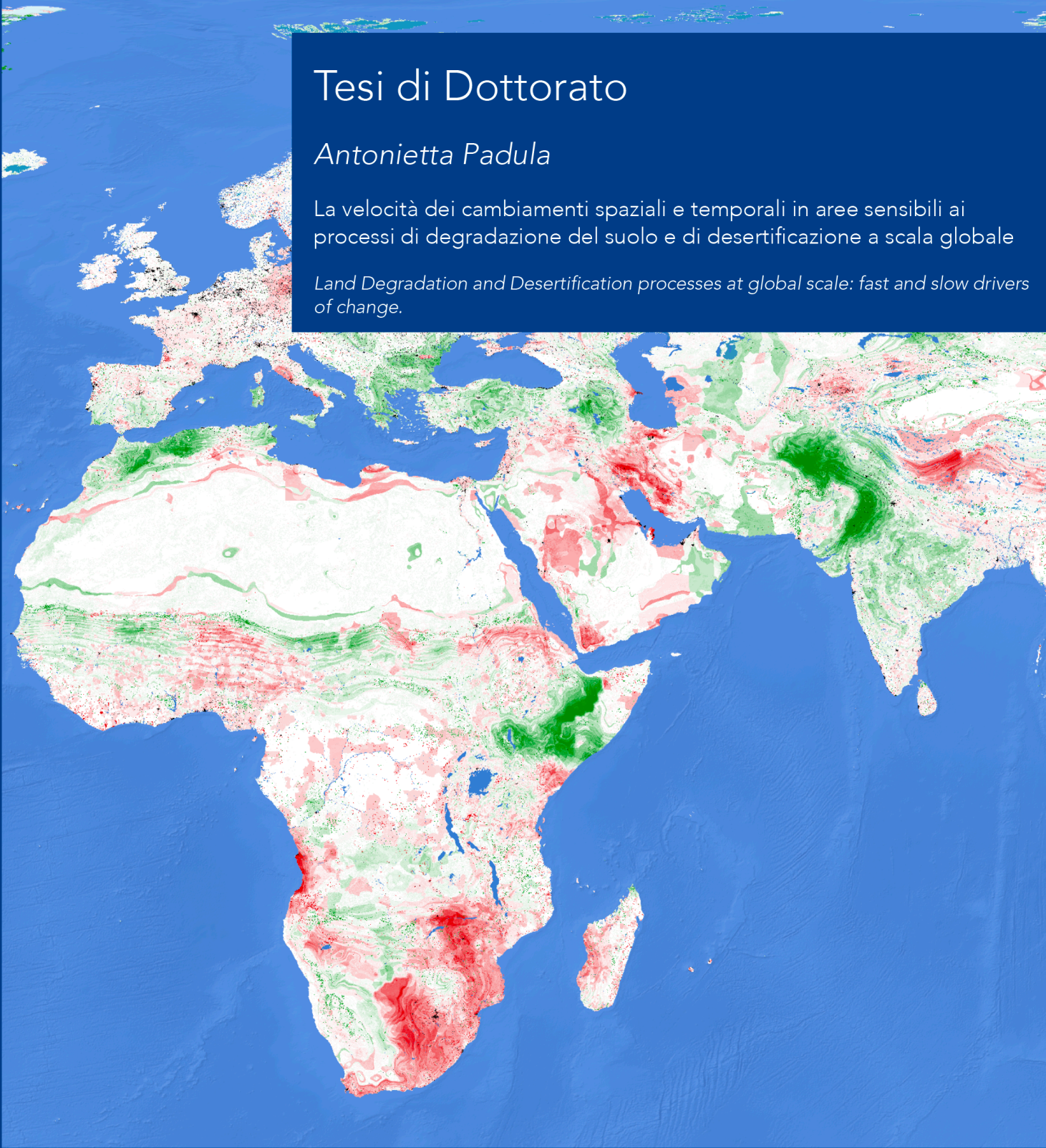


# Tesi di Dottorato

*Antonietta Padula*

La velocità dei cambiamenti spaziali e temporali in aree sensibili ai processi di degradazione del suolo e di desertificazione a scala globale

*Land Degradation and Desertification processes at global scale: fast and slow drivers of change.*



Università degli Studi della Basilicata



Dottorato in 'Scienze e Tecnologie Agrarie, Forestali, e degli Alimenti'  
XXXII Ciclo (2016/17 – 2018/19)

Coordinatore: Prof. Fabio Napolitano

Docenti di riferimento: Prof. Agostino Ferrara, Prof. Angelo Nolè



# Università degli Studi della Basilicata

Dottorato in 'Scienze e Tecnologie Agrarie, Forestali e degli Alimenti'

## Titolo della Tesi

La velocità dei cambiamenti spaziali e temporali in aree sensibili ai processi di degradazione del suolo e di desertificazione a scala globale

## *Thesis Title*

*Land Degradation and Desertification processes at global scale: fast and slow drivers of change.*

# Preprint

Coordinatore del Dottorato: Prof. Fabio Napolitano

---

Dottoranda: Dott.ssa Antonietta Padula

---

Docenti di riferimento: Prof. Agostino Ferrara

---

Prof. Angelo Nolè

---

XXXII Ciclo (2016/17 – 2018/19)



# Indice

---

Riassunto	5
Abstract	7
Introduzione	9
1. I processi di Land Degradation and Desertification (LDD)	12
1.1. La LDD a scala globale	13
1.2. La LDD nel Bacino del mediterraneo	19
1.3. La LDD in Italia	23
1.4. Il Modello ESA	27
2. La velocità dei cambiamenti spazio-temporali nei processi di LDD ( <i>fast and slow drivers of change</i> )	31
2.1. Ambito di riferimento concettuale	32
2.2. Ambito di riferimento specifico	33
3. Materiali e Metodi	
3.1. L'area di studio	36
3.2. Il metodo ESA e i nuovi algoritmi utilizzati per il calcolo delle mappe	36
3.3. Le banche dati utilizzate	37
3.4. Riferimenti concettuali sugli strati utilizzati	40
3.5. Il nuovo schema di classi e punteggi utilizzato	42
3.6. La preparazione degli strati e la l'elaborazione degli indici	45
3.7. Metodologie di analisi	46
4. Analisi dei dati e discussione dei risultati	
4.1. La sensibilità ambientale ai processi di LDD a scala globale	54
4.2. La variazione della sensibilità ambientale nel tempo	61
4.3. Velocità e impatto dei cambiamenti della Sensibilità Ambientale nel tempo e nello spazio ( <i>fast and slow drivers of change</i> )	64
4.3.1 Le variazioni della Sensibilità Ambientale tra i periodi considerati	65
4.3.2 Le variazioni complessive della Sensibilità Ambientale nell'intero periodo considerato	70
4.4. Rapporti tra SQI e variabili fast and slow	79
4.5. Casi di studio ( <i>Hot-Spots</i> )	81
4.5.1. Hot Spot 1, impatto della popolazione	
4.5.2. Hot Spot 2, impatto della popolazione	83
4.5.3. Hot Spot 3, impatto della popolazione	87
5. Conclusioni	92
Bibliografia	94

I processi di degradazione del suolo, tipicamente collegati ad ambienti umidi e semi-umidi, e quelli di desertificazione, tipicamente riferiti ad ambienti aridi, semiaridi o sub-umidi (*Land Degradation and Desertification*, LDD) costituiscono una minaccia per le regioni aride, semi aride, sub-umide e umide presenti in tutti i continenti, rappresentando una minaccia per circa un miliardo di abitanti degli oltre cento paesi a rischio. Pur essendo processi naturali, le attività antropiche direttamente o indirettamente sono in grado di influenzare fortemente le dinamiche che si instaurano in tali processi di LDD, causando sensibili accelerazioni nei processi di degrado dei territori e degli ecosistemi. Proprio per l'interesse sui risvolti che questi processi hanno sull'ambiente e sull'uomo, moltissimi studi sono stati condotti in questo ambito sia a livello locale che mondiale da ricercatori, singolarmente, e da istituzioni a livello internazionale (FAO, UNEP, UNCCD, EU, ... etc.). Nonostante la significativa produzione scientifica e tecnica disponibile, l'argomento è ancora di grande attualità in particolare per la tendenza evolutiva dei fenomeni legati al clima e alle pressioni dell'uomo sull'ambiente che necessitano sempre di maggiori e contestualizzate analisi.

In tale ambito, la presente ricerca di dottorato esplora il ruolo e l'influenza delle cosiddette variabili *fast and slow*, definite in funzione dell'impatto che queste hanno sulla velocità di cambiamento e di evoluzione dei Sistemi Socio-Ecologici (*Socio-Ecological Systems* – SES) caratterizzati da processi di degradazione e desertificazione del suolo. L'obiettivo complessivo della presente tesi è lo sviluppo di un ambiente di analisi e valutazione (*framework*) dei *patterns* spaziali e temporali di Sensitività ai processi di LDD dei sistemi socio-ecologici a scala globale, basato su procedure multivariate semplificate e applicabili a contesti e condizioni molto diversi. Lo studio include l'analisi qualitativa e quantitativa dei processi di LDD a scala globale (e delle relazioni che a essi sottendono) anche al fine di fornire un modello di supporto contestualizzato alla definizione e l'implementazione di strategie di gestione territoriale efficaci e sostenibili in aree vulnerabili dal punto di vista ambientale.

L'approccio concettuale e metodologica proposto è stato basato sull'uso del modello Medalus - ESA nella sua versione aggiornata (Ferrara et al., 2020) e sulla applicazione di un set di analisi e approcci statistici integrati e complementari (quali la statistica descrittiva e le analisi univariate, il *data mining*, le analisi della tendenza o le analisi multivariate) in grado di esplorare, nella loro molteplicità tutti i differenti aspetti delle forze in gioco. I risultati prodotti hanno dimostrato l'efficienza e la potenzialità applicativa del modello ESA per la valutazione dei cambiamenti spazio temporali che caratterizzano i sistemi socio-ecologici e la capacità del *framework* proposto di analizzare e discriminare l'impatto che le differenti variabili hanno su questi cambiamenti.



L'originalità di questo studio risiede nella capacità dell'approccio proposto di identificare i principali fattori a livello globale che interagiscono con i fenomeni collegati alla LDD non solo in termini di velocità di cambiamento ma anche in termini di impatto sui differenti sistemi socio-ecologici. I risultati confermano anche la capacità di identificare le tendenze in termini di distribuzione spaziale e fare luce sulle relazioni intrinseche che esistono tra le caratteristiche temporali e spaziali delle variabili che incidono sul sistema. Il presente studio fornisce inoltre, un contributo metodologico per il supporto all'implementazione di azioni di mitigazione attraverso pratiche sostenibili di gestione, con particolare riguardo ai cambiamenti socio-economici, di uso del suolo e ai cambiamenti climatici.

Soil degradation (Land Degradation) typically related to wet and semi-wet environments, and desertification (Land Desertification) related to sub-humid, semi-arid or arid environments (Reynolds *et al.*, 2007; Middleton and Sternberg 2013; Prăvălie, 2016), are mainly characterised by the progressive degradation of soil functions supporting the ecosystems, as a consequence of a series of evolutionary processes, especially where limiting conditions for their performance coexist (Kosmas *et al.*, 1999d).

Certainly, they are complex phenomena occurring as a consequence of multiple environmental factors, often interrelated, and forced by predisposing or anthropogenic factors. The evolution of soil degradation or desertification (Land Degradation and Desertification, hereinafter LDD) processes also depends on the adoption of land management policies and the implementation of interventions affecting the causes and effects.

The knowledge of the Socio-Ecological System's (SES) components and activities that greatly impact LDD processes is the fundamental premise for an effective definition of strategies to reduce negative impacts not only from an environmental point of view (biodiversity reduction, productivity) but also from a socio-economical perspective to the sustainable development of the areas affected. Generally, environmental systems are characterized by a state of dynamic equilibrium between internal and external factors, where any balance alteration due to small disturbances, tend to be absorbed or contained by the system.

The relationships between the environmental components (relating to soil climate and vegetation) and the anthropogenic component therefore assume a role of absolute centrality in the analysis and evaluation of LDD processes. Moreover, the study of LDD phenomena, especially if they concern heterogeneous and complex environments such as those on a continental or global scale, must be supported by analysis tools capable of grasping the whole and the detail of both natural and anthropogenic factors involved and, at the same time, evaluate the relationships between them in space and time. In this context, this PhD research explores the role and influence of the so-called fast and slow variables, defined as a function of their impact on the speed of change and evolution of Socio-Ecological Systems (SES) characterized by soil degradation and desertification processes.

The overall objective of this thesis is the development of a framework for the analysis and evaluation of spatial and temporal patterns of sensitivity to LDD processes on a global scale, based on simplified multivariate procedures applicable to a wide range of environmental contexts and conditions.



In addition, the level of investigation in representative areas and/or areas with higher Environmental Sensitivity (hot spots) will be deepened in order to characterize the factors that contribute, in a relevant way, to the existing LDD processes.

The conceptual and methodological approach proposed was based on the use of the updated version of the Medalus - ESA model (Ferrara *et al.*, 2020) and on the application of a set of integrated and complementary analyses and statistical approaches (such as descriptive statistics and univariate analyses, data mining, trend analyses or multivariate analyses) able to explore all the different aspects of the variables involved. The results demonstrated the efficiency and potential of the ESA model implementation for the evaluation of space-time changes that characterize socio-ecological systems and the capacity of the proposed framework to analyse and discriminate the impact that the different variables have on these changes.

The originality of this study lies in the ability of the proposed approach to identify the main global factors that interact with LDD-related phenomena not only in terms of speed of change but also in terms of impact on different socio-ecological systems. The results also confirm the ability to identify trends in terms of spatial distribution and to shed light on the intrinsic relationships that exist between the temporal and spatial characteristics of the variables affecting the system.

The present study also provides a methodological contribution to support the implementation of mitigation actions through sustainable management practices, with particular attention to socio-economic changes, land use and climate change.

I processi di degradazione del suolo (*Land Degradation*) - tipicamente collegati ad ambienti umidi e semi-umidi - e di desertificazione (*Land Desertification*) - caratteristici di ambienti sub-umidi, semiaridi o aridi (Reynolds *et al.*, 2007; Middleton and Sternberg, 2013; Prăvălie, 2016), si connotano soprattutto per il progressivo degrado delle funzioni che i suoli svolgono a sostegno degli ecosistemi che su di essi si sono sviluppati, come conseguenza di una serie processi evolutivi soprattutto laddove coesistano condizioni limitanti per il loro rendimento (Kosmas *et al.*, 1999b). Certamente sono fenomeni complessi che si manifestano conseguentemente a molteplici fattori ambientali, spesso interrelati, ai quali vanno ad aggiungersi anche fattori predisponenti o di natura antropica. Tali processi di degradazione del suolo o di desertificazione (*Land Degradation and Desertification*, di seguito LDD) possono inoltre evolvere o regredire in risposta dell'adozione di politiche gestionali del territorio e della realizzazione di interventi che incidano sulle cause e sui suoi effetti.

La conoscenza delle componenti socio-ecologiche che maggiormente incidono nei processi di LDD costituisce la premessa fondamentale per una efficace definizione di strategie atte a ridurre gli impatti negativi non solo dal punto di vista ambientale (riduzione biodiversità, produttività) ma anche socio-economico a uno sviluppo sostenibile delle aree interessate. Generalmente i sistemi ambientali sono caratterizzati da uno stato d'equilibrio dinamico tra fattori interni ed esterni laddove, al verificarsi di piccoli cambiamenti, le alterazioni di equilibrio tendono a essere assorbite o contenute dal sistema. Questi cambiamenti portano di solito a una maggiore resistenza dello strato superficiale all'erosione, dovuta alla presenza in superficie di materiale grossolano e alla migliore ritenzione idrica. Entrambi i cambiamenti tendono a compensare gli effetti dell'aumentata erosione. In molti casi, gli effetti di un cambiamento esterno sono anche reversibili, in modo che, una riduzione dell'erosione permetterà, nel tempo, una maggiore disgregazione in frazioni più fini del materiale grossolano. I processi di LDD di un'area diventano invece irreversibili con il superamento di determinate soglie di criticità. Per esempio, suoli possono diventare, a seguito di forti processi d'erosione tanto pietrosi, che potranno degradare solo verso ghiaioni o verso la roccia madre.

Le cause di origine naturale sono da attribuirsi principalmente agli andamenti climatici, da cui dipendono importanti fattori come l'aridità, la siccità, l'erosività della pioggia, la copertura vegetale, la morfologia del terreno.

Le alterazioni di origine naturale sono in stretta relazione con le numerose attività antropiche quali: la costante deforestazione, l'aumento della popolazione, l'urbanizzazione, gli incendi boschivi, l'abbandono delle zone rurali e l'intensificazione dell'agricoltura nelle pianure, etc. Nello specifico, va



detto che la pressione antropica sull'ambiente è andata intensificandosi soprattutto negli ultimi cinquant'anni. Una popolazione in crescita, infatti, innesca esigenze e aspettative di qualità di vita che portano dinamiche di concentrazione abitativa, migrazione, uso del territorio via via più intenso che determinano una correlazione positiva tra densità di popolazione e livello di degrado delle terre (Kosmas *et al.*, 1999b). Ad esempio, in agricoltura la coltivazione di aree marginali con terreno povero non adatto all'agricoltura, ha portato l'aumento dell'erosione del suolo e alla progressiva perdita di materia organica, di conseguenza l'istaurarsi di processi di degradazione e la riduzione della vegetazione per quanto riguarda la biodiversità e produttività (Basso *et al.*, 2009). Va dunque sottolineato che, nella maggior parte dei casi e compatibilmente alla presenza di eventuali fattori predisponenti, i fattori naturali concorrono poco al degrado del suolo e dell'ambiente poiché, l'origine del processo è solitamente la diretta conseguenza di uno sfruttamento non razionale delle risorse, che non permette di coniugare le esigenze dello sviluppo produttivo con quelle della conservazione e della sostenibilità. Le relazioni che intercorrono tra le componenti ambientali (relative al clima al suolo e alla vegetazione) e la componente antropica assumono dunque un ruolo di assoluta centralità nelle analisi e nella valutazione dei processi di LDD. Inoltre, lo studio dei fenomeni di LDD, soprattutto se in ambienti eterogenei e complessi come quelli a scala continentale o globale, deve necessariamente avvalersi di strumenti di analisi in grado di cogliere l'insieme e il dettaglio dei fattori coinvolti e, al contempo, valutare le relazioni che tra loro intercorrono nello spazio e nel tempo.

In tale ambito, a presente ricerca di dottorato esplora il ruolo e l'influenza delle cosiddette variabili *fast and slow*, così definite in funzione dell'impatto che queste hanno sulla velocità di cambiamento e di evoluzione dei Sistemi Socio-Ecologici (*Socio-Ecological Systems* – SES) caratterizzati da processi di degradazione e desertificazione del suolo.

Obiettivo complessivo della presente tesi è lo sviluppo di un ambiente di analisi e valutazione (*framework*) dei pattern spaziali e temporali di Sensibilità ai processi di LDD a scala globale, basato su procedure multivariate semplificate e applicabili a contesti e condizioni molto diversi.

In tale contesto, verrà inoltre approfondito il livello di indagine in aree rappresentative e/o a maggiore Sensibilità Ambientale (*hot spot*) al fine di evidenziare le possibilità di una caratterizzazione dei fattori che contribuiscono, in maniera rilevante, ai processi di LDD in essere in differenti situazioni socio-ecologiche.

## 1. I processi di *Land Degradation and Desertification* (LDD)

---

Il primo progetto sulla desertificazione "*Major Project on Scientific Research on Arid Lands*", fu proposto nel 1951 dall'UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*). Il programma, concluso nel 1962, condusse alla pubblicazione di un bollettino e di alcuni provvedimenti per la concessione di fondi agli istituti di ricerca sulle zone aride, all'organizzazione di conferenze e alla pubblicazione di una serie di ricerche e rapporti speciali.

Nel 1977, dopo la gravissima siccità che colpì l'Africa tra il 1969 ed il 1973, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite convocò una Conferenza Internazionale sulla Desertificazione a Nairobi, Kenya, con la presenza di quasi 100 nazioni e molte organizzazioni internazionali, governative e non. Sebbene precedentemente l'UNESCO avesse riconosciuto l'importanza della degradazione delle terre attraverso il Programma per le zone aride, solo con la risoluzione delle Nazioni Unite n. 3337 del 1974, che prevedeva l'organizzazione della Conferenza, si riconobbe ufficialmente il carattere globale del problema. Durante tale Conferenza, oltre a sensibilizzare la comunità internazionale, per la prima volta, venne data la definizione di desertificazione in base ad un criterio di produttività biologica: "riduzione o distruzione del potenziale biologico del terreno che può condurre a condizioni desertiche". Per coordinare le future attività di lotta alla desertificazione a livello internazionale fu inoltre istituito, sempre a Nairobi il Centro di Attività del Programma di Controllo della desertificazione (DC/PAC). Il documento relativo alla prima valutazione (*Global Assessment Progress – GAP*), fu presentato nel 1984 e costituì il primo vero tentativo di raccogliere in maniera sistematica dati riguardanti la degradazione delle terre in tutti i continenti.

