tempo (epoca immagini Landsat) e lo spazio (distanza dei *proxy* da una *baseline* di riferimento) in ogni area di spiaggia interposta tra due insediamenti urbani consecutivi (settori A_n indicati in Figura 2). La media dei valori di R^2 è: 0.87 (StDVL); 0.51 (SwDVL) e 0.67 (IWL). Il tasso di movimento annuale (m/a) è stato calcolato per ogni *proxy* attraverso DSAS, impostando una spaziatura dei transetti di 100 m. Dal momento che l'incertezza è stata considerata costante per tutte le *shoreline* appartenenti allo stesso *proxy* si è scelto di adottare il LRR come tasso di riferimento per studiare l'evoluzione della linea di riva. Il *software* fornisce anche i valori di R^2 per ogni transetto che consente di stimare la linearità della regressione e quindi la bontà del risultato (Thieler *et al.*, 2009). I risultati sono stati rappresentati in un grafico transetti/LRR dove sono stati interpolati per ridurre il rumore e le anomalie locali (Figura 2, Tabella 3).

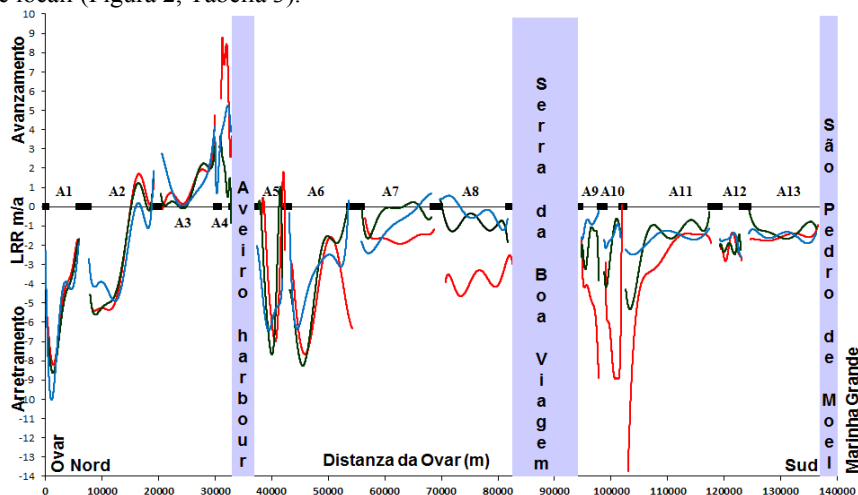


Figura 2. Funzioni di interpolazione-LRR. Legenda: aree in avanzamento: LRR > 0; aree in arretramento. LRR < 0; rosso: StDVL-LRR; verde: SwDVL-LRR; blu: IWL-LRR. I rettangoli neri (insediamenti urbani) e grigi rappresentano le aree escluse dalle analisi.

R^2	% di transetti StDVL	% di transetti SwDVL	% di transetti IWL
0 - 0.5	13%	66%	40%
0.6 - 0.7	21%	12%	23%
0.8 - 1	66%	22%	37%

Tabella 3. Confronto tra le statistiche di R^2 .