Un punto di svolta nella lotta alla desertificazione fu rappresentato successivamente dalla Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e Sviluppo che si tenne a Rio de Janeiro nel 1992 (UNCED). In quella sede, si riconobbe che la desertificazione e lo sviluppo sostenibile erano due aspetti intimamente legati. Sulla base delle indicazioni e delle raccomandazioni scaturite dalla Conferenza di Rio, nel dicembre del 1992 fu adottata dalle Nazioni Unite la Risoluzione 47/188, che istituiva il Comitato Intergovernativo di Negoziazione (INCD) per la stesura della Convenzione per la lotta alla desertificazione.

La Convenzione, presentata nella sua forma definitiva nel giugno 1994 a Parigi entrò in vigore nel dicembre del 1996 ed è attualmente stata firmata da 191 Paesi e tuttora costituisce il quadro di riferimento istituzionale per la lotta alla desertificazione per tutti quei Paesi interessati dal fenomeno.



## 1.1 La LDD a scala globale

Nel settore dell'analisi e del monitoraggio dei processi di LDD, molti sono gli studi e le ricerche che hanno contribuito ad accrescere e migliorare la conoscenza dei fenomeni in corso e delle loro dinamiche, sia attraverso progetti di ricerca che con studi curati da molte Agenzie e Organizzazioni internazionali, tra cui si possono citare, la FAO, le Nazioni Unite, l'Unione Europea, la Banca mondiale degli investimenti, la Nasa, etc., (Enne & Zucca 2000, OECD 2004, Geeson 2005, Wascher 2000, European Environment Agency 2003, European Union 2001, AA. VV. 2005).

Per fare fronte a questa emergenza globale la conoscenza diventa quindi un presupposto fondamentale sia per gestire le risorse del territorio che per prevenire e mitigare gli effetti delle attività che portano al degrado dei suoli. Ad esempio, le specifiche problematiche dei processi di desertificazione a livello Globale sono affrontate dalla *United Nations Convention to Combat Desertification* (UNCCD), mentre le tematiche relative alla *Land Degradation* sono sostenute e affrontate nel *United Nations Framework Convention on Combating Climate Change* e la *Convention on Biodiversity*. Nell'ambito dell'Agenda di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, i leader mondiali si sono impegnati a: " *combattere la desertificazione, ripristinare terreni degradati, inclusi terreni colpiti da desertificazione, siccità e inondazioni, e sforzarsi di raggiungere un mondo sostenibile* " entro il 2030. Anche l'Unione Europea è pienamente impegnata a definire e attuare politiche per la salvaguardia dei suoli e per un uso pienamente sostenibile del territorio attraverso lo sviluppo di studi e ricerche nei differenti settori di agricoltura, foreste e cambiamenti climatici, anche a scala mondiale. Per quanto concerne lo sviluppo nel tempo degli studi sulle tematiche della desertificazione e della degradazione del suolo, una delle prime mappe della aree a rischio di desertificazione a livello globale è contenuta in un lavoro pubblicato sulla rivista *Economic Geography* nel 1977. La mappa, riportata in Figura 1, classifica le aree di desertificazione in "lievi", "moderate", "gravi" o "molto gravi" sulla base di una combinazione di informazioni pubblicate e pareri esperti.

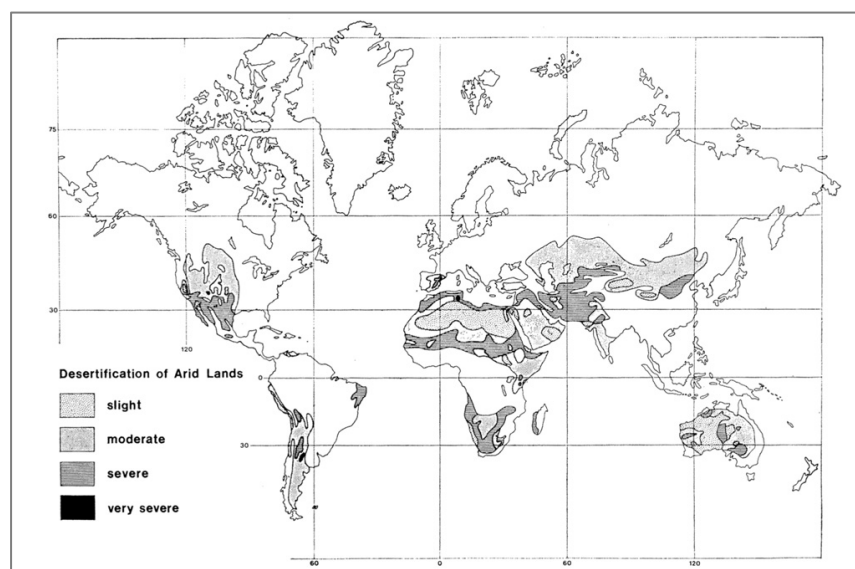


Figura 1. Carta dei livelli della desertificazione nelle regioni aride del mondo (Dregne, 1977).

Nell'ambito di un successivo studio, (progetto GLASOD - *Global Assessment of Human Induced Soil Degradation* 1987-1990) è stata invece sviluppata una mappa mondiale del degrado del suolo indotto dall'uomo, riportata in Figura 2. I dati sono stati raccolti in collaborazione con un gran numero di scienziati in tutto il mondo, utilizzando protocolli uniformi. Lo stato di degrado del suolo è stato mappato all'interno di unità fisiografiche (poligoni) definite, sulla base del giudizio di esperti. Il tipo, l'estensione, il grado, il tasso e le principali cause di degrado sono stati riportati su una mappa globale, in scala 1:10 milioni e documentati in un database. La mappa GLASOD, mostrata di seguito, illustra in dettaglio l'estensione e il grado di degradazione globale del suolo. L'ombreggiatura indica il tipo di degrado: chimico (rosso), vento (giallo), fisico (viola) e acqua (blu), con ombreggiature più scure che mostrano livelli più alti di degrado.

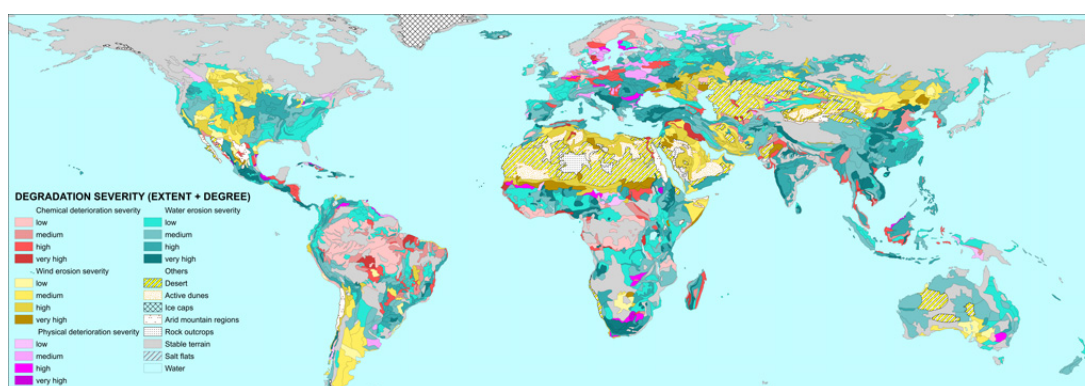


Figura 2. Mappa mondiale dello stato della degradazione del suolo indotta dall'uomo: una nota esplicativa (Oldeman, et al., 1991).

Il metodo GLASOD è stato utilizzato anche per il secondo Atlante sulla Desertificazione , pubblicato nel 1997, ma la mappa ha sollevato qualche critica per una certa mancanza di coerenza e riproducibilità (Sonneveld e Dent 2007). Pertanto, i set di dati successivi (2006-2009), sono stati integrati con dati satellitari (Bai et al., 2008).

L'ultima versione dell'Atlante Mondiale della Desertificazione (2018) considera invece un insieme di quattordici variabili spesso associate al degrado del suolo, come l'aridità, la densità del bestiame, la perdita di alberi e la diminuzione della produttività del suolo. Pertanto, la mappa in Figura 3, non mostra il degrado del suolo stesso, ma la "*convergenza delle prove*" dove queste variabili coincidono. L'ombreggiatura indica il numero di rischi coincidenti. Le aree con il minor numero sono visualizzate in blu, che aumentano poi in verde, giallo, arancione e la maggior parte in rosso (AA.VV., *World Atlas of Desertification*, 2018).

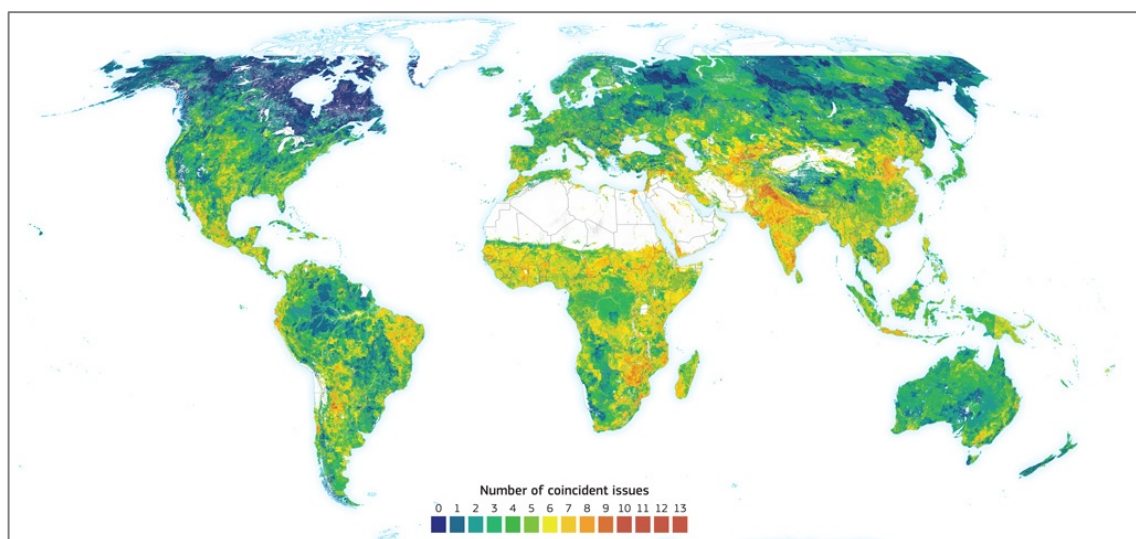


Figura 3. Atlante Mondiale della Desertificazione. L'ombreggiatura indica il numero di rischi coincidenti (AA.VV., *World Atlas of Desertification*, 2018).

I principali risultati riportati nell'Atlante mostrano che la crescita della popolazione e i cambiamenti nei nostri modelli di consumo esercitano una pressione senza precedenti sulle risorse naturali del pianeta: oltre il 75% delle Terre emerse è già degradato e oltre il 90% potrebbe degradarsi entro il 2050.

Al riguardo la FAO sin dal 1989 ha sviluppato numerosi progetti e programmi riguardanti metodi e tecniche per prevenire e monitorare gli effetti della siccità e della desertificazione basati su una gestione sostenibile delle attività economiche e delle risorse. Uno dei progetti ha lo scopo di assistere vari gruppi di agricoltori in cinque comunità rurali della zona umida della savana del Burkina Faso con l'obiettivo di migliorare i loro sistemi di coltura-allevamento attraverso una serie di pratiche di

agricoltura conservativa (tra cui la diversificazione delle colture, l'impiego di un processo innovativo di ricerca agricola) al fine di garantire l'intensificazione della produzione sostenibile e il miglioramento delle condizioni di vita. In Figura 4, un aratro in azione in Burkina Faso, nel programma Azione contro la desertificazione della FAO (<http://www.fao.org/in-action/action-against-desertification/countries/africa/burkina-faso/en/>).



Figura 4. Programma per una agricoltura sostenibile in Burkina Faso.

Tuttavia, il progetto più rilevante della FAO a livello internazionale e riguardante la desertificazione nella sua complessità è il progetto LADA (*Land Degradation Assessment in Drylands*), Figura 5. Il Progetto è stato finanziato dalla FAO e dal *Global Environmental Facility*, attuato dalla FAO e implementato dall'UNEP, con contributi significativi da parte di vari enti. Il progetto si prefigge diversi

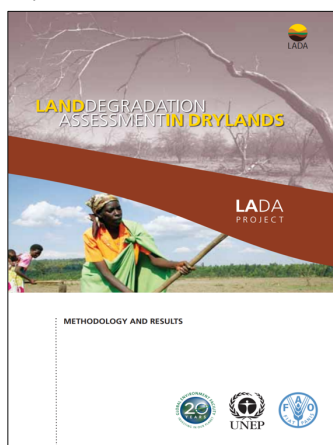


Figura 5. Pubblicazione LADA Project (FAO,2013).

obiettivi, tra i quali lo sviluppo, il test e la revisione di indicatori degli approcci metodologici per una valutazione integrata dei fenomeni. Le attività del progetto sono orientate alla valorizzazione delle conoscenze tradizionali e all'utilizzo di più attuali acquisizioni scientifiche per guidare una pianificazione multisettoriale e integrata nelle *drylands*. Il progetto è stato sviluppato inizialmente per le zone aride, ma i metodi e gli strumenti sono stati poi approfonditi in maniera da essere applicabili ad altri ecosistemi e contesti.

LADA fornisce un sistema di monitoraggio e stima globale interconnesso con un sistema di valutazione e di supporto alle decisioni a livello nazionale e locale che permette la valutazione del degrado e del miglioramento del territorio,

dando spazio agli utilizzatori del territorio al fine di identificare l'ampia applicazione delle pratiche sostenibili di gestione. Uno dei prodotti più interessanti del progetto è stata la definizione di un gruppo di indicatori bio-fisici, socioeconomici e istituzionali efficienti e, al contempo, facili da rilevare. Gli indicatori proposti, basati sull'approccio DPSIR (*Driving Forces-Pressure-State-Impact-Responses*), sono stati classificati secondo diversi livelli: globale, nazionale, locale/bacino, sistema agricolo aziendale. Inoltre, considerazioni particolari sono state elaborate per gli indicatori che hanno collegamenti con i fattori biofisici, socioeconomici, istituzionali (Bot e Snel 2002).

Sempre a livello mondiale, per definire la condizione complessiva dell'ecosistema biofisico sia a livello di status che di processo è stata proposta nel 2010 la mappa delle 'Classi di degrado del suolo', riportata in Figura 6. Le classi biofisiche di degrado del suolo sono identificate dalla combinazione dello stato generale dei servizi ecosistemici biofisici (biomassa, suolo, acqua e biodiversità) e dalla loro sostenibilità.

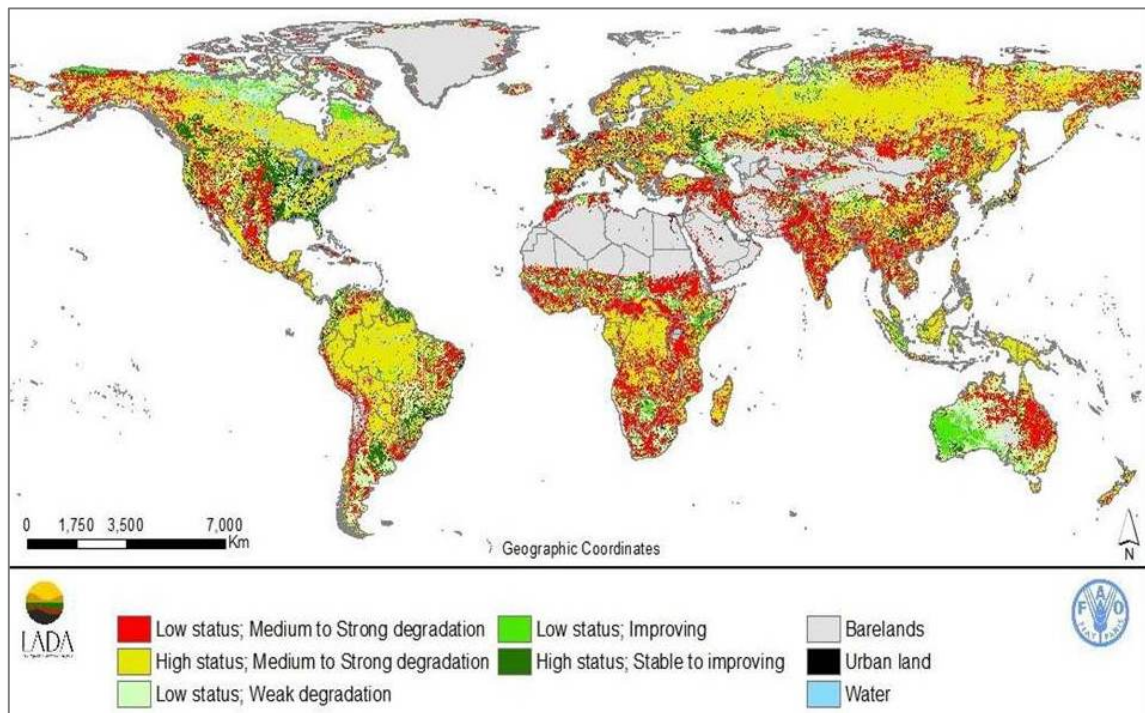


Figura 6. Classi di degrado/miglioramento del territorio che combinano sia l'indice di stato che di processo nella capacità di fornire servizi biofisici dell'ecosistema (Nachtergaele et al., 2010).

Nel corso degli ultimi anni la possibilità di utilizzo di scene acquisite da satelliti ad altissima risoluzione spaziale ha aperto ulteriori scenari di applicazioni multi-scala. In tale prospettiva i dati sulla copertura, sull'uso del suolo e sulla transizione tra le diverse categorie sono alcune delle informazioni più frequentemente richieste per la formulazione delle strategie di gestione e di pianificazione sostenibile



del territorio, per fornire gli elementi informativi a supporto dei processi decisionali a livello comunitario, nazionale e locale e per verificare l'efficacia delle politiche ambientali.

Nel febbraio del 2020 è stato infine pubblicato un aggiornamento del metodo MEDALUS-ESA per la mappatura e analisi delle aree soggette a *Land Degradation and Desertification* (Ferrara et al., 2020).

La mappa a scala mondiale delle aree sensibili alla desertificazione per il 2015 è riportata in Figura 7.

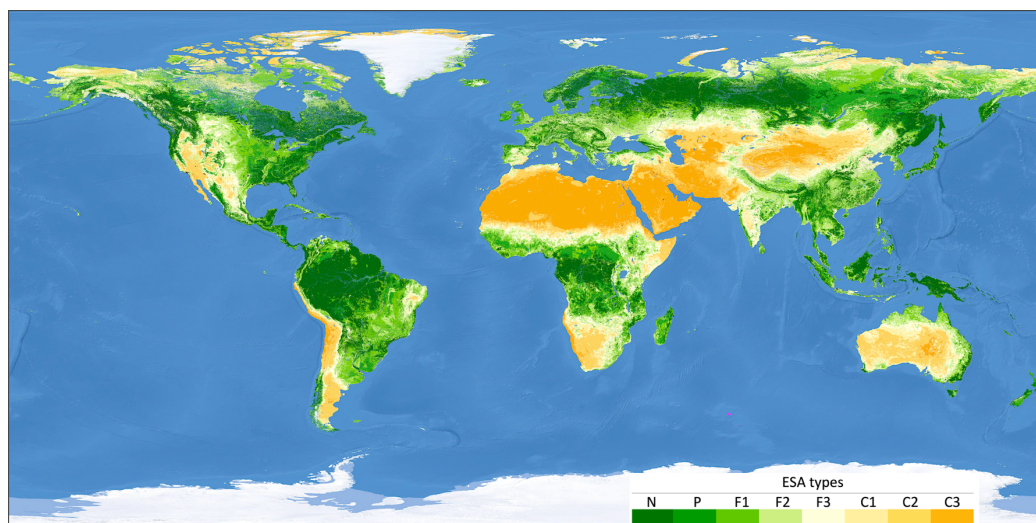


Figura 7. Mappa delle aree sensibili alla desertificazione a scala mondiale per il 2015 Global-ESA 2015 (Ferrara et al., 2020).

## 1.2 La LDD nel Bacino del mediterraneo

Nel bacino del Mediterraneo la forte pressione umana sul territorio legata ai modelli insediativi e produttivi molto sviluppati e intensi ha rappresentato e rappresenta sicuramente il fattore che maggiormente incide sulla rapidità dei processi di desertificazione, anche se con tempi e intensità differenti tra le due sponde del bacino (Ferragina e Quagliarotti 2006). Al riguardo, sin dal 1989, la Comunità Europea aveva avviato un ampio numero di progetti di ricerca internazionali nel campo della desertificazione, della degradazione delle terre e della gestione delle risorse idriche nel Sud Europa. In tali ambiti sono stati elaborati molti indicatori per individuare aree sensibili ai processi di desertificazione e degradazione del suolo (*Land Degradation and Desertification* - LDD). Nel settore dell'analisi e del monitoraggio ambientale e, più in particolare, dei processi di desertificazione e degradazione del suolo, sono state proposte molte liste di possibili indicatori e differenti sistemi di elaborazione, sia attraverso progetti di ricerca che da differenti organizzazioni internazionali (Enne & Zucca 2000, OECD 2004, Geeson 2005, Wascher 2000, European Environment Agency 2003, European Union 2001, AA.VV. 2005). Ad esempio, il progetto europeo DESERTLIKS definisce un indicatore come "un parametro o un valore derivato da parametri, che fornisce informazioni circa un fenomeno. Gli

indicatori sono informazioni quantificate che aiutano a spiegare come le cose stanno cambiando nel tempo e stanno variando nello spazio. Questi di solito semplificano la realtà in maniera sistematica per rendere quantificabile un fenomeno complesso, così che le informazioni possano essere comunicate" (DIS4ME, 2005).

Tra i principali studi e ricerche a livello Europeo sui processi di desertificazione e di degradazione del suolo si possono citare: i progetti Medalus (I, II, III), DESERTLINKS, DISMED, Desertnet (1 e 2), PESERA, RECARE e il progetto LEDDRA.

Il progetto di ricerca MEDALUS (*Mediterranean Desertification And Land Use*) è stato finanziato dalla Unione Europea dal 1991 al 1999. Questo progetto, sviluppatosi in più fasi (I, II, III) ha avuto come primario obiettivo quello di incrementare la comprensione di un vasto numero di problemi fisici ed ambientali e di mettere a disposizione strumenti per la loro risoluzione (Medalus I e II). Inoltre, ha anche contribuito alla messa a punto di una metodologia che prevede l'individuazione di Aree Sensibili dal punto di vista Ambientale (*Environmentally Sensitive Areas - ESAs*) attraverso un approccio multifase basato sia sulla conoscenza generale sia su quella locale dei processi ambientali in atto. Il progetto MEDALUS (III) ha infine focalizzato l'attenzione sulla scelta di indicatori appropriati a scala Europea/Nazionale (RDI) e Regionale (ESAs) verificando la loro capacità applicativa in tre aree target, definite durante l'esecuzione del progetto, localizzate in Grecia (Isola Lesvos), Italia (bacino dell'Agri), e Portogallo (regione d'Alentejo). In Figura 8 è illustrata la carta delle aree sensibili (ESA) al fenomeno della desertificazione dell'Isola di Lesvos (AA.VV. 1999, *Medalus project*).

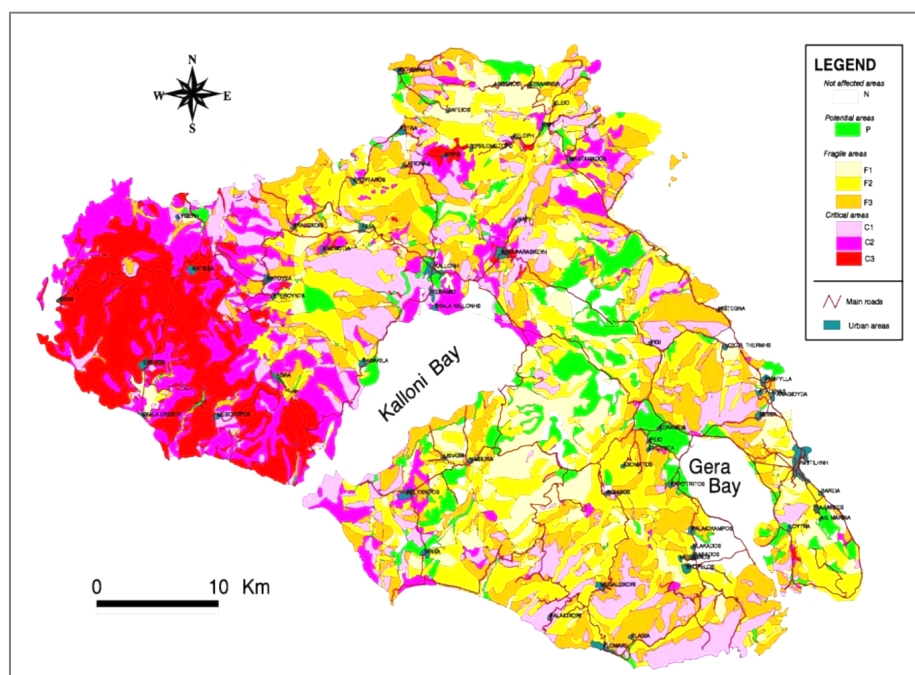


Figura 8. Carta delle aree sensibili (ESA) al fenomeno della desertificazione dell'isola di Lesvos (AA.VV. 1999, *Medalus project*).

Tutte le informazioni sono riferite alla superficie unitaria di 900 m<sup>2</sup>, fornendo un quadro molto dettagliato delle realtà investigate, in considerazione dell'ampiezza del territorio in esame (Ferrara et al., 2004).

La terza fase del progetto MEDALUS III (1996-1999) ha inoltre approfondito alcuni aspetti della ricerca già avviati nel corso delle due fasi precedenti come il consolidamento e l'applicazione dei modelli elaborati su altre aree pilota, lo sviluppo e l'applicazione di metodologie identiche per tutte le aree pilota selezionate e l'approccio a larga scala (bacino del Mediterraneo) che integri gli aspetti biofisici e socioeconomici. Sempre, nell'ambito del progetto Medalus III è stato sviluppato il modello idrologico MEDRUSH, basato sull'integrazione di più strati d'informazione, e la definizione dei meccanismi di trasporto dell'acqua nel terreno, ossia del flusso idrico nel suolo sulla base delle dimensioni e della connettività degli spazi presenti nel suolo (Santini A., 1999).

Il progetto di ricerca DESERTLINKS (*Combating Desertification in Mediterranean Europe: Linking Science with Stakeholders*), finanziato dalla Unione Europea dal 2001 e della durata di tre anni ha avuto come primario obiettivo quello di sviluppare un sistema di indicatori di desertificazione. E' stato programmato per fornire un contributo al lavoro dell'UNCCD ed in particolare per la sub-regione dell'Annesso IV, Portogallo, Spagna, Italia e Grecia. Nell'ambito del progetto è stato messo a punto e sviluppato un sistema di riferimento concettuale, metodologico e applicativo delle conoscenze nel settore della desertificazione e della degradazione dei suoli e dell'ambiente denominato DIS4ME (*Desertification Indicator System for Mediterranean Europe* – Figura 9). In tale ambito è stata compilata una lista degli indicatori candidati utilizzando gli indicatori raccolti nei vari studi effettuati. Alla data di marzo 2004 la lista conteneva 223 indicatori. Di questi, 38 erano già stati utilizzati nei Programmi di Azione Nazionale e 62 erano stati suggeriti dagli *stakeholders* (DIS4ME, 2005).

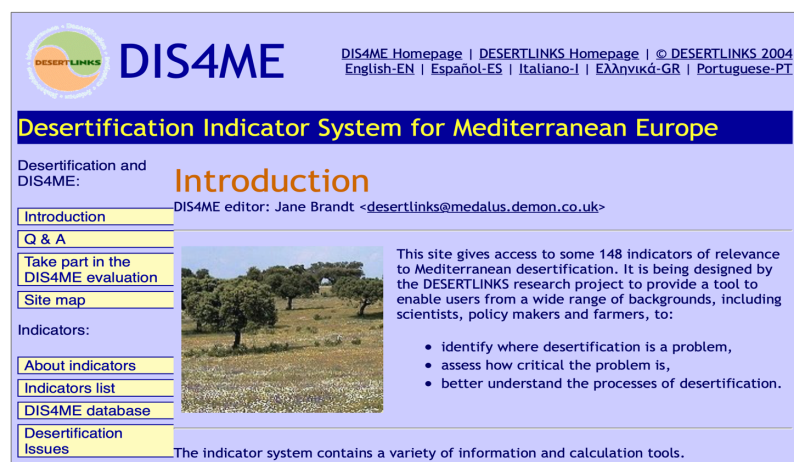


Figura 9. Progetto Desertlinks - *Desertification Indicator System for Mediterranean Europe* (DIS4ME, 2005).

Un altro approccio per definire le aree a rischio di desertificazione è quello proposto dal modello PESERA (*Pan European Soil Erosion Risk Assessment* - Kirkby et al., 2008). Il progetto, finanziato dalla Unione Europea dal 1999 al 2003 ha visto l'elaborazione di un modello basato su dati fisici per valutare l'erosione dei suoli a livello regionale, identificarne le aree a rischio e analizzare i possibili scenari. L'obiettivo ultimo è la costruzione di un network di utilizzatori finali europei che potranno sostenere eventuali sviluppi della ricerca. Il modello PESERA – RDI (Valutazione del rischio erosione del suolo – Indice di degrado regionale) fornisce un indicatore fisico della desertificazione per il Mediterraneo con risoluzione a 1 km, stimando tassi medi a lungo termine di erosione del suolo (Kosmas e Kirby 2004). La carta del Rischio di erosione calcolata con il modello PESERA è riportata in Figura 10.

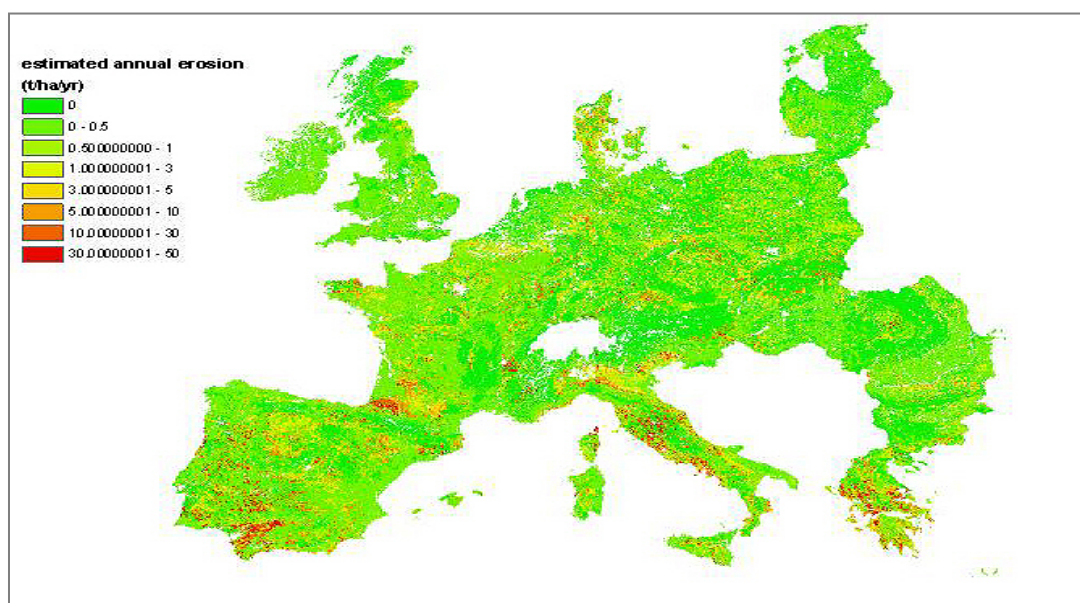


Figura 10. Mappa del rischio erosione stimato per l'Europa con una risoluzione a 1 KM.

Il progetto europeo RECARE (*Preventing and remediating degradation of soils in Europe through Land Care* - [www.recare-project.eu](http://www.recare-project.eu)), finanziato dall'Unione Europea dal 2013 al 2018, ha mirato invece a identificare le misure pratiche per assicurare che i processi degradativi a cui stiamo assistendo in Europa vengano non solo arrestati ma, ove possibile, invertiti. Nell'ambito del progetto, sono stati individuati 17 casi studio con l'obiettivo di monitorare le condizioni in cui versano i suoli Europei e trovare risposte concrete per la loro difesa, utilizzando un approccio innovativo che integra le conoscenze scientifiche con le competenze locali, sviluppando soluzioni pratiche a problemi quali alluvioni e frane, desertificazione ed erosione dei suoli, compattamento, inquinamento, perdita di biodiversità e di sostanza organica, aumento della salinità e impermeabilizzazione dei suoli.

Tra i casi di studio vi è quello della regione Veneto sull'uso della materia organica in agricoltura dal quale si evince come una buona funzionalità del suolo non possa prescindere dalla corretta gestione della sostanza organica.

Parallelamente la desertificazione ha acquisito rilevanza anche in termini politici e, nel 1992, la Conferenza dell'UNCCD di Rio de Janeiro ha affidato ai paesi affetti dal problema della desertificazione, l'elaborazione e l'approvazione di Programmi d'Azione Nazionali (PAN). Al riguardo la Convenzione prevede che tutti i paesi attuino propri piani nazionali coordinati con altri paesi della stessa area geografica costituendo un gruppo regionale e coordinando un piano d'azione secondo linee comuni in un quadro condiviso di strategie per lo sviluppo sostenibile in tutto il bacino del Mediterraneo. Pertanto, il Portogallo, la Spagna, l'Italia e la Grecia, (Annesso IV) hanno risposto agli obiettivi della Convenzione, considerando i problemi specifici di ciascun Paese e contribuendo alla ricerca e alle iniziative pratiche a scala europea. Ogni Paese ha dunque sviluppato un data-base e indicatori in accordo con le proprie strategie di mappatura e monitoraggio, ma molti degli indicatori sono comuni a tutti i Paesi. Il JRC (*Joint Research Centre*) e INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria) hanno realizzato carte delle aree sensibili alla desertificazione nelle aree dei Paesi dell'Annesso IV della UNCCD (Portogallo, Spagna, Italia, Grecia, Turchia) usando alcuni degli indicatori della metodologia ESA, e sviluppandone altri in grado di rispondere meglio alle caratteristiche nazionali e alla disponibilità di dati.

### **1.3 La LDD in Italia**

In Italia, il monitoraggio e lo studio dei fenomeni di siccità e dei processi di desertificazione è attivo da diversi anni coinvolgendo istituzioni pubbliche a vario livello fra cui, in passato, ha giocato un importante ruolo di promozione e coordinamento il Comitato Nazionale per la Lotta alla Siccità e alla Desertificazione (CNLSD). Fra le molteplici attività del CNLSD, si annovera, a partire dal 2004, la predisposizione di specifici Accordi di Programma, stipulati e finanziati dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, per la promozione di azioni integrate di contrasto della siccità, mitigazione dei fenomeni di degrado del territorio e di monitoraggio della desertificazione. In tale ambito, ad esempio, è stato promosso nel 2004 uno studio delle principali cartografie nazionali sul rischio di desertificazione, condotto in stretta collaborazione da APAT e UCEA, con l'obiettivo di redigere linee guida utili alla predisposizione di cartografie, indicatori e sistemi di monitoraggio integrato a valenza nazionale e regionale. Nell'Accordo di Programma 2005, il CRA-CMA, potendo avvalersi anche del contributo e dell'esperienze pregresse del CRA-ABP e dell'APAT, poté predisporre una procedura di valutazione e una base di dati e indicatori al fine di comporre una cartografia sulla vulnerabilità ambientale ai fenomeni di degrado delle terre e ai processi di desertificazione riferita all'intero territorio nazionale.



Il primo tentativo di individuazione delle aree sensibili alla desertificazione a scala nazionale sul territorio italiano è stato realizzato nel 1999 nell'ambito delle attività del Comitato Nazionale per la



Figura 11. Carta a scala nazionale delle aree sensibili alla desertificazione, 1999.

Lotta alla Desertificazione (CNLD) che, al fine di effettuare una valutazione omogenea delle problematiche in esame, ha incaricato un gruppo di lavoro, coordinato dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) del Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali (DSTN) della Presidenza del Consiglio dei Ministri, di redigere una carta a scala nazionale delle aree sensibili alla desertificazione, in scala 1:250.000 allo scopo di identificare le "aree sensibili alla desertificazione" riportata in Figura 11, secondo quanto previsto dal D. Lgs. 152/99. Sulla base dell'analisi effettuata il territorio nazionale fu suddiviso in aree "poco", "mediamente" e "molto sensibili" al fenomeno della desertificazione. A seguito della maggiore sensibilizzazione al problema e di numerose iniziative in campo

europeo, sono stati avviati numerosi studi al fine di individuare dei metodi di analisi e mappatura delle aree vulnerabili al rischio di desertificazione. Tra questi il progetto di ricerca MEDALUS (*Mediterranean Desertification And Land Use* – DGXII, Ambiente), aveva come primario obiettivo quello di incrementare la comprensione di un vasto numero di problemi fisici ed ambientali e di mettere a disposizione strumenti per la loro risoluzione. Tra le aree target del Progetto MEDALUS, oltre all'isola di Lesvos in Grecia e la regione d'Alentejo in Portogallo, c'è anche l'area italiana del bacino dell'Agri in Basilicata. Negli anni successivi, la metodologia messa a punto in tale progetto (metodologia ESA) è stata adottata e applicata molte altre volte nelle varie realtà di studio e ricerca in Italia, assumendo il ruolo di approccio standard uniformemente condiviso, così come risulta dai casi studio in Piemonte, Calabria [Figura 12], Basilicata, Abruzzo [Figura 13], Puglia, Sicilia, Toscana, Sardegna, Emilia Romagna e Sicilia.



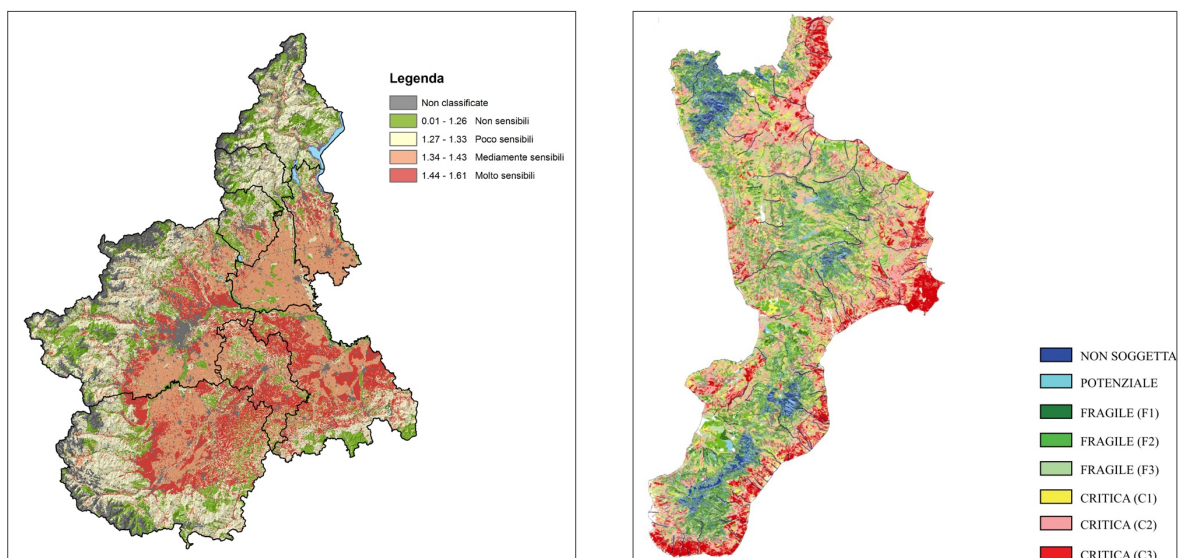


Figura 12. Carte delle aree sensibili alla desertificazione in Piemonte e in Calabria.