4. Discussione e Conclusioni

Dall'analisi dei risultati espressi in Figura 2 si evince che il *trend* generale dei *proxy* è di arretramento, il che suggerisce che la maggior parte del litorale possa essere affetto da processi erosivi. Tassi positivi (avanzamento) sono registrati quasi esclusivamente a nord del porto di Aveiro (A2, A3, A4 in Figura 2); ciò può essere spiegato dall'influenza di quest'opera antropica sulle dinamiche costiere (e.g. *longshore current*). Strutture del genere (e.g. *breakwater*, *groyne*) possono generare stime errate dei tassi naturali di LRR perché, se costruite durante il periodo di tempo investigato, alterano la linearità del processo e possono mistificare eventuali previsioni di scenari futuri che si basano sui dati analizzati utilizzando questa metodologia di lavoro (Cenci, 2013). Un'altra evidenza che risulta dal grafico in questione è che seppur i *trend* siano simili si nota, nei settori A4 e A7-A11 in Figura 2, che il *trend* della StDVL è più marcato degli altri due, sia in termini di accrescimento che di arretramento. Questa è una chiara conseguenza dell'assunzione di fondo dello studio in questione: *proxy* diversi possono evolvere in maniera diversa. Difatti, sebbene la procedura metodologica alla base di questo studio sia riconosciuta ed adottata dalla comunità scientifica, le varie differenze che sussistono nella sua implementazione (e.g. tipo di *proxy* scelto, modalità di estrazione dello stesso, statistiche adottate) possono condurre a risultati diversi anche lavorando sulla medesima area di studio (Crowell *et al.*, 1993). Il confronto tra i risultati è quindi spesso di difficile interpretazione (Taveira-Pinto *et al.*, 2011) e deve essere eseguito alla luce di tutti i fattori che intervengono nella determinazione degli stessi. In questo caso, per confrontare i risultati ottenuti con quelli di Cenci *et al.* (2013) sono state adottate (ove possibile) le stesse procedure metodologiche. In tal senso, la corrispondenza generale tra i risultati ottenuti dai tre *proxy* in questione è un'indicazione di buona riuscita del lavoro (Figura 2). Le differenze residue tra i risultati sono da imputare ai diversi processi fisici, ambientali e geomorfologici che si sviluppano sul litorale in questione e che influenzano l'evoluzione dei *proxy*. Le spiegazioni potrebbero essere molteplici: la più ovvia, riferita ai *trend* basati sulla vegetazione, è che, una volta sottoposta ad erosione (e.g. in occasioni di tempeste o mareggiate particolari), la vegetazione più stabile (StDVL) ricresce con più lentezza rispetto alla vegetazione meno stabile (SwDVL). Altre differenze di andamento nei *trend* riferiti alla vegetazione potrebbero essere dettate, ad esempio, da disboscamenti della vegetazione più stabile oppure dall'influenza della stagionalità e del ciclo fenologico nelle immagini catturate in periodi dell'anno diversi. Quest'ultima possibile fonte di incertezza è stata ridotta al minimo selezionando, per quanto possibile, immagini appartenenti a stagioni contigue (Tabella 1). Per capire quale sia il *proxy* più adatto per studiare le dinamiche della linea di riva dell'area di studio in questione con i dati satellitari Landsat e la metodologia qui proposta può essere esaminata l'incertezza dei dati analizzati (I_{tot} - Tabella 2). I *proxy* basati sulla vegetazione (StDVL e SwDVL) sono da considerare, in termini di incertezza (rispettivamente 34 m e 33 m), equivalenti tra loro e più affidabili rispetto all'IWL (65 m). Il fattore che influenza maggiormente la loro qualità è la risoluzione del *pixel* (P). Al contrario il risultato ottenuto dall'IWL è anche largamente influenzato dalla marea (M). L'impossibilità di ottenere immagini satellitari nelle medesime condizioni tidali e di avere precise informazioni riguardo la propagazione della marea sulla spiaggia nelle immagini a disposizione ha inciso drasticamente nella stima del fattore M, portando una sovrastima dello stesso, quantificato considerando le condizioni più sfavorevoli possibili (altezza di marea massima e pendenza della spiaggia minima). Benché queste condizioni siano improbabili e l'andamento della curva LRR-IWL sia molto simile a quello della curva LRR-SwDVL, la sua elevata incertezza lo rende il *proxy* più inaffidabile tra quelli analizzati. Il fattore discriminante nei *proxy* basati sulla vegetazione è stato invece R^2 . Nella Tabella 3 sono espresse le percentuali dei transetti appartenenti a diverse categorie di R^2 per ogni *proxy*. Risulta evidente che la StDVL è il *proxy* migliore perché, coerentemente con l'algoritmo di regressione lineare adottato, ha il maggior numero di transetti con il coefficiente R^2 più elevato. Infine, un'ultima importante considerazione deve essere fatta: transetti il cui valore del rapporto segnale/rumore è minore di uno ($(NSM/I_{tot} < 1)$) rappresentano le aree in cui il dato misurato non permette discussioni riguardo la significatività del fenomeno. Questi transetti possono essere