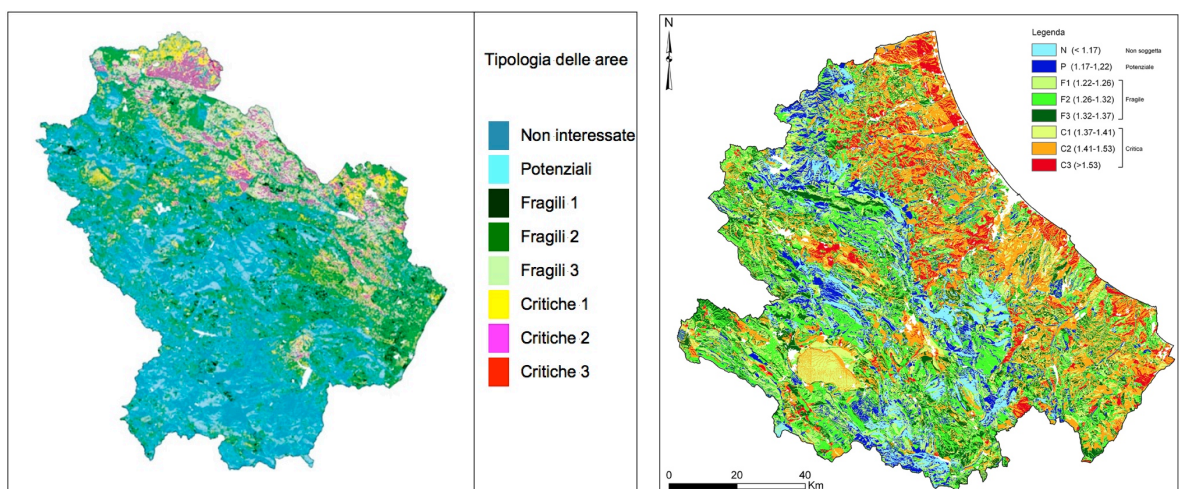


Figura 13. Carta delle aree sensibili alla desertificazione in Basilicata e in Abruzzo.

A livello nazionale nell'ambito dello studio sulla 'Vulnerabilità alla desertificazione in Italia: raccolta, analisi, confronto e verifica delle procedure cartografiche di mappatura e degli indicatori a scala nazionale', coordinato da APAT, CNLSD e CRA, è stata prodotta la carta aggiornata della sensibilità ambientale con il metodo ESA (Mappa degli indici sintetici ESA, Figura 14).

In Italia, come risulta da questo studio, veri e propri processi di desertificazione sono prevalentemente localizzati nelle regioni meridionali e insulari (Basilicata, Puglia, Calabria, Sardegna e Sicilia) dove, oltre allo stress di natura climatica e alla pressione delle attività umane sull'ambiente, spesso si aggiunge una riduzione della produttività biologica e agricola e una progressiva perdita di biodiversità degli ecosistemi naturali. Ma nel contesto più generale dei fenomeni di LD, anche le regioni del centro nord, in particolare la Pianura Padana, Emilia Romagna e Toscana, presentano un peggioramento delle condizioni idrometeorologiche e sono sempre più sensibili alla variabilità delle precipitazioni, e ai periodi di siccità. L'esposizione ai suddetti fattori varia sensibilmente da zona a zona con il risultato di ampliare ulteriormente le differenze esistenti fra diverse regioni. Una maggiore vulnerabilità ai processi di degrado delle terre comporta, di conseguenza, l'estensione degli ambiti marginali, soprattutto nelle aree più aride, con implicazioni socio-economiche altrettanto rilevanti (Salvati e Bajocco 2011). Nel sud Italia, dove si sono concentrate le preoccupazioni della comunità scientifica circa il possibile innesco di fenomeni irreversibili di deterioramento dei suoli, i paesaggi degradati assumono spesso la fisionomia caratteristica dei terreni calanchivi (Figura 15). Anche le regioni del centro-nord manifestano un certo peggioramento delle condizioni ambientali soprattutto dovuto a irregolarità delle precipitazioni e periodi di prolungata siccità (Salvati e Bajocco 2011). Esse sperimentano, inoltre, un peggioramento delle condizioni agro-ambientali dovuto a stress di natura antropica che si manifesta sia attraverso le conseguenze dell'intensificazione agricola e dell'erosione dei suoli, sia con l'accelerazione dei tassi di urbanizzazione e cementificazione dello spazio rurale suburbano cui si devono, inoltre, la modificazione e la frammentazione del paesaggio agrario.

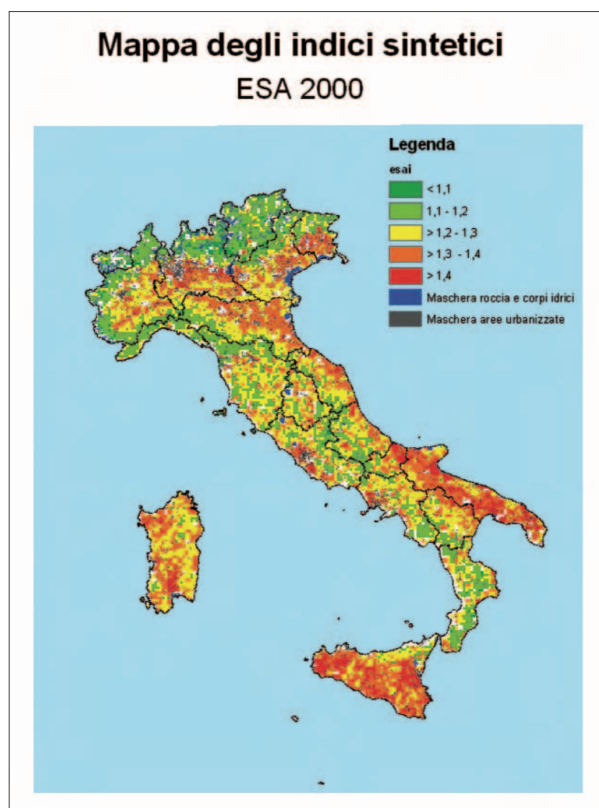


Figura 14. Mappa degli indici sintetici ESA 2000.



Figura 15. Calanchi Montalbano Jonico (MT).

#### 1.4 Il Modello ESA

Come ricordato in precedenza, alla fine degli anni '80 la Comunità Europea avviò un ampio numero di progetti di ricerca internazionali nel campo della desertificazione, della degradazione delle terre e della gestione delle risorse idriche nel Sud Europa. In tale ambito, il progetto MEDALUS focalizzò l'attenzione sulla scelta di indicatori e modelli di analisi a scala Europea/Nazionale (mediante lo sviluppo del *Regional Degradation Index*) e Regionale (con lo sviluppo della metodologia *Environmentally Sensitive Areas*). Sulla base di queste linee di ricerca, fu sviluppata, nell'ambito del progetto Europeo MEDALUS II una metodologia per l'individuazione e l'analisi delle aree a rischio di desertificazione del Mediterraneo, basata su un sistema a indicatori chiave, definita, nelle sue successive applicazioni Metodologia ESA (*Environmentally Sensitive Areas*). La metodologia venne pubblicata, nella sua stesura di base nel "*Manual on key indicators of desertification and mapping Environmentally Sensitive Areas to desertification*" (Kosmas et al., 1999c), in Basso et al., 2000 - Figura 16) e successivamente nel Sistema Esperto sviluppato nell'ambito del progetto DESERTLINKS (Ferrara 2005). Successivamente alla conclusione del progetto, la metodologia ESA ha avuto numerose applicazioni assumendo, negli ultimi 20 anni, il ruolo di approccio standard per l'analisi e la mappatura delle aree sensibili ai processi di LDD (© Global-ESA project, 2019 – Università degli Studi della Basilicata, <http://web.unibas.it/global-esa/> ).



Figura 16. Pubblicazione del metodo ESA.

Nell'approccio ESA, un'area sensibile ai fenomeni di LDD è definita come una specifica entità territoriale in cui i fattori ambientali, socio-economici e di gestione non sono in equilibrio tra loro o non sono sostenibili per quel determinato ambiente (Kosmas *et al.*, 1999b, Basso *et al.*, 2000, Ferrara *et al.*, 2005b). La sensibilità ambientale appresenta dunque il risultato del maggiore o minore equilibrio tra le diverse componenti di un sistema socio-ecologico rispetto a determinati processi. In tale ambito il sistema ESA si configura come uno strumento di analisi dei processi di desertificazione in atto e potenziali finalizzati alla individuazione dei fattori di rischio ambientale. L'obiettivo viene raggiunto attraverso la scelta di un set di base ridotto di indicatori chiave con quattro gruppi di riferimento per le differenti variabili, le cosiddette Qualità riferite al Clima, Suolo, Vegetazione e al Management (gestione del territorio) e l'adozione di un algoritmo di calcolo a due fasi che consente di analizzare nel complesso i processi evolutivi in atto ma anche le relazioni che intercorrono tra i vari fattori.

Nella prima fase, vengono calcolati i valori delle quattro qualità (Qualità del suolo, SQI, Qualità della vegetazione, VQI, Qualità del clima, CQI e Qualità del Management, MQI) come media geometrica



del rispettivo punteggio di ogni strato pertinente. Nella seconda fase, la Sensitività Ambientale (in seguito SA), di ciascuna unità elementare viene stimata come media geometrica dei corrispondenti quattro livelli di qualità (vedi Figura 17).

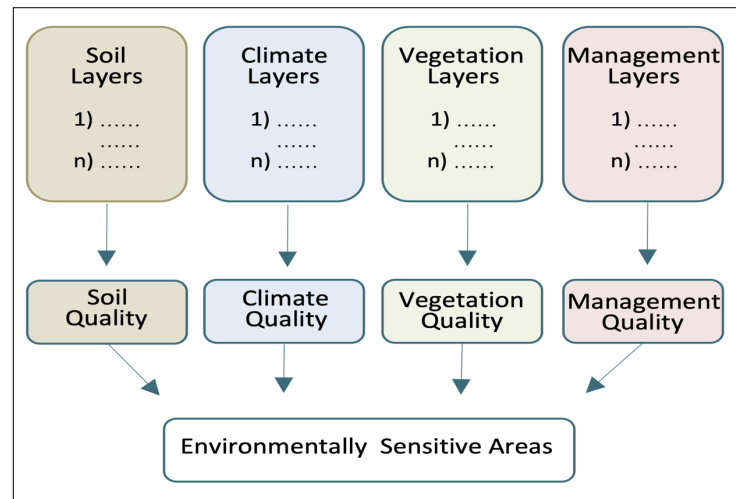


Figura 17. Schema a due fasi per il calcolo dell'indice ESA.

In tale sistema, la SA alla desertificazione è vista come il risultato delle interazioni di fattori elementari relativi a suolo, clima, vegetazione e aspetti socio-economici che, singolarmente e nel loro insieme, sono collegati a fenomeni di degrado ambientale o ad una gestione incongrua o non sostenibile del territorio.

Dal punto di vista metodologico, il sistema ESA si basa su strati tematici o *layers*, rielaborati mediante l'attribuzione di punteggi da 1 (bassa sensitività ambientale) a 2 (alta sensitività ambientale), in grado di esprimere quantitativamente il peso esercitato da ciascun parametro ambientale nel modificare la condizione di equilibrio di un sistema socio-ecologico. I valori più alti si riferiscono a condizioni climatiche, edafiche, vegetazionali o gestionali che esercitano pressioni negative sul territorio e lo predispongono a essere vulnerabile.

Per quanto riguarda invece l'algoritmo di calcolo, la qualità del suolo (SQI), del clima (CQI), della vegetazione (VQI) e dei fattori socioeconomici (MQI), è stimata come media geometrica dei punteggi di strato [1] mentre la vulnerabilità ambientale (ESA) è ricavata mediante la [2]:

$$\text{Qualità}_{xij} = (\text{strato}_{1ij} * \text{strato}_{2ij} * \text{strato}_{3ij} * \dots * \text{strato}_{nij})^{(1/n)} \quad [1]$$

con i e j a rappresentare le righe e le colonne della singola unità dell'immagine raster, n il numero degli strati utilizzati, con punteggi compresi tra 1 e 2 e Qualità<sub>xij</sub> = valori calcolati per le quattro *quality*.

$$ESA_{ij} = (SQI_{ij} * VQI_{ij} * CQI_{ij} * MQI_{ij})^{1/4} \quad [2]$$

con i e j a rappresentare le righe e le colonne della singola unità dell'immagine raster.

Va precisato inoltre che l'indice ESA deve essere considerato più uno strumento per l'analisi di sistemi complessi (ad es. come base per ulteriori indagini sull'estensione, la natura e le caratteristiche della Sensibilità Ambientale alla desertificazione di un'area) che un semplice risultato finale (Ferrara 2005, Bajocco *et al.*, 2011; Recanatesi *et al.*, 2016).

La metodologia ESA è stata ampiamente validata e applicata a livello mondiale, dimostrando la sua elevata efficienza nelle stime e la facilità di applicabilità nella scelta degli indicatori utilizzati e la capacità di integrare dati provenienti da fonti molto diverse, diventando il metodo di riferimento per la mappatura delle aree a rischio di desertificazione (Imeson and Cammeraat 2002; Manuchehr and Mahbobeh 2007; Fuzuni, 2008; Lavado Contador *et al.*, 2009; Bouhata and Kalla 2014; De Pina Tavares *et al.*, 2015; Jafari and Bakhshandehmehr 2016; Global-ESA project, 2019 - <http://web.unibas.it/global-esa/> ).

## 2. La velocità dei cambiamenti spazio-temporali nei processi di LDD (*fast and slow drivers of change*)

---

Le velocità che caratterizzano le variazioni dei processi nei Sistemi Socio-Ecologici a differenti scale spaziali e temporali sono spesso in contrasto con le modalità e le tempestività con cui dovrebbero essere gestite le componenti ambientali, sociali ed economiche ad essi collegate (Ferrara *et al.*, 2015). Queste differenti modalità di risposta in genere dipendono dalla diversificata sensibilità di tali sistemi alle variazioni delle loro singole componenti, a volte molto significativa. In particolare, fenomeni come i cambiamenti climatici, l'uso delle risorse naturali, le dinamiche delle popolazioni e dei conseguenti impatti ambientali, richiedono non solo risposte rapide ma anche l'adozione di efficienti politiche nell'implementazione di modelli di gestione sostenibile del territorio, soprattutto, in aree sensibili ai processi di desertificazione e degrado dei suoli. Le componenti alla base di un sistema socio-ecologico giocano infatti un ruolo fondamentale nel plasmare i percorsi evolutivi che si instaurano nei processi di LDD e a influenzare i cambiamenti su scala spaziale e temporale (Costanza *et al.*, 1997; Chiesura e De Groot 2003; Deutsch *et al.*, 2003; Robinsone Lebron 2010; Roseta-Palma *et al.*, 2010; Imeson 2012). Un Sistema Socio-Ecologico può essere definito come un sistema complesso e integrato i cui componenti economico, sociale e ambientale interagiscono su scale spaziali (ma all'interno di uno spazio geograficamente delimitato), in un periodo definito di tempo, fornendo benefici per l'ecosistema ed essendo a loro volta, modificati dalle azioni umane (Berkes and Folke 1998; Berkes *et al.*, 2003). I cambiamenti in un SES sono inoltre fortemente proporzionati alle scale spaziali e temporali e sono guidati da una serie di processi interconnessi che operano a velocità diverse, che interagiscono per produrre impatti cumulativi e talvolta imprevisti (Gunderson e Holling, 2002; McAllister *et al.*, 2006; Leuteritz e Ekbja 2008; Garmestani *et al.*, 2009).

La conservazione dei servizi degli ecosistemi e il mantenimento delle funzioni critiche (Onaindia *et al.*, 2004; MEA 2005; Chauhan *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; Tynsong e Tiwari 2011), sono dunque essenziali per consentire a un SES di continuare a funzionare nel futuro.

Da questo deriva l'importanza di predisporre efficienti politiche di gestione territoriale basate sullo studio delle connessioni spaziali e temporali che si verificano nei sistemi territoriali a piccola scala analizzate dal punto di vista della velocità del cambiamento.



## 2.1. Ambito di riferimento concettuale

Un Sistema Socio-Ecologico (come sistema univoco e complesso in determinato spazio e tempo) può essere caratterizzato dalle sue variabili di stato e dalle relazioni che tra esse intercorrono in relazione a particolari contesti spaziali e temporali. In termini dinamici le relazioni tra variabili di un sistema rappresentano solo uno degli aspetti centrali dei meccanismi evolutivi in quanto un tale sistema cambia a seguito delle variazioni sia delle relazioni tra le variabili interne sia per gli effetti di *drivers* esterni. Tali fattori non sono sempre considerati parte del sistema e non sono influenzati da ciò che accade all'interno del sistema stesso. Inoltre, molti *drivers* provengono solitamente da scale più elevate e uno dei motivi di incertezza nelle analisi dei Sistemi Socio-Ecologici dipende proprio dalle scale di analisi allorquando, per alcuni, includono variabili che sono considerate esterne per gli altri. In tale ambito le analisi temporali sull'insieme delle componenti socio-ecologiche di un sistema territoriale rappresentano uno strumento efficace e necessario per identificare con maggiore certezza le variabili, le forze in gioco e le relazioni che ad esse sottendono (Diez e McIntosh 2011; Reynolds et al., 2003; Salvati e Bajocco 2011) inclusa l'influenza dell'uomo nella gestione del territorio e dell'ambiente (Karamesouti et al., 2015; Salvati e Bajocco 2011).

I fattori critici che innescano le dinamiche nei sistemi socio-ecologici possono essere identificati attraverso un numero limitato di variabili *fast and slow* dove alcune tendono a essere più sensibili ai disturbi dati da eventi a breve termine e sono di conseguenza meno utili nella caratterizzazione dello stato del sistema a lungo termine (Adger et al., 2005; Abidi-Habib e Lawrence 2007). Stafford-Smith e Reynolds (2002), ad esempio, identificarono una serie ristretta di variabili critiche, concentrandosi sulla comprensione delle cause piuttosto che sugli effetti del cambiamento in un SES.

All'interno del *Dahlem Desertification Paradigm* (DDP), infatti, Stafford-Smith e Reynolds (2002: 409) sostengono che è importante *"identificare e gestire un piccolo insieme di variabili 'slow' che guidano le variabili 'fast' per sviluppare politiche efficienti a qualsiasi scala (spaziale e temporale) e per ogni SES considerato"*. Naturalmente, i termini *fast and slow* sono relativi e dipendono dalla scala a cui un sistema si riferisce.

Considerando un intervallo temporale di 20 anni di utilizzo di un particolare approccio gestionale, questi possono sembrare una dimostrazione più che adeguata rispetto ai tempi antropologici, tuttavia potrebbe essere insufficiente a causare cambiamenti in molte variabili ecologiche *slow*. Ad esempio, l'invasione di arbusti in un territorio a vocazione agricola può influenzare lentamente la produzione di foraggio, ma su scala regionale può essere una variabile veloce in termini di bilancio totale del carbonio. Un'altra caratteristica chiave del modello proposto è l'individuazione di soglie critiche oltre le quali il sistema si sposta in un nuovo stato o condizione. Quindi, i sistemi socio-ecologici non sono statici ma cambiano costantemente in risposta a fattori dinamici, sia esterni (ad es. clima) e interni (ad

es. copertura vegetale in risposta allo stato fisico del terreno), con un conseguente significativo dinamismo.

L'analisi delle relazioni causa-effetto che si instaurano nei processi di LDD nel tempo e nello spazio, è fondamentale per meglio comprendere le soglie critiche di ciascuna variabile oltre le quali il sistema non può più mantenere il suo equilibrio dinamico ed evidenziare le dinamiche globali, identificando i fattori che maggiormente contribuiscono ai più rilevanti cambiamenti che si verificano nei processi di LDD a scala globale. Questo perché non esiste un concetto generale di 'degrado del territorio' che sia uniformemente applicabile a tutte le situazioni: sarà sempre necessario definire quale fattore è la causa, fornendo così indicazioni su come orientare le azioni di gestione.

## **2.2. Ambito di riferimento specifico**

In questo studio vengono affrontate le tematiche relative alla valutazione dell'impatto che i cambiamenti di stato di variabili definite *fast and slow*, producono sui sistemi territoriali a scala globale mediante metodologie di analisi multivariate e multitemporali al fine di individuare e monitorare i fattori che maggiormente incidono sulle variazioni complessive di tali sistemi territoriali. Una migliore valutazione dei fattori e delle dinamiche che sottendono ai processi di LDD a scala globale, è infatti alla base di una gestione sostenibile di qualsiasi territorio, anche in considerazione della complessità delle relazioni che caratterizzano le dinamiche negli ecosistemi.

Le azioni di monitoraggio e analisi del rischio sono inoltre necessarie nella gestione di funzioni critiche come la protezione dell'erosione dei suoli, la conservazione dell'ambiente, la gestione sostenibile delle risorse naturali, etc., soprattutto in aree soggette al degrado dei suoli e alla desertificazione (Mancino *et al.*, 2009, 2014).

La caratteristica specifica dell'approccio proposto è quella di identificare le cosiddette variabili *fast and slow*, non in base alla velocità dei loro cambiamenti ma alla velocità dei cambiamenti indotti nei sistemi territoriali al fine di identificare quelle che maggiormente influiscono in maniera permanente sullo stato dei sistemi. In questo ambito e in relazione alla crescente disponibilità di informazioni territoriali sempre più aggiornate e di dettaglio a scala mondiale le analisi verranno sviluppate all'interno della metodologia ESA, illustrata nel capitolo 1.4. Tale approccio potrà essere impiegato come strumento predittivo per la definizione della migliore combinazione di risposte al rischio di LDD in termini di politiche e gestione degli aspetti socio-ecologici territoriali nell'ambito di futuri scenari. Le potenzialità del metodo ESA vanno infatti ben oltre la semplice mappatura e analisi delle aree sensibili in quanto la sua struttura concettuale lo rende implicitamente funzionale ad analisi spazio-temporali in grado di valutare e analizzare i cambiamenti indotti da processi interconnessi che operano in scale spaziali e velocità diverse, e che, interagendo, possono produrre impatti cumulativi e talvolta imprevisti. La LDD infatti è soprattutto un processo dinamico, distribuito nel tempo e nello spazio, in

grado di influire negativamente sull'equilibrio degli ecosistemi, causando alterazioni nei cicli vitali, e capace di provocare una diminuzione della produttività delle risorse naturali.

Per quanto riguarda poi i fattori (variabili) utilizzati nel presente studio la distinzione che normalmente viene fatta tra fattori endogeni (variabili interne al sistema) e fattori esogeni (*drivers*) perde di significato in quanto le variabili considerate partecipano, alla definizione del sistema complessivo, tutte a uno stesso livello in quanto i fenomeni di LDD che ad esse sottendono sono il risultato di processi complessi sui quali agiscono variabili che per loro natura hanno differenti gradi di 'controllabilità'. Ciò è determinato sia dalle modalità con cui tali variabili sono utilizzate (cioè all'interno di un sistema a indicatori chiave), sia per la scala a livello globale utilizzata. Nel sistema infatti coesistono variabili ovviamente meno influenzate da ciò che accade all'interno di un sistema territoriale (ad es. quelle climatiche) e variabili maggiormente correlate alle dinamiche interne (ad es. la *Land Use Intensity*). La questione di fondo però non è tanto la posizione delle variabili rispetto al sistema (interna o esterna) ma piuttosto la capacità che i loro cambiamenti hanno nell'influenzare lo stato del sistema stesso.

In questo ambito il presente studio focalizza la sua attenzione soprattutto sulla capacità delle componenti di alterare i livelli di equilibrio del sistema, che, solitamente, è determinata dal superamento di livelli soglia oltre i quali i *feedback* del sistema risultano inefficaci, piuttosto che da singole o cicliche variazioni dei componenti.

### 3. Materiali e metodi

---

#### 3.1. L'area di studio

L'area di studio interessa l'intera superficie globale come derivata dalla mappa di copertura del suolo utilizzata nelle analisi (ESA CCI - *Land Cover map* v2.0.7) e descritta in Tabella 1. I corpi idrici, le aree urbane, la neve permanente, i ghiacciai e la regione dell'Antartide sono stati esclusi dall'analisi, così come pochissime aree sparse nei cinque continenti con una copertura insufficiente di dati. Da un punto di vista temporale lo studio copre un intervallo di 20 anni, dal 1998 al 2017, organizzato in quattro periodi di riferimento (2000, 2005, 2010, 2015), all'interno dei quali sono stati raccolti ed elaborati i dati informativi di base alla massima risoluzione spaziale e temporale disponibile (periodica, annuale e a cadenza mensile). Le risoluzioni spaziali e temporali dei dati sono riportate nella Tabella 1.

#### 3.2. Il metodo ESA e i nuovi algoritmi utilizzati per il calcolo delle mappe

Il metodo ESA (*Environmentally Sensitive Areas*), utilizzato come riferimento principale nella presente tesi di dottorato, si riconduce alla più ampia categoria dei Sistemi a Indicatori Chiave (*Key Indicator Based Systems*). In sintesi, un sistema a indicatori chiave si caratterizza da un *subset* di fattori (o elementi) che statisticamente sono correlati a un determinato fenomeno o insieme di provenienza. L'implementazione di questo ridotto numero di fattori permette di analizzare e definire, nella loro completezza, sistemi molto complessi e diversificati al fine di individuare eventuali criticità o peculiarità in essi presenti. L'uso di tali strumenti si è rivelata molto efficace nell'analisi di fenomeni territoriali, quali i processi di LDD, che, per loro natura, non sono identificabili in maniera univoca nello spazio e nel tempo, ma che piuttosto si caratterizzano dalla presenza di molteplici e differenti fattori di criticità. Come indicato in precedenza, il principale riferimento per la definizione dell'approccio metodologico ESA è il '*Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification*' (Kosmas *et al.*, 1999d) in cui la metodologia ESA era stata originariamente proposta per il Bacino del Mediterraneo e successivamente testata e applicata in molte altre regioni del mondo, come indicato nel capitolo precedente.

Nella presente tesi, in accordo con quanto riportato in Ferrara *et al.*, 2020, viene utilizzato un differente algoritmo di calcolo per superare il problema dei dati mancanti negli strati disponibili a scala globale. Nello specifico, l'algoritmo utilizzato calcola la media geometrica di ciascun indicatore di qualità sugli strati con le informazioni disponibili per qualsiasi unità di analisi elementare (*pixel*) [3]. In altre parole, quando mancano informazioni in una determinata unità elementare di un singolo strato, il punteggio

di qualità, per quel *pixel*, viene calcolato utilizzando i punteggi degli strati rimanenti (al riguardo si confronti l'equazione [1]).

$$Quality\_x_{ij} = (layer\_1_{ij} * layer\_2_{ij} * layer\_3_{ij} * ..... * layer\_n_{ij})^{(1/n_{ij})} \quad [3]$$

dove  $i, j$  = righe e colonne di un singolo pixel elementare di ogni strato;  $n$  = numero di livelli attivi per ogni unità elementare;  $x$  = le quattro qualità che si riferiscono a suolo, clima, vegetazione e *management*.

L'ESA finale è stato invece calcolato secondo la procedura originale (Kosmas *et al.*, 1999c) come media geometrica delle qualità ottenute in ciascun *pixel* elementare [4]

$$ESA_{ij} = (SQI_{ij} * VQI_{ij} * CQI_{ij} * MQI_{ij})^{1/4} \quad [4]$$

dove  $i, j$  = righe e colonne di un singolo pixel elementare di ogni qualità.

Nel caso di informazioni assenti su un *pixel* per tutti i livelli di *input* di un determinato indicatore di qualità, l'indice ESA corrispondente non viene calcolato e quel *pixel* è classificato come "NoData". Ulteriori dettagli nella predisposizione degli strati di base sono in Ferrara *et al.*, 2020.

### 3.3. Le banche dati utilizzate

Come riportato nel paragrafo 1.4, alla base della metodologia ESA vi è una definizione di Sensitività alla *LDD* legata a quattro fattori principali (di seguito definiti come 'Qualità'): suolo, clima, vegetazione e *management*. Per ogni Qualità sono successivamente identificate le variabili chiave, ritenute più significative per rappresentare detta Sensitività. Nella presente tesi è stato utilizzato lo schema di variabili adottato da Ferrara *et al.*, 2020 per analisi a livello mondiale, a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Nella selezione delle variabili lo schema concettuale adottato ha utilizzato i seguenti criteri:

- coerenza con l'approccio ESA originale (Kosmas *et al.*, 1999c);
- disponibilità e regolarità dei dati delle serie temporali per la stima di mappe e indicatori multi-temporali;
- qualità e affidabilità delle fonti di dati per gli aggiornamenti futuri e per l'analisi di serie temporali.

Sulla base di questi criteri i 14 strati selezionati in questo studio sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Variabili utilizzate (<sup>1</sup>)

Qualità	Strati	Database di riferimento	Risoluzione
Soil	Parent material	Lithological map of the World (LiMW_GIS 2015.gdb.zip). Based on Global lithology map database v1.1 - 2012	Vector
	Slope grade	Derived from ESRI grids Altitude 02.2000	30 arc-s
	Soil texture	Harmonized World Soil Database HWSD version 1.21 - 07.03.2012	30 arc-s
		DSMW - Digital Soil Map of The World. Version 3.6 - 02.28.2007	Vector
	Drainage Rock fragments Soil groups	Harmonized World Soil Database HWSD version 1.21 - 07.03.2012	30 arc-s
Climate	Rainfall	CRU TS 4.01 Precipitation (means 1997-02; 2002-07; 2008-12; 2013-17)	0.5 deg
	Aridity Index, $AI_U$	Calculated from CRU TS 4.01 Precipitation and CRU TS 4.01 Potential Evapotranspiration using Penman-Monteith (means 1997-02; 2002-07; 2008-12; 2013-17)	0.5 deg
Vegetation	Fire risk Drought resistance Erosion protection	ESA CCI - Land Cover map v2.0.7 – 2000; 2005; 2010; 2015	300 m
	Plant cover	Calculated from USGS LCI. MODIS MOD13A3.006 based. $NDVI_{MVC}$ Maximum Value Composite (means 1997-02; 2002-07; 2008-12; 2013-17)	30 arc-s
Management	Land use intensity	ESA CCI - Land Cover map v2.0.7 - 2000; 2005; 2010; 2015	300 m
	Population density	Gridded Population of the World (GPW), UN-Adjusted Population Density, v4 – yrs 2000; 2005; 2010; 2015	30 arc-s
Administrative boundaries (for analyses at country level)		Global Administrative Areas (GADM) ( <i>gadm36.gbk.zip</i> ) 2018	

<sup>1</sup>) Modificato da Ferrara et. al 2020

Tutti gli strati sono stati scaricati da siti Web ufficiali, convertiti in formato *raster*, ricampionati a 1 km di risoluzione spaziale, se necessario, e georiferiti utilizzando il sistema di proiezione geografica EPSG 4326 (WGS84).

Per rendere congruenti i diversi set di dati relativamente alla differente copertura spaziale degli strati utilizzati, i possibili valori mancanti lungo i confini di costa, o in altre aree, sono stati sostituiti dalla media dei valori delle unità più vicine utilizzando gli algoritmi standard presenti nei *software* utilizzati (*nearest neighbour algorithm*). La stessa procedura è stata adottata in tutte le mappe intermedie, per corpi idrici, le aree urbane, la neve permanente e il ghiaccio (successivamente reintrodotti sulle mappe finali). Le mappe CCI ESA 2000; 2005; 2010; 2015 - *Land Cover*, ricampionate a 1 km di risoluzione spaziale, sono state utilizzate come mappe di riferimento finale per i quattro periodi considerati. Tutte

le mappe intermedie e finali sono state prodotte ed elaborate alla risoluzione di 1 km. In Tabella 2 è riportato il dettaglio delle operazioni.

Tabella 2. Operazioni preliminari sui dati.

Strato	Operazioni
<b>Suolo</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roccia Madre</li> </ul>	scaricamento dati da website > trasformazione da shape a raster > ricampionamento a 1km > expand su acque urbano ghiacciai > riclassificazione punteggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tessitura</li> <li>• Drenaggio</li> <li>• Pietrosità</li> <li>• Tipo di Suolo</li> </ul>	scaricamento dati da website > estrazione singoli strati > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendenza</li> </ul>	scaricamento dati da website > calcolo pendenze >ricampionamento a 1km > riclassificazione punteggi
<b>Clima</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitazioni</li> </ul>	scaricamento dati da website > estrazione dati delle precipitazioni mensili dal 1998 al 2016 > calcolo precipitazioni annuali e delle medie quinquennali 2000, 2005, 2010, 2015 > ricampionamento a 1km > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indice di aridità</li> </ul>	scaricamento dati da website > estrazione dati di evapotraspirazione potenziale (PET) giornalieri dal 1998 al 2016 > calcolo Aridity Index (UNEP) per ogni anno e dei quinquenni 2000, 2005, 2010, 2015 > ricampionamento a 1 km > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<b>Vegetazione</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rischio d'incendio</li> <li>• Protezione dall'erosione</li> <li>• Resistenza alla siccità</li> </ul>	scaricamento dati da website > ricampionamento a 1km > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Copertura vegetale</li> </ul>	scaricamento dati da website > estrazione dati in tiles e unione in singole immagini globali in formato .tif > calcolo MCV Maximum-Value Composite annuale dal 1998 al 2016 e delle medie quinquennali 2000, 2005, 2010, 2015 > ricampionamento a 1km > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<b>Management</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensità di uso del suolo</li> </ul>	scaricamento dati da website > ricampionamento a 1km > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressione antropica</li> </ul>	scaricamento dati da website > calcolo delle medie quinquennali 2000, 2005, 2010, 2015 > expand su acque urbano ghiacciai> riclassificazione punteggi



### 3.4. Riferimenti concettuali sugli strati utilizzati

Nella Tabella 3 sono riportati i principali riferimenti concettuali per scelta degli strati.

Tabella 3. Principali riferimenti nella scelta degli strati.

Strato	Caratteristiche di riferimento
<b>Qualità del Suolo (SQI):</b> Il suolo riveste un ruolo fondamentale nei processi di LDD degli ecosistemi delle aree semi-aride e sub-umide, soprattutto nei casi in cui la sua qualità complessiva, necessaria per il sostentamento delle differenti tipi di vegetazione, sia molto bassa. Gli aspetti considerati nel definire la qualità di un suolo sono soprattutto legati alla capacità di resistere alle modifiche delle caratteristiche e delle proprietà indotte dall'ambiente o dall'uomo, sono collegati alla capacità di ritenzione idrica o alla resistenza all'erosione, etc.	
Roccia madre <i>Parent Material</i>	Molte caratteristiche dei suoli dipendono dalle proprietà chimiche e fisiche della roccia madre. Suoli originatisi su differenti substrati reagiscono in maniera differente all'erosione e possono portare a gradi differenti di desertificazione. Suoli derivati da rocce calcaree cristalline sono generalmente poco profondi, facilmente erodibili e non consentono un rapido ripristino della vegetazione. Al contrario, i suoli formati sui conglomerati e le rocce effusive basiche, nonostante la loro bassa produttività negli anni più piovosi, possono mantenere un buono stato idrico anche durante gli anni siccitosi, e conseguentemente una buona copertura vegetale del terreno e una elevata produzione di biomassa.
Tessitura <i>Texture</i>	La conoscenza delle caratteristiche tessiturali e della struttura dei suoli è di fondamentale importanza per definire alcune caratteristiche degli stessi, in particolare la capacità di ritenzione idrica e il rischio di erosione, due fattori chiave nei processi di desertificazione.
Drenaggio <i>Drainage</i>	Dal punto di vista dei processi di LDD, il drenaggio ha importanza in relazione alla possibile salinizzazione dei terreni. Il trasporto e la concentrazione dei Sali nel profilo del suolo riflettono le condizioni prevalenti di bilancio idrico e l'altezza dell'acqua di falda. In tal senso, le condizioni di evapotraspirazione, precipitazione e le caratteristiche del profilo del suolo sono importanti nel determinare la velocità con cui l'acqua drena verso gli strati profondi e per la distribuzione dei Sali nel terreno.
Pendenza <i>Slope</i>	La pendenza e le altre caratteristiche topografiche sono molto importanti nel determinare il livello di erosione di un suolo, che è considerato grave quando l'angolo di pendenza raggiunge valori pari o maggiori rispetto ad una soglia critica e successivamente cresce in modo esponenziale. In superfici acclivi, il rischio di erosione dipende inoltre dalla frequenza delle precipitazioni intense. Nei terreni agrari a elevata pendenza sono maggiori i rischi di erosione dovuti a lavorazioni poco razionali.
Pietrosità <i>Rock fragments</i>	La pietrosità ha un variabile effetto sul deflusso, sull'erosione del suolo, sull'umidità del suolo e la produzione di biomassa. La presenza di ciottoli può essere molto preziosa, in particolare in anni siccitosi, in quanto consente la conservazione di un'apprezzabile quantità di acqua immagazzinata in periodi precedenti o assorbita durante la notte, proteggendo così le aree di argine dalla desertificazione (Kosmas et al., 1998c).
Tipo di suolo <i>Soil groups</i>	I Tipi di suolo definiscono insieme di terreni caratterizzati da proprietà chimiche, fisiche e biologiche simili. Riassumono e raggruppano quindi differenti combinazioni di proprietà in gruppi con specifiche e definite qualità e potenzialità.

<b>Qualità del Clima (CQI):</b> Il clima assume un ruolo di fondamentale importanza nei processi di LDD, essendo riconosciuta la sua valenza come fattore limitante per lo sviluppo della vita vegetale e animale negli ecosistemi naturali. In particolare, le precipitazioni e gli indici di aridità sintetizzano e rappresentano queste limitazioni.	
Precipitazioni <i>Rainfall</i>	La disponibilità delle risorse idriche viene considerata attraverso l'analisi del valore annuale del cumulo medio climatico delle precipitazioni (su 5 anni). Questo dato è importante sia in funzione della disponibilità idrica media dei territori oggetto di studio, sia del rischio erosivo dovuto alle precipitazioni.  La riduzione delle precipitazioni, combinata con alti tassi di evapotraspirazione, riduce drasticamente il contenuto idrico del suolo disponibile per la crescita delle piante. La ridotta produzione di biomassa influenza direttamente il contenuto di sostanza organica del suolo e il grado di aggregazione e di stabilità degli orizzonti superficiali contro l'erosione.

Indice di aridità <i>Aridity index</i>	Il calcolo dell'indice di aridità è direttamente collegato con la stima delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione. Condizioni di scarse precipitazioni unite ad elevati tassi di evapotraspirazione portano ad una notevole riduzione del contenuto di umidità del terreno e di acqua disponibile per la crescita e lo sviluppo della vegetazione.
---	---

<b>Qualità della Vegetazione (VQI):</b> La copertura vegetale svolge un ruolo di fondamentale importanza nei processi di LDD in relazione alle sue caratteristiche di naturalità, al grado di copertura del suolo, alla resistenza ai periodi di siccità alla protezione dalla erosione e alla sua maggiore o minore resistenza agli incendi.	
Rischio d'incendio <i>Fire risk</i>	Il fuoco rappresenta una delle cause principali di degrado del suolo con conseguenze spesso drammatiche per l'erosione dei suoli e la biodiversità. Le specie rispondono al fuoco in modo differente a seconda dell'intensità dell'incendio, della stagione di crescita e dello stadio di maturazione delle piante. Nel presente studio il rischio di incendio è legato alle caratteristiche intrinseche della vegetazione.
Protezione dall'erosione <i>Erosion protection</i>	La vegetazione, il tipo di suolo, insieme alle precipitazioni, sono i fattori che regolano l'intensità del ruscellamento superficiale e dell'erosione. In tale ambito, la maggiore o minore naturalità e la tipologia della vegetazione, le tipologie colturali delle colture agrarie o delle formazioni forestali etc. sono fattori che direttamente incidono sui livelli di protezione dalla erosione. Nel presente studio la protezione dall'erosione è legata alle caratteristiche intrinseche della vegetazione.
Resistenza alla siccità <i>Drought resistance</i>	Gli ecosistemi hanno sviluppato nel corso del tempo una elevata resistenza alla siccità grazie a numerosi adattamenti di natura anatomica ed ecofisiologica delle specie. Molte di esse sono in grado di resistere a condizioni di deficit idrico severe e prolungate nel tempo, per cui le risposte fisiologiche della vegetazione a una graduale riduzione delle precipitazioni possono essere messe in evidenza solo dopo un numero critico di anni siccitosi. Nel presente studio dei processi di LDD il rischio di incendio è legato alle caratteristiche intrinseche della vegetazione
Copertura vegetale <i>Plant cover</i>	La copertura vegetale rappresenta il principale fattore di protezione e conservazione dei suoli. Molti studi (Francis e Thornes, 1990) hanno dimostrato come il ruscellamento e la perdita di suolo diminuiscono proporzionalmente all'aumentare della percentuale di copertura del suolo da parte della vegetazione.