classificati come “trasetti con valori al di sotto del segnale minimo rilevabile” e ciò implica che i loro tassi di avanzamento/arretramento possono essere stimati con difficoltà tramite il dato Landsat. DSAS fornisce anche le statistiche relative al NSM, che permettono di calcolare la percentuale dei trasetti con valore del rapporto $|NSM/I_{tot}| > 1$: ca. il 78% per la StDVL, ca. il 39% per la SwDVL e ca. il 31% per l'IWL. Alla luce di tutte queste considerazioni (incertezza, R^2 , segnale/rumore) si può considerare la linea della vegetazione dunale stabile come il *proxy* più adatto a studiare l'evoluzione della linea di riva nell'area Ovar-Marinha Grande utilizzando l'archivio di immagini gratuite Landsat e la metodologia qui proposta. Questa considerazione è supportata anche dalla letteratura: Boak, Turner (2005) considerano la StDVL un buon indicatore di evoluzione che risulta essere meno sensibile quando la costa è in avanzamento. Il litorale in questione, essendo per la maggior parte in erosione, si presta per l'utilizzo di questo *proxy*. Dimostrazione di ciò è data pure dall'adozione di questo *proxy*, nello studio della stessa area, anche da altri autori (e.g. Taveira-Pinto et al., 2009).

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare il prof. Leonardo Disperati (Università di Siena – CGT) e la prof.ssa Maria de Fátima Lopes Alves (Universidade de Aveiro) per gli insegnamenti e l'impegno profuso durante il periodo di stesura della tesi di laurea, in parte riassunta in queste pagine.

Riferimenti bibliografici

- APA (2013). *Revisão do plano de ordenamento da orla costeira Ovar - Marinha Grande, Relatório de fase 3 - projecto de POOC e plano de intervenções, Volume VI - Análise multi-temporal da evolução da linha de costa e cenário futuro*. Agência Portuguesa do Ambiente I.P., 42 p.
- Bettencourt P. (1997). “Notas para uma estratégia de gestão da orla costeira”. In: Carvalho G.S. (ed.), *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*. Associação Eurocoast - Portugal (AEP), Porto, Portugal, pp. 265-283.
- Boak E.H., Turner I.L. (2005). “Shoreline definition and detection: a review”. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688–703.
- Cenci L. (2013). *Gis and remote sensing for coastal evolution studies: multi-proxy shoreline changes in the Ovar–Marinha Grande area (Portugal) from 1984-2011 and 2022 scenarios*. Italy: University of Siena, Master's Thesis, 130 p.
- Cenci L., Disperati L., Sousa L.P., Phillips M., Alves F.L. (2013). “Geomatics for integrated coastal zone management: multitemporal shoreline analysis and future regional perspective for the Portuguese central region”. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65: 1349-1354.
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L. (2009). “Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors”. *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.
- Coelho C., Conceição T., Ribeiro B. (2009). “Coastal erosion due to anthropogenic impacts on sediment transport in Douro River – Portugal”. *Proceedings of the Coastal Dynamics 2009 conference*, Tokyo, Japan. Paper 72, 15 p.
- Crowell M., Leatherman S.P., Buckley M.K. (1993). “Shoreline change rate analysis: long term versus short term data”. *Shore and Beach*, 61(2): 13-20.
- Ferreira Ó. (1998). *Morfodinâmica de praias expostas: aplicação ao sector costeiro Aveiro-Cabo Mondego*. Algarve, Portugal: University of Algarve, Ph.D. Thesis, 337 p.
- Fletcher C., Rooney J., Barbee M., Lim S.C., Richmond B. (2003). “Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii”. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 38: 106–124.