<b>Qualità del Management (MQI):</b> L'individuazione delle aree sensibili alla desertificazione secondo la metodologia ESA prevede anche lo studio delle pressioni di origine. L'utilizzo del territorio da parte dell'uomo è un aspetto fondamentale nel determinare i processi che possono portare al degrado del suolo e alla desertificazione. Il tipo di gestione dipende da un insieme di fattori di diversa natura: fattori ambientali, pedologici, climatici, ma anche sociali, economici, politici e tecnologici.	
Intensità di uso del suolo <i>Land use intensity</i>	Le modalità di utilizzo e gestione del territorio rappresentano un importante fattore per le dinamiche nei processi di LDD. Ad es. aree collinari destinate alla coltivazione dei cereali autunno-vernino o coltivazioni irrigue ad alta intensità, presentano un'intensità di uso molto elevato. Ambienti naturali, o semi naturali, foreste, etc. presentano invece impatti ambientali molto basse.
Pressione antropica <i>Land use pressure</i>	Un modello semplificato per descrivere le cause sociali che contribuiscono alla desertificazione tiene conto della pressione antropica sul territorio in termini di concentrazione della popolazione. L' aumento esponenziale della popolazione nel corso dell'ultimo secolo, con tendenze differenziate tra aree costiere e zone marginali collinari e montuose lontane dal mare, ha conseguenze dirette sul degrado del suolo.

### 3.5. Il nuovo schema di classi e punteggi utilizzato

Nella presente tesi è stato utilizzato il sistema di classi/punteggi presentato in Ferrara *et al.*, 2020, cui si rimanda. In sintesi, ogni variabile viene suddivisa in classi di crescente criticità in funzione della relazione con i processi di LDD a cui è legata. Successivamente a ogni classe viene assegnato un punteggio espresso in una scala omogenea, compresa fra 1 (sensitività più bassa) e 2 (sensitività più alta). In altri termini i punteggi (da 1 a 2) esprimono il peso esercitato da ciascun parametro ambientale nel modificare la condizione di stato del sistema considerato. La definizione del sistema di classi/punteggi di ogni singolo strato è stata effettuata seguendo i criteri in Kosmas *et al.*, 1999c, considerando inoltre il grado di correlazione che le varie classi dei livelli selezionati hanno con la diversa Sensitività Ambientale ai livelli di LDD a livello globale (UNEP 1997, Kosmas *et al.*, 1999b, 1999c, 2000, 2003, 2006; Basso *et al.*, 2000; Maliva e Missimer 2012; Ochoa *et al.*, 2016; Moreira *et al.*, 2009; Salvati e Bajocco 2011; Salvati e Zitti 2008; Panagos *et al.*, 2015; IUSS 2015; Calviño-Cancela *et al.*, 2016).

Nella Tabella 4 che segue è riportato lo schema pubblicato a pagina 8 e 9 del file di *Supporting information* in Ferrara *et al.*, 2020.

**Table S1.** Elementary variables composing the ESA index and the related sensitivity scores, with the combined source datasets adopted in setting up the current maps <sup>(1)</sup>.

<b>Parent material</b>		
<i>Type (from the source)</i>	<i>Symbol</i>	<i>Score</i>
Unconsolidated sediments	SU	1.0
Basic volcanic rocks; Siliciclastic sedimentary rocks; Basic plutonic rocks; Evaporites	VB; SS; PB; EV	1.2
Mixed sedimentary rocks;	SM	1.4
Intermediate volcanic rocks; Intermediate plutonic rocks; Metamorphic rocks	VI; PI; MT	1.5
Acid plutonic rocks; Acid volcanic rocks	PA; VA	1.6
Carbonate sedimentary rocks	SC	1.7
Pyroclastics	PY	2.0
No data - no soil	Nd	excluded

#### Soil groups

<i>Type (from the source)</i>	<i>Symbol</i>	<i>Score</i>
Andosol, Chernozem, Cambisol, Fluvisol, Histosol	AN; CH; CM; FL; HS	1.0
Greyzem; Kastanozem; Nitisol; Phaenozem;	GR; KS; NT; PH	1.1
Acrisol; Anthrosol; Ferrasol; Gleysol; Luvisol; Podzol; Regosol; Vertisol	AC; AT; FR; GL; LV; PZ; RG; VR	1.3
Alisol; Lixisol; Podzoluvisol; Planosol	AL; LX; PD; PL	1.5
Calcisol	CL	1.6
Arenosol; Plinthosol	AR; PT	1.7
Gypsisol; Leptosol; Solonchaks; Solonetz; Rock debris; Sand dunes; Salt flats	GY; LP; SC; SN; RK; DS; ST	2.0
No information	NI	( <sup>§</sup> )

<sup>§</sup>) The scores of the few areas with No information (NI) were derived from the Global Soil Region map of the USDA NCRS: [http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2\\_054013](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054013) with following scores:  
map codes 12; 13; 26; 85; 86; 90; 92; 93; 94; 98 = 1 map codes 63; 72; 75; 76 = 1.1 map codes 6; 7; 16; 18; 32; 34; 41; 43; 44; 45; 62; 80; 81; 82; 83; 84; 99 = 1.3 map codes= 54; 55; 56= 1.5 map codes 1; 2; 51; 53; 97 = 2

#### Soil texture

<i>Type (from the source)</i>	<i>Symbol</i>	<i>Score</i>
Clay loam; loam; sandy clay loam; sandy loam; loamy sand	CL; L; SCL; SL; LS	1.0
Silty clay loam; silt loam; sandy clay	SiCL; SiL; SC	1.2
Clay (heavy); silty clay; clay (light); silt	C(h); SiC; C(l); Si	1.6
Sand	S	2.0
No data - no soil ( <sup>§</sup> )	Nd	excluded

<sup>§</sup>) In the areas with no data information corresponding to Rock outcrops (RK29), Sand dunes (DS30) and Salt flats (ST33) in the Soil groups variable, the score of 2 is given.

#### Slope grade (<sup>§</sup>), %

<i>Ranges</i>	<i>Score</i>
< 3	1.0
3 < 6	1.1
6 < 12	1.2
12 < 18	1.3
18 < 24	1.4
24 < 30	1.5
30 < 36	1.7
>= 36	2.0

<sup>§</sup>) Zevenbergen-Thorne algorithm

#### Rock fragments, %

<i>Type</i>	<i>Score (<sup>§</sup>)</i>
>= 60	1.0
40 < 60	1.1
30 < 40	1.3
20 < 30	1.5
10 < 20	1.7
< 10	2.0
No data - no soil ( <sup>§§</sup> )	excluded

<sup>§</sup>) Due to the characteristic of the input variable, in the areas corresponding to Mixed sedimentary rocks (SM-9), Carbonate sedimentary rocks (SC-12) and Acid volcanic rocks (VA-13) in the Parent material variable, the score of 1.4 is given.

<sup>§§</sup>) In the remaining areas with no data information corresponding to Rock outcrops (RK), Sand dunes (DS) and Salt flats (ST) in the Soil groups variable, the score of 2 is given.

#### Drainage

<i>Type</i>	<i>Score</i>
Well	1.0
Moderately well	1.2
Imperfectly	1.4
Somewhat excessive	1.7
Poor; very poor; excessive	2.0
No data - no soil ( <sup>§</sup> )	excluded

<sup>§</sup>) In the areas with no data information corresponding to Rock outcrops (RK29), Sand dunes (DS30) and Salt flats (ST33) in the Soil groups variable, the score of 2 is given.

/Table S1 continues



Code	Type (from the source)	Drought resistance	Fire risk	Erosion protection	Land Use Intensity
		Scores			Score
10	Cropland, Rainfed	1.5	1.4	1.7	1.7
11	Herbaceous cover	1.6	1.4	1.8	1.7
12	Tree or shrub cover	1.3	1.2	1.6	1.4
20	Cropland, irrigated or post flooding	1.4	1.4	1.4	1.6
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (<50%)	1.5	1.5	1.5	1.5
40	Mosaic natural vegetation (>50%) / cropland (<50%)	1.5	1.4	1.4	1.5
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	1.0	1.3	1.0	1.1
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)	1.1	1.4	1.1	1.2
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)	1.0	1.3	1.0	1.0
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)	1.2	1.7	1.4	1.3
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)	1.1	1.5	1.1	1.1
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)	1.1	1.3	1.0	1.1
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)	1.2	1.2	1.3	1.2
80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)	1.2	1.3	1.3	1.1
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)	1.3	1.3	1.5	1.5
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)	1.3	1.3	1.5	1.5
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)	1.0	1.1	1.0	1.0
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	1.4	1.5	1.2	1.2
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	1.3	1.4	1.3	1.5
120	Shrubland	1.5	1.4	1.6	1.7
121	Shrubland evergreen	1.2	1.6	1.2	1.5
122	Shrubland deciduous	1.4	1.4	1.6	1.6
130	Grassland	1.6	1.3	1.4	1.5
140	Lichens and mosses	1.0	1.0	1.1	1.2
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)	1.6	1.3	1.7	1.8
151	Sparse tree (<15%)	1.5	1.2	1.6	1.6
152	Sparse shrub (<15%)	1.5	1.2	1.6	1.6
153	Sparse herbaceous cover (<15%)	1.6	1.3	1.7	1.7
160	Tree cover, flooded, fresh or brackish water	1.0	1.0	1.0	1.3
170	Tree cover, flooded, saline water	1.0	1.1	1.2	1.2
180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brackish water	1.1	1.1	1.2	1.3
200	Bare areas	2.0	1.0	2.0	2.0
201	Consolidated bare areas	2.0	1.0	2.0	2.0
202	Unconsolidated bare areas	2.0	1.0	2.0	2.0
190; 210; 220; Urban; Water; Permanent snow and ice and No data			Excluded		Excluded

**Plant cover,  $NDVI_{MVC}$** 

Ranges	Score
$\geq 0.80$	1.0
$0.72 < 0.80$	1.1
$0.62 < 0.72$	1.2
$0.50 < 0.62$	1.3
$0.38 < 0.50$	1.4
$0.26 < 0.38$	1.5
$0.18 < 0.26$	1.6
$0.13 < 0.18$	1.7
$0.11 < 0.13$	1.8
$0.1 < 0.11$	1.9
$< 0.1$	2.0

**Aridity Index  $(^{\circ})$ ,  $AI_U$** 

Ranges	Score
$\geq 1.00$	1.00
$0.75 < 1.00$	1.05
$0.65 < 0.75$	1.15
$0.50 < 0.65$	1.25
$0.35 < 0.50$	1.35
$0.20 < 0.35$	1.45
$0.10 < 0.20$	1.55
$0.03 < 0.10$	1.75
$< 0.03 (^{\circ})$	2.00

<sup>§)</sup> By a variant of the Penman - Monteith method (Harris et al., 2014)

<sup>§§)</sup> Panagiotis et al. 2013

**Population density, inhabitants/km<sup>2</sup>**

Ranges	Score
$< 4$	1.0
$4 < 30$	1.1
$30 < 80$	1.2
$80 < 170$	1.3
$170 < 300$	1.4
$300 < 500$	1.5
$500 < 850$	1.6
$850 < 1400$	1.7
$1400 < 2000$	1.8
$2000 < 2700$	1.9
$\geq 2700$	2.0

**Precipitation, mm yr<sup>-1</sup>**

Ranges	Score
$\geq 650$	1.00
$570 < 650$	1.05
$490 < 570$	1.15
$440 < 490$	1.25
$390 < 440$	1.35
$345 < 390$	1.50
$310 < 345$	1.65
$280 < 310$	1.80
$< 280$	2.00

1) The sensitivity scores of the variables ranges within the interval from 1 (low environmental sensitivity) to 2 (high environmental sensitivity) highest values depending on the characteristics of the input variables. Note that this variable/score system is related to the characteristics databases. Based on this, it is recommended to verify the behaviour of the variables in changing the input dataset with respect to the use classifications (i.e. the land cover map, plant cover dataset, etc.).

Il sistema di variabili/classi/punteggi così strutturato presenta una elevata flessibilità e semplicità di utilizzo, consentendo eventuali integrazioni o aggiornamenti successivi sulla base, anche, di nuove conoscenze tecniche e/o di nuove disponibilità di dati senza che siano snaturati i contenuti concettuali originari. In Tabella 5 sono riportate i differenti tipi di sensitività ambientale con le relative classi.

Tabella 5. Differenti tipi di ESA e relative classi (<sup>1</sup>).

Tipi	Codice	Intervalli ESA
<i>Not affected</i>	N	$\geq 1.00 \leq 1.170$
<i>Potentially affected</i>	P	$> 1.170 \leq 1.225$
<i>Fragile</i>	F1	$> 1.225 \leq 1.275$
	F2	$> 1.275 \leq 1.325$
	F3	$> 1.325 \leq 1.375$
<i>Critical</i>	C1	$> 1.375 \leq 1.425$
	C2	$> 1.425 \leq 1.530$
	C3	$> 1.530 \leq 2.000$

<sup>1</sup>) Modificato da Ferrara et al. 2020

### 3.6. La preparazione degli strati e la l'elaborazione degli indici

Nel presente studio, basato sulla analisi della evoluzione spazio-temporale di sistemi socio-ecologici a scala mondiale, il contesto logico funzionale della organizzazione dei dati e delle analisi assume, ovviamente, una importanza strategica. In particolare, le informazioni raccolte verranno preparate ed elaborate secondo procedure e approcci che garantiscano la replicabilità temporale. Pertanto, tutte le informazioni raccolte nei differenti periodi (2000, 2005, 2010, 2015), saranno perfettamente confrontabili per quanto riguarda la loro origine, consistenza, preparazione ed elaborazione. Nella Figura 18 è rappresentato lo schema di riferimento concettuale.

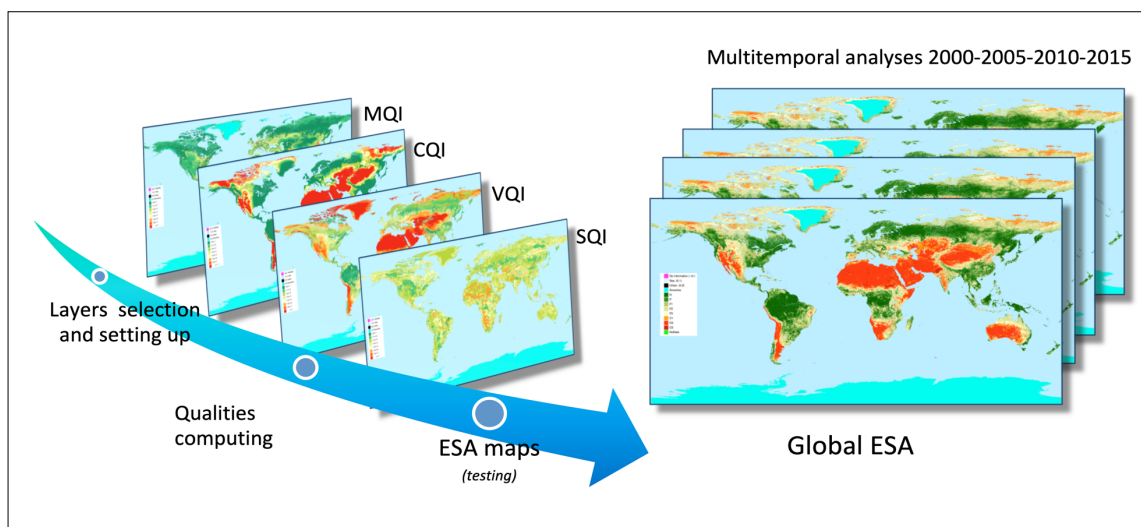


Figura 18. Schema di riferimento concettuale.

Per quanto riguarda poi le procedure di elaborazione dei dati la scelta è stata quella di una duplice e parallela linea di calcolo per la definizione di tutti gli strati (singoli, intermedi e finali) utilizzando due differenti software (R Studio e QGIS) e confrontando, ad ogni avanzamento i risultati.

### 3.7. Metodologie di analisi

Il complesso di informazioni territoriali multitemporali, gestite ed elaborate nel presente lavoro di Tesi, è costituito da 14 variabili di base (20 anni dal 1998 al 2017, successivamente parametrizzate in indicatori chiave), da 20 variabili derivate (corrispondenti a 4 qualità più l'indice ESA per i 4 anni 2000, 2005, 2010, 2015) e delle moltissime variabili intermedie prodotte, tutte a livello globale e a scala di 1 km, e rappresenta un insieme di dati e di informazioni consistente e di grande interesse e qualità ma la cui complessità e dimensione richiede, per la sua elaborazione e analisi, l'utilizzo di molteplici e differenziati approcci statistico-analitici. La scelta di un insieme di un diversificato insieme di metodi di analisi (quali la *statistica descrittiva* e le *analisi univariate*, il *data mining*, le *analisi della tendenza* o le *analisi multivariate*) è inoltre finalizzata alla definizione e messa a punto di un apposito *framework*, funzionale alla specifica complessità del fenomeno e alla esplorazione delle componenti e delle relazioni ad esse sottese integrata in uno stesso ambito logico-interpretativo.

I dati sono stati gestiti ed elaborati utilizzando in parallelo l'ambiente di programmazione RStudio (RStudio Team, 2018) e il software geografico QGIS (QGIS Development Team, 2018), cosa che ha consentito di verificare tutti i prodotti ottenuti (mappe) in tutte le fasi di elaborazione. L'analisi statistica è stata effettuata utilizzando il software statistico JMP-13, su un campione casuale di 81676 osservazioni corrispondenti a *pixel* terrestri attivi estratti dalle mappe ad 1 km utilizzando una griglia di 50 km.

1) Le tecniche di **statistica descrittiva**, insieme alle **analisi univariate**, sono funzionali a sintetizzare e rappresentare, quantitativamente e qualitativamente, un insieme di dati attraverso indici sintetici in grado di sottolineare gli aspetti che caratterizzano i fenomeni in esame. Tali statistiche trovano una diffusa applicazione e importanza nella classificazione, sintesi e rappresentazione di processi in atto, come nel presente caso. In questo ambito verranno utilizzate differenti tipologie di indici (di posizione, di variabilità, etc.) e di rappresentazioni grafiche come istogrammi di frequenza, box-plot, etc., atte a sintetizzare graficamente molte caratteristiche di un insieme di dati. In Figura 19 è raffigurato un esempio di Box-plot.

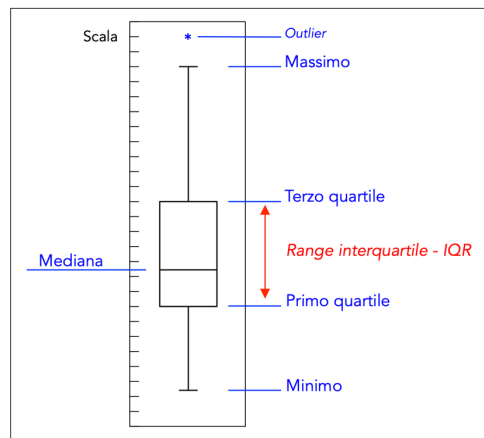


Figura 19. Componenti di un diagramma *Box-plot*. Questo è costituito da un rettangolo diviso in due parti e da due segmenti. Il 'box' è delimitato esternamente dal primo ( $q^{1/4}$ ) e dal terzo quartile ( $q^{3/4}$ ) e diviso dalla mediana. I segmenti sono delimitati dai valori minimi e massimi presenti.

2) Le procedure di **esplorazione dei dati** o **data mining** (*Knowledge Discovery in Databases - KDD*) sono generalmente utilizzate per cercare relazioni tra più variabili relativamente ai singoli elementi che le compongono. Nel nostro caso risultano particolarmente efficaci nel valutare, da dati già strutturati, la cosiddetta informazione implicita (o 'nascosta') in quanto non immediatamente evidente come, ad es. le relazioni esistenti negli strati, tra gli strati e tra gli strati e il tempo.

Le procedure di *data mining* si sono infatti dimostrate molto efficienti nel valutare la presenza di schemi o andamenti significativi (**pattern evaluation**), di grande interesse nelle valutazioni spazio-temporali di dati territoriali, come rappresentato in Figura 20.



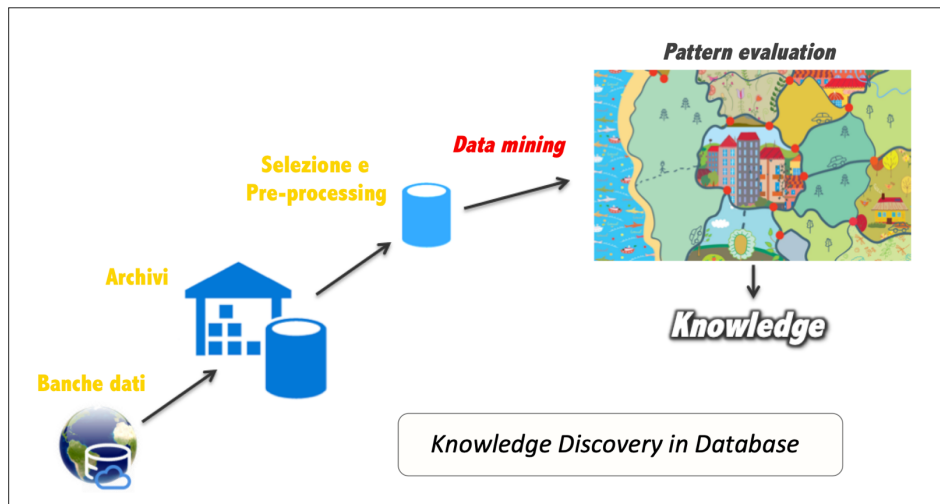


Figura 20. Il **Data mining** e la **Pattern evaluation**, aspetti centrali del processo di *Knowledge Discovery in Databases*, KDD.

I principali vantaggi di tali procedure sono:

- a) La capacità di utilizzare dati quantitativi, qualitativi, testuali e immagini;
- b) Non richiedono ipotesi a priori da parte del ricercatore;
- c) Non richiedono ipotesi sulla forma distributiva delle variabili;
- d) Capacità di gestire un numero elevato di variabili e osservazioni;
- e) Facilità nella interpretazione e visualizzazione dei risultati;
- f) Disponibilità di software dedicati.

Da un punto di vista applicativo le tecniche di *data mining* sono basate su molteplici componenti logico-funzionali (Figura 21), algoritmi, statistiche e tecniche di analisi tra loro integrate tra cui si citano: l'uso di reti neurali, le analisi di associazione, le classificazioni di tipo *supervised* e *unsupervised*, gli alberi di decisione, l'esplorazione mediante visualizzazione multidimensionale, i metodi Bayesiani, la *Fuzzy logic*, etc.

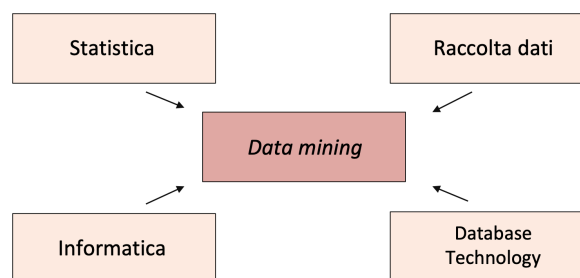


Figura 21. Schema delle componenti logico-funzionali del sistema.

3) Le **analisi della tendenza** rappresentano un approccio razionale e affidabile nella valutazione di scenari evolutivi basata sul comportamento passato delle variabili in esame (*driver of change*), diventando uno strumento flessibile e robusto laddove vengano utilizzate per creare ipotesi plausibili e dettagliate sulla evoluzione dei fenomeni in esame. Molteplici tendenze possono inoltre essere combinate per ipotizzare possibili scenari evolutivi degli ambiti analizzati. Combinare infatti diverse tendenze nell'ambito di sistemi complessi, composti da variabili interconnesse può fornire robuste ipotesi di riferimento sulle possibilità di sviluppo nel tempo di tali sistemi. Nello specifico ambito applicativo della presente tesi. In tale ambito, la stima della tendenza lineare (*Linear trend estimation*) è un approccio statistico funzionale alla interpretazione di dati laddove la serie di misure di un fenomeno (ad es i processi di *LDD*) derivi da una serie temporale. In tal caso la stima delle tendenze può essere utilizzata per formulare e giustificare ipotesi sulle tendenze nei dati, correlando le misurazioni con i tempi in cui si sono verificate. Inoltre, questo approccio può essere utilizzato per descrivere il comportamento dei dati osservati, e di conseguenza del fenomeno ad essi collegato. La stima del *trend* lineare esprime i dati come una funzione lineare del tempo e può anche essere utilizzata per determinare il significato delle differenze in un insieme di dati collegati da un fattore categoriale, come ad esempio le classi di rischio del modello ESA.

Va precisato comunque che nelle analisi di tendenza lineare si presuppone che l'errore associato ai dati sia casuale e che la distribuzione dei dati sia normale, criteri che, ad esempio, potrebbero non essere soddisfatti (ad es. dai dati climatici). Inoltre, quando le variazioni sono significativamente maggiori rispetto alla tendenza lineare risultante, la scelta dei punti iniziale e finale può modificare in modo significativo il risultato.

Tuttavia, nel caso specifico, tali analisi verranno utilizzate unitamente ad altre analisi e con la prevalente finalità di valutare la pendenza degli andamenti interni (pregressi) e non per fare ipotesi di scenario. Un esempio di utilizzo delle stime lineari di tendenza è riportato in Figura 22.

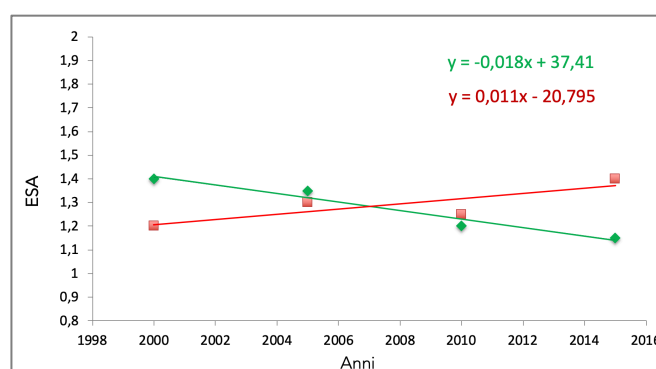


Figura 22. Esempio di stime lineari di tendenza. Un coefficiente  $b$  negativo (verde) indica una tendenza al miglioramento (riduzione della sensibilità ambientale ai fenomeni di LDD), il coefficiente  $b$  positivo (rosso) un peggioramento (aumento della sensibilità ambientale ai fenomeni di LDD).

4) **Le analisi multivariate** comprendono quella parte di analisi statistiche atte interpretare fenomeni complessi con un numero elevato di variabili e di osservazioni, anche per mezzo di cosiddette variabili ipotetiche (o latenti). Fanno parte di questo gruppo di analisi diversi metodi statistici con differenti obiettivi:

- i) Riduzione della dimensione (Analisi delle Componenti Principali - *PCA*, il *Multidimensional scaling* - *MDS*);
- ii) Analisi di raggruppamento/associazione (analisi di segmentazione, analisi dei cluster, analisi delle corrispondenze, l'analisi della correlazione canonica)
- iii) Analisi discriminante (classificazione, *machine/supervised learning*)

Nelle analisi di dati geografici territoriali, come nel presente caso, particolare rilevanza assumono l'analisi dei cluster e l'analisi delle Componenti Principali, anche, e soprattutto, a completamento delle precedenti tipologie di analisi presentate precedenza.

L'**analisi dei clusters** viene utilizzata per raggruppare variabili che si ritengono altamente correlate, unendo i vari dati in gruppi (*cluster*) in base a criteri di 'somiglianza' o 'vicinanza'. Lo scopo di questa procedura è quindi quello di formare dei gruppi 'omogenei', secondo alcuni criteri, a cui poi attribuire un certo numero di caratteristiche proprie di tutti i componenti del gruppo. La costruzione dei cluster si può effettuare in molti modi, sia in funzione di un criterio di 'somiglianza' o 'differenza' tra i dati, sia utilizzando differenti tipologie di raggruppamento (gerarchico, non-gerarchico, etc.). Un esempio di analisi dei *cluster* a due vie su dati di sensitività ambientale della presente tesi di dottorato è riportato in Figura 23.



L'interpretazione delle componenti stesse viene solitamente effettuata a partire dalla correlazione lineare che ciascuna variabile originaria presenta con le componenti principali. Correlazioni positive fra variabile  $i$ -esima e componente principale  $j$ -esima indicheranno che la componente " $j$ " è fortemente rappresentata, in modo diretto, dalla variabile " $i$ " e, viceversa, per le correlazioni di segno negativo. Confrontando poi le relazioni rappresentate nel grafico delle correlazioni, si perviene a una più solida interpretazione del significato delle componenti principali. Un esempio di Analisi delle Componenti Principali su dati del *framework* ESA della presente tesi di dottorato è riportato in Figura 24.

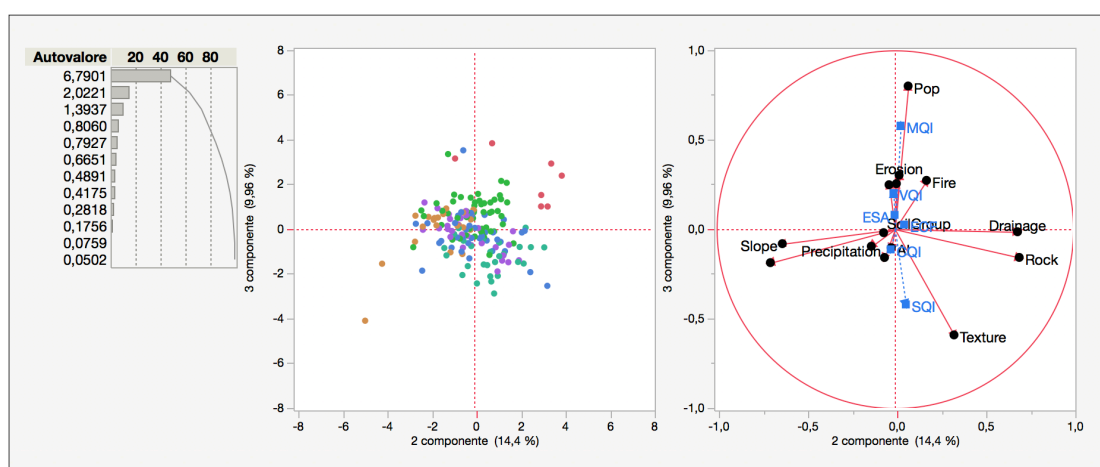


Figura 24. Esempio di Analisi delle Componenti Principali su dati di sensitività ambientale.

## 4. Analisi dei dati e discussione dei risultati

---

Il complesso di dati di base, di indici intermedi e finali, di algoritmi di calcolo e di analisi è finalizzato a evidenziare l'impatto nel tempo dei processi di LDD e dei connessi fattori predisponenti sui sistemi socio-ecologici a livello globale, come di seguito illustrato.

### 4.1 La sensibilità ambientale ai processi di LDD a scala globale

Le carte dell'indice di Sensibilità Ambientale (ESA) prodotte nell'ambito della presente Tesi di Dottorato, rappresentano un efficiente strumento per la mappatura e analisi dei fenomeni di Degradazione del suolo e di Desertificazione (*LDD processes*), sia a scala globale, che a scale di maggior dettaglio (continentale o di macro-regioni). Inoltre, le risoluzioni scelte per i dati di input e quella a 1 km adottata nelle mappe intermedie e finali rappresentano un eccellente supporto e riferimento anche nello studio di fenomeni di LDD, e altri fenomeni connessi, a scale maggiori (scala regionale). Nelle Figure 25, 26, 27, 28 sono riportate le mappe dell'ESA per i quattro periodi considerati (2000, 2005, 2010, 2015).

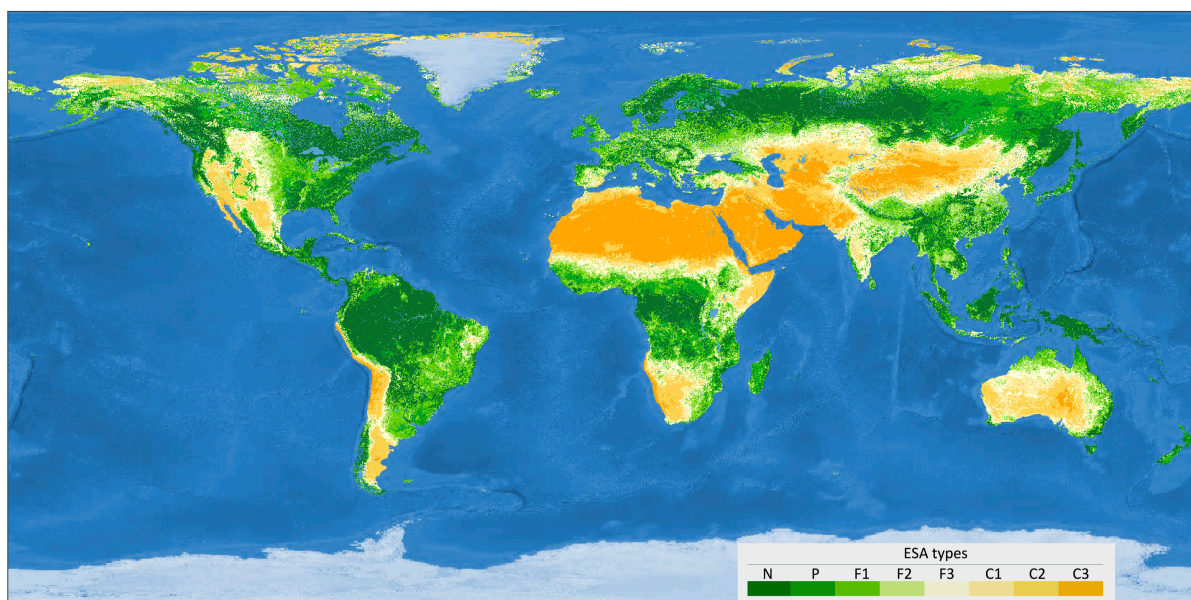


Figura 25. Distribuzione dei livelli di sensibilità ambientale ai processi di LDD a scala globale per il 2000.



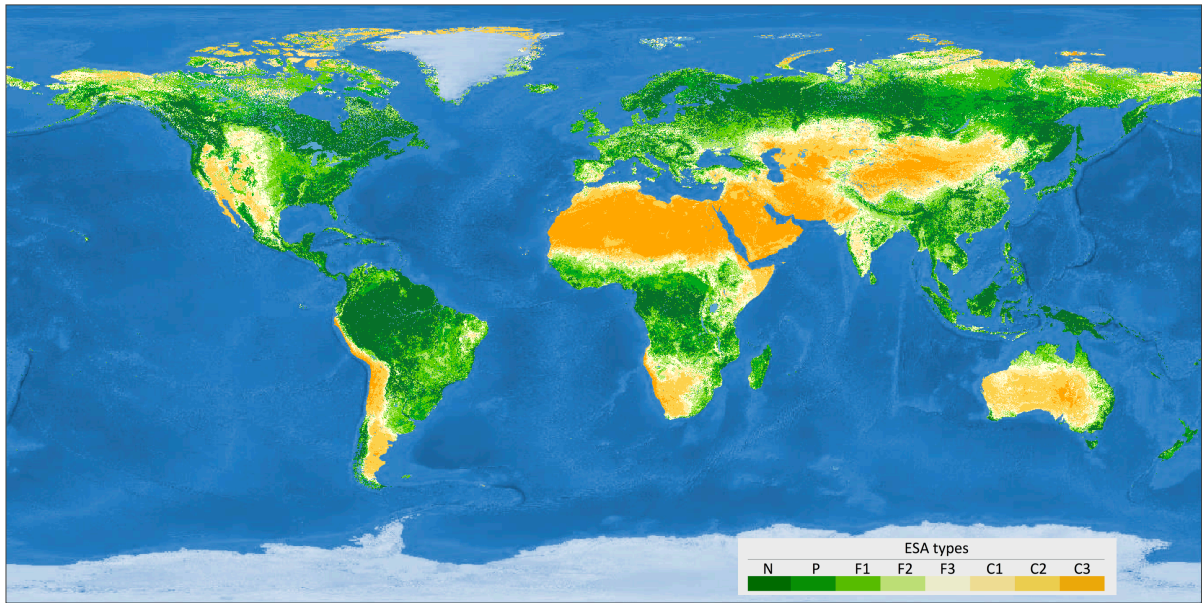


Figura 26. Distribuzione dei livelli di sensitività ambientale ai processi di LDD a scala globale per il 2005.

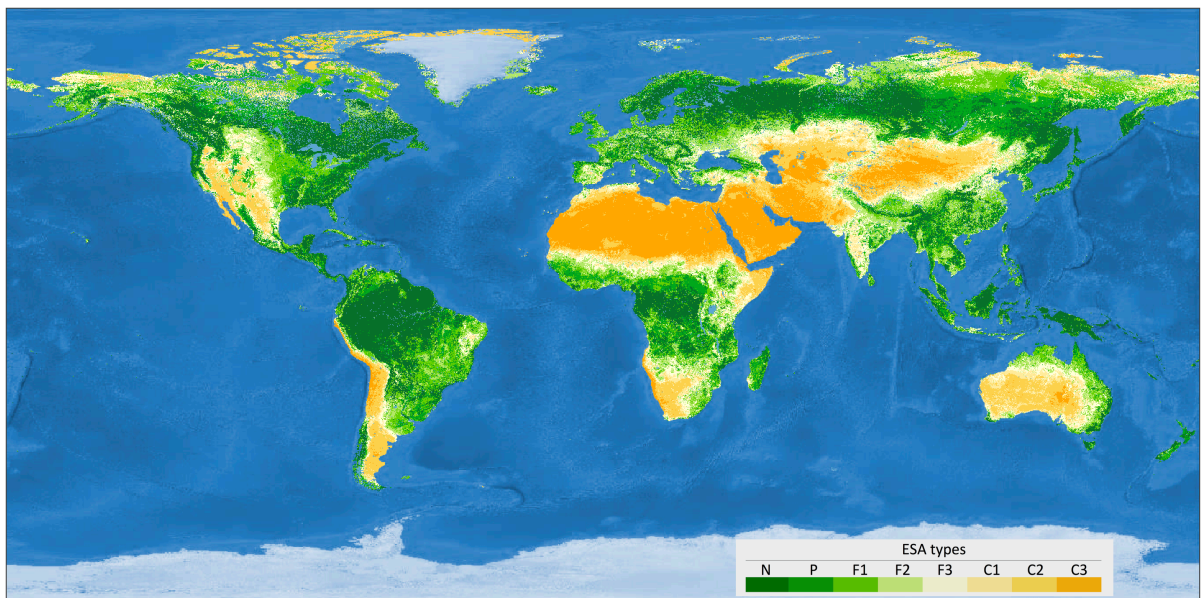


Figura 27. Distribuzione dei livelli di sensitività ambientale ai processi di LDD a scala globale per il 2010.



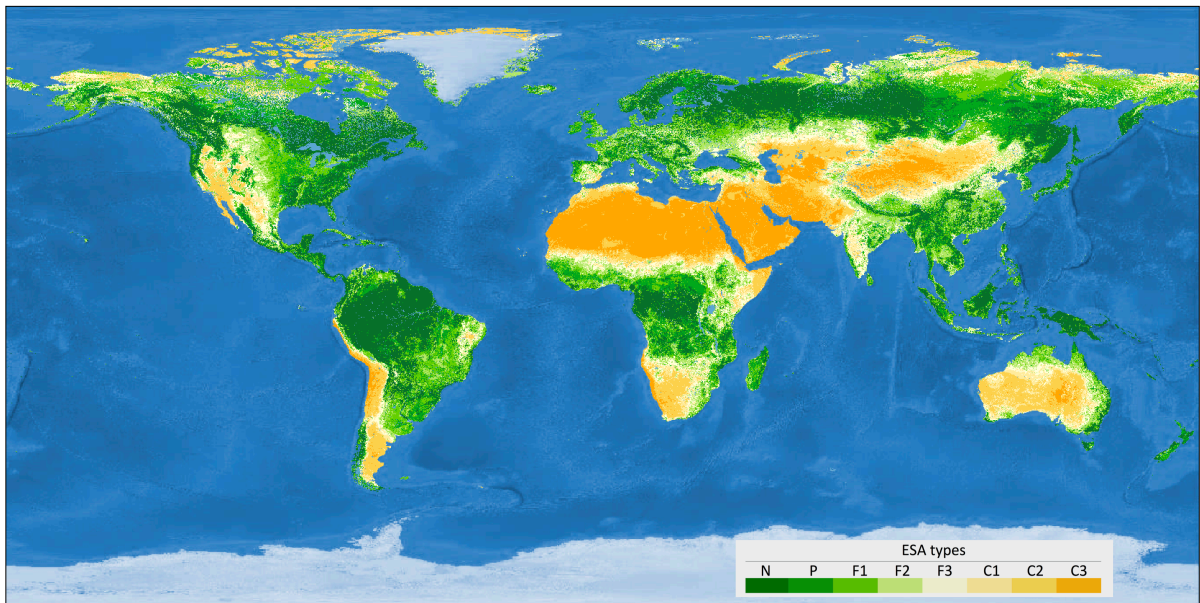
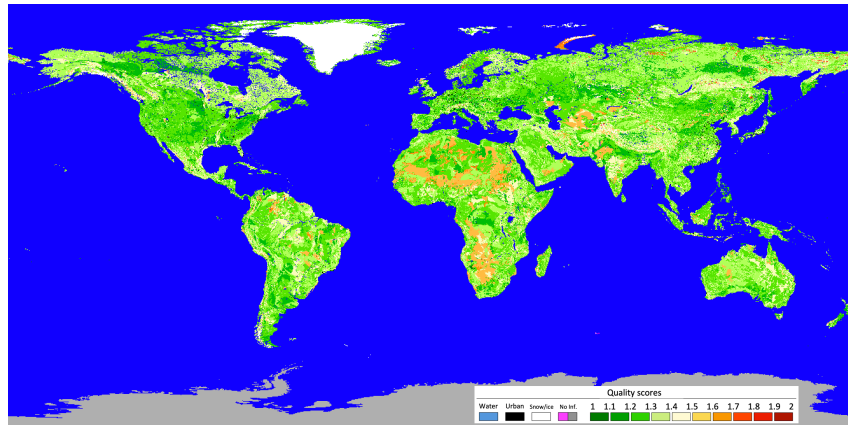


Figura 28. Distribuzione dei livelli di sensibilità ambientale ai processi di LDD a scala globale per il 2015.