- Hapke C.J., Reid D., Richmond B.M., Ruggiero P., List J. (2006). *National Assessment of Shoreline Change part 3— Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California coast*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1219, 72 p.
- Jupp D.L. (1985). *Landsat based interpretation of the Cairns section of the Great Barrier Reef Marine Park*. CSIRO, Melbourne.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. (1987). *Remote sensing and image interpretation, 2nd edition*. New York: John Wiley and Sons, 721 p.
- Lunetta R.S., Elvidge C.D. (ed.), (1998). *Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and application*. Chelsea, Michigan, USA: Ann Arbor Press, 318 p.
- MAMAOT/APA I.P., 2012. *POOC Ovar-Marinha Grande: Volume I. Relatório: caracterização e diagnóstico prospectivo*. CEDRU/ Universidade de Aveiro. Lisboa, Portugal, 829 p.
- Milli M., Surace L. (2011). *Le linee della costa. Definizioni, riferimenti altimetrici e modalità di acquisizione dei dati*. Alinea Editrice, Città di Castello, Perugia, Italia, 79 p.
- Mukhopadhyay A., Mukherjee S., Mukherjee S., Ghosh S., Hazra S., Mitra D. (2012). “Automatic shoreline detection and future prediction: A case study on Puri Coast, Bay of Bengal, India”. *European Journal of Remote Sensing*, 45: 201-213.
- Roebeling P.C., Coelho C.D., Reis E.M. (2011). “Coastal erosion and coastal defense interventions: a cost-benefits analysis”. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 64: 1415-1419.
- Schott J.R., Salvaggio C., Volchok W.J. (1988). “Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features”. *Remote Sensing of Environment*, 26: 1–16.
- Silva R., Baptista P., Veloso-Gomes F., Coelho C., Taveira-Pinto F. (2009). “Sediment grain size variation on a coastal stretch facing the North Atlantic (NW Portugal)”. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56: 762–766.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Pax Lenney M., Macomber S.A. (2001). “Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?” *Remote Sensing of Environment*, 75: 230–244.
- Taveira-Pinto F., Pais-Barbosa J., Veloso-Gomes F. (2009). “Coastline evolution at Esmoriz-Furadouro Stretch (Portugal)”. Proceedings of the 10th International Coastal Symposium (Lisbon, Portugal), *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56: 673–677.
- Taveira-Pinto F., Silva R., Pais-Barbosa J. (2011). “Coastal erosion along the Portuguese northwest coast due to changing sediment discharges from rivers and climate change”. In: Schernewski G., Hofstede J., Neumann T. (ed.), (2011). *Global Change and Baltic Coastal Zones*. Dordrecht Heidelberg London New York, Springer, pp. 135-150.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L., Ergul A. (2009). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *Current version 4.2, 81 p.
- Vidinha J.M., Rocha F., Andrade C., Gomes C. (1988). “Mineralogical characterization of the fine fraction of the beach and dune sediments situated between Espinho and Torreira (Portugal). A geostatistical approach”. *Cuaternario y Geomorfología*, 12(3-4): 49-56.
- Virdis S.G.P., Oggiano G., Disperati L. (2012). “A geomatics approach to multitemporal shoreline analysis in western Mediterranean: The case of Platamona-Maritza beach (northwest Sardinia, Italy)”. *Journal of Coastal Research*, 28(3): 624–640.
- White K., El Asmar H.M. (1999). “Monitoring changing position of coastlines using thematic mapper imagery, an example from the Nile Delta”. *Geomorfology*, 29: 93-105.
- Wilson P.A. (1997). “Rule-based classification of water in Landsat MSS images using the variance filter”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(5): 485-491.