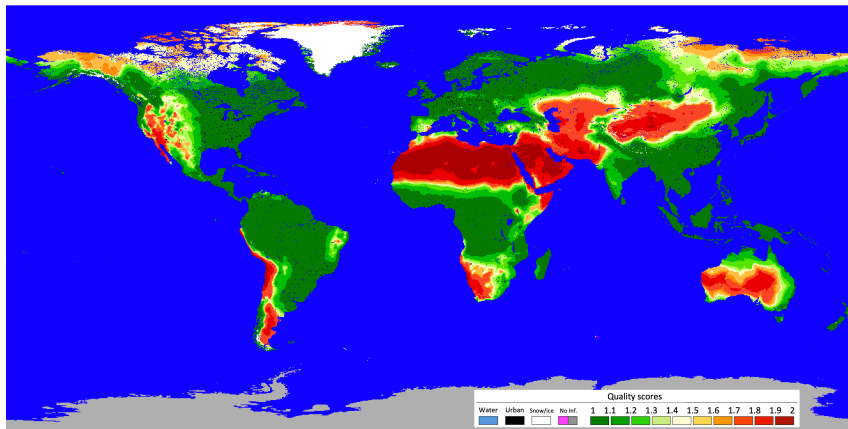
Dalla analisi delle quattro mappe è possibile fare alcune considerazioni preliminari sulla distribuzione dell'indice ESA nelle diverse parti della terra, considerato che, a livello globale, queste non presentano tra loro, variazioni nel tempo complessivamente significative. Come si può vedere dalla distribuzione delle tipologie ESA rappresentata nelle mappe, le regioni che presentano i livelli di Sensibilità maggiori comprendono le zone desertiche e pre-desertiche del Sahara, della Namibia, del Botswana e del Sudafrica, il corno d'Africa, le aree centrali dal medio oriente alla Mongolia, la parte continentale della Cina, la parte centrale della Australia, le aree interne situate ad alta quota del Cile fino in Patagonia e le aree ad ovest dell'America del Nord tra la California al Texas. Aree con alti valori di fragilità si ritrovano in parte nelle zone confinanti con le precedenti aree desertiche e predesertiche e in parte nei vasti territori di terra marginali tra deserto e savana o altri tipi di vegetazione transizionale. Infine, una parte significativa di aree fragili si ritrova sia in Europa (principalmente nel sud della Spagna) che nel nord-est del Brasile.

In Figura 29, sono rappresentate le mappe delle quattro *Quality* riferite al 2015, alla base del calcolo dei punteggi ESA-2015 (negli altri anni le mappe della Qualità del Clima, MQI, della Qualità della Vegetazione, VQI e della qualità del *Management*, MQI, hanno, a livello globale, andamenti complessivamente simili. La mappa della Qualità dei Suoli, SQI, è invece invariata).

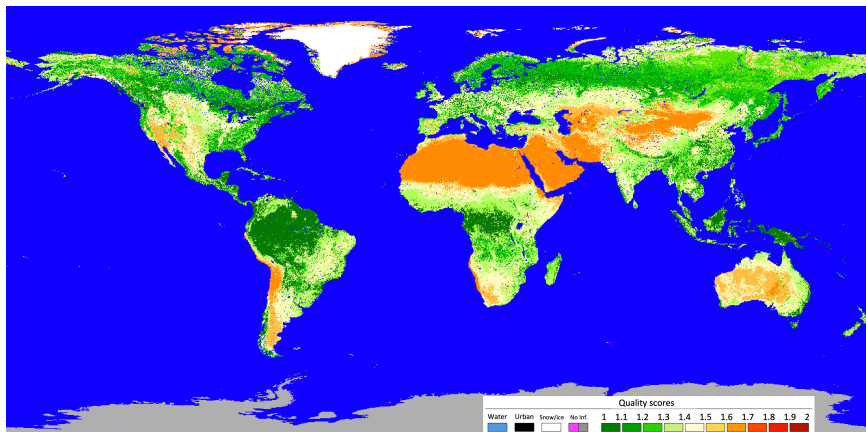
SQI



CQI



VQI



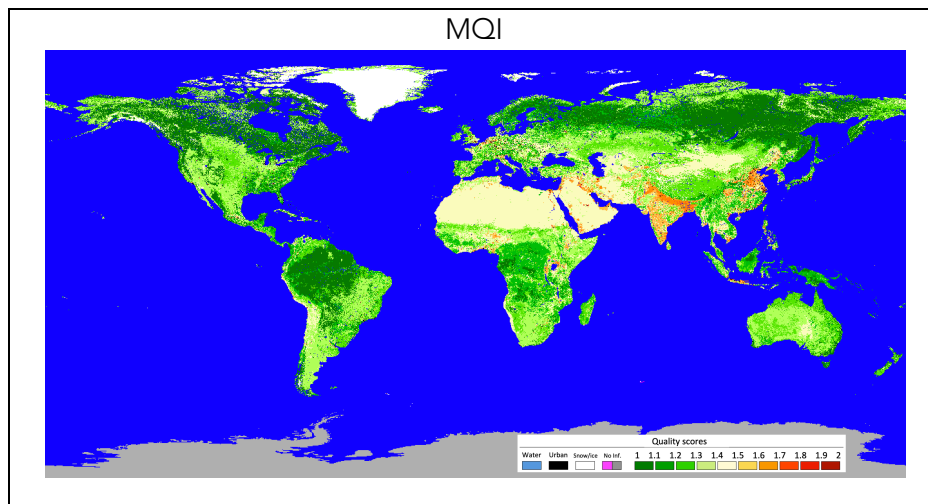


Figura 29. Distribuzione dei livelli di sensibilità ambientale nelle quattro *Quality* per il 2015.

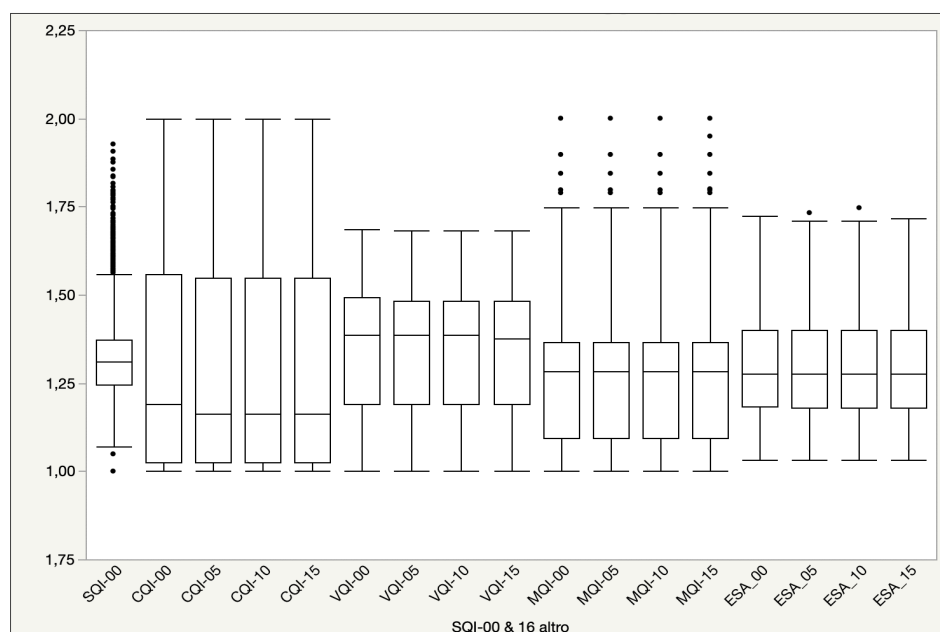


Figura 29. Box-plot degli strati intermedi (qualità) e finali (ESA) per i 4 periodi considerati.

Eseguendo una Analisi delle Componenti Principali sui 14 strati di base (utilizzati per il calcolo delle Quattro qualità) si può scomporre il contributo degli strati alla formazione dei punteggi intermedi delle Qualità e finali di Sensibilità Ambientale (per l'analisi vengono utilizzati i dati del 2015, campionati come indicato in precedenza). Le analisi sugli altri tre periodi hanno fornito risultati analoghi. In Tabella 6 sono riportati gli autovalori risultanti mentre in Figura 30 il grafico delle correlazioni.

Tabella 6. Tabella degli Autovalori.

Componente	Autovalori	Percentuale	Perc. cumulata
1	5,2171	12,830	37,265
2	1,7962	9,932	50,095
3	1,3904	7,436	60,026
4	1,0410	6,524	67,462
5	0,9134	5,494	73,987
6	0,7691	5,048	79,480
7	0,7067	4,686	84,528
8	0,6560	3,714	89,214
9	0,5200	3,573	92,928
10	0,5002	1,657	96,501
11	0,2319	1,075	98,157
12	0,1505	0,498	99,232
13	0,0697	0,270	99,730
14	0,0379	12,830	100,000

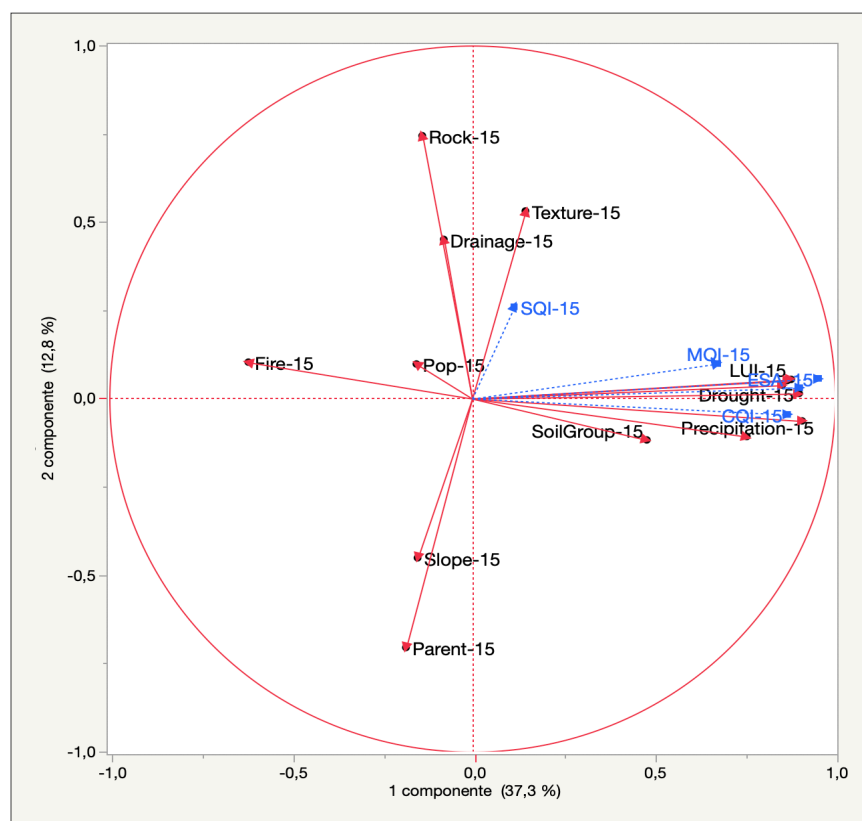


Figura 30. Grafico delle correlazioni (dati relativi al 2015).

Dalla analisi delle mappe a scala globale delle quattro Qualità riportate in Figura 29, dei risultati della PCA riportati in Tabella 6 e nel grafico delle correlazioni in Figura 30, si può vedere come i fattori di

maggiore criticità vengono efficacemente discriminati dalla PCA in componenti diverse: clima e vegetazione contribuiscono maggiormente al peggioramento dell'ESA in modo sinergico. Indipendentemente da essi, il suolo agisce con una distribuzione spaziale non correlata al peggioramento o miglioramento dell'ESA (asse 2). La popolazione, infine, contribuisce al peggioramento dell'ESA in modo indipendente dal clima, vegetazione e dal suolo (asse 3). Dove l'ESA non è alto, i fattori critici che contribuiscono di più all'innalzamento del punteggio sono nell'ordine, il clima e la vegetazione (asse 1) contribuendo per il 40%, il suolo (asse 2) contribuendo per il 15% e la popolazione (asse 3) contribuendo per il 10%. Da notare anche come il *Management* tenda a contribuire all'ESA in maniera sinergica con il clima e la vegetazione, mentre il suolo è indipendente da tutti gli altri fattori. Quanto esposto trova infine conferma nella Figura 31.

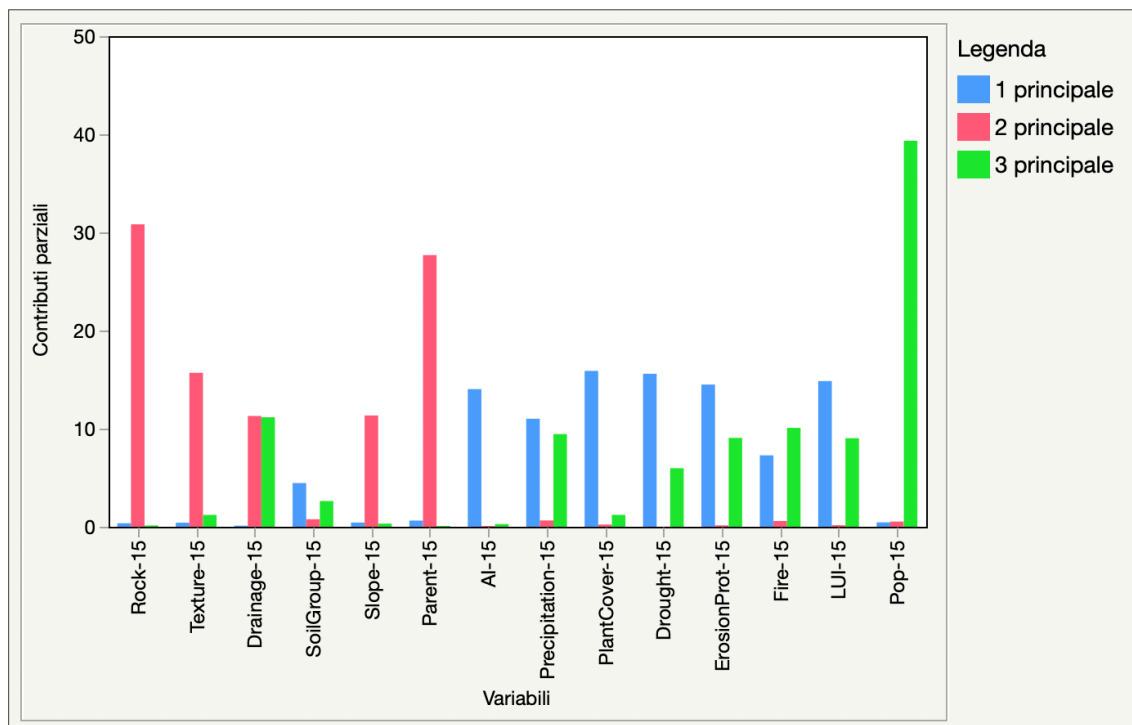


Figura 31. Diagramma del contributo parziale delle variabili.

## 4.2 La variazione della Sensitività Ambientale nel tempo

Nel valutare gli impatti che i cambiamenti delle variabili (di base e derivate) hanno sui processi di LDD a scala globale, una prima indicazione può venire dalla analisi della evoluzione temporale delle superfici con differenti livelli di sensitività ambientale a scala globale.

Nel grafico rappresentato in Figura 32 sono riportati i valori di superficie (in percentuale) in funzione delle classi di sensitività ai fenomeni di LDD, a livello mondiale per i quattro periodi considerati (2000, 2005, 2010, 2015).

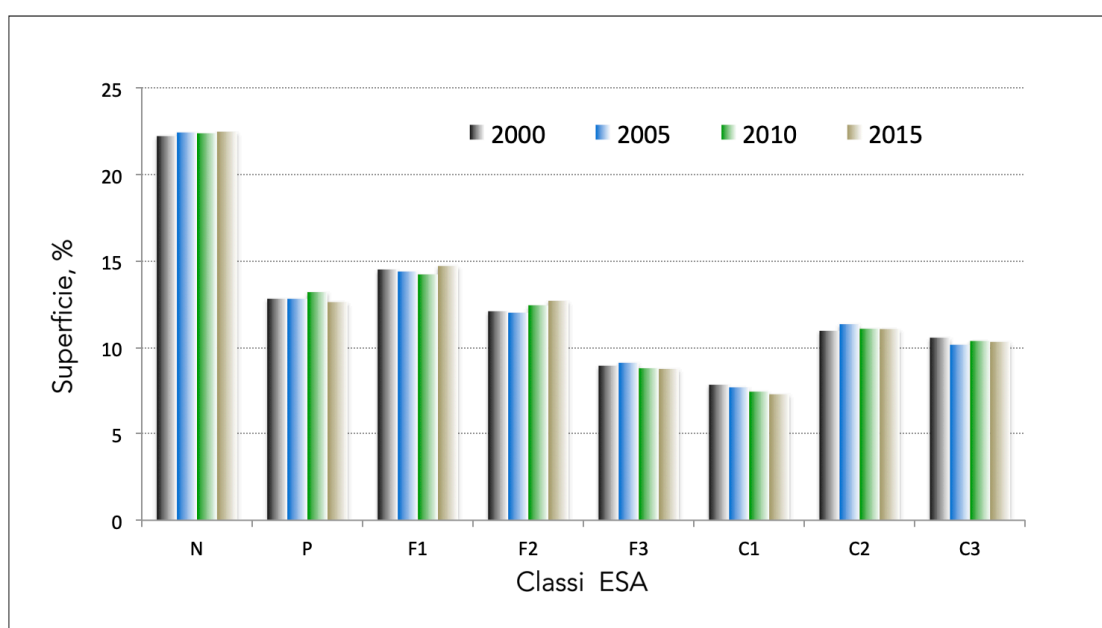


Figura 32. Distribuzione delle superfici in classi di sensitività nei 4 periodi considerati.

Dalla analisi dei dati riportati nella Figura 32 si può innanzitutto notare come, nel periodo di tempo considerato, siano presenti un certo numero di passaggi di stato tra le differenti classi di sensitività ambientale, e come queste risultino tutte variamente coinvolte. Al riguardo, va inoltre notata una certa differenziazione di comportamento tra le classi estreme (quelle a maggiore o minore Sensitività Ambientale) e le classi intermedie (da F2 a C2). In queste ultime, infatti, le variazioni dell'ESA seguono una direzione definita (crescente o decrescente) mentre nelle altre classi, l'evoluzione nel tempo dell'indice ESA si presenta più come una variazione ciclica.

Questo comportamento conferma l'andamento ipotizzabile per questi fenomeni laddove le aree a minore sensitività si presentano inizialmente abbastanza resilienti ai cambiamenti mentre in quelle più critiche si conferma una certa incapacità a evolversi verso condizioni migliori o ancora più negative.

Complessivamente infine si può notare un miglioramento, molto probabilmente ciclico, delle classi intermedie F1\_F2-C1.

Queste prime valutazioni di carattere complessivo vengono confermate analizzando gli andamenti riportati nella Figura 33, dove sono riportate le variazioni delle singole qualità in funzione del rispettivo indice ESA per l'anno 2015 e nella Figura 34, dove sono riportate le variazioni nel tempo delle singole qualità CQI, VQI e MQI in funzione del rispettivo indice ESA.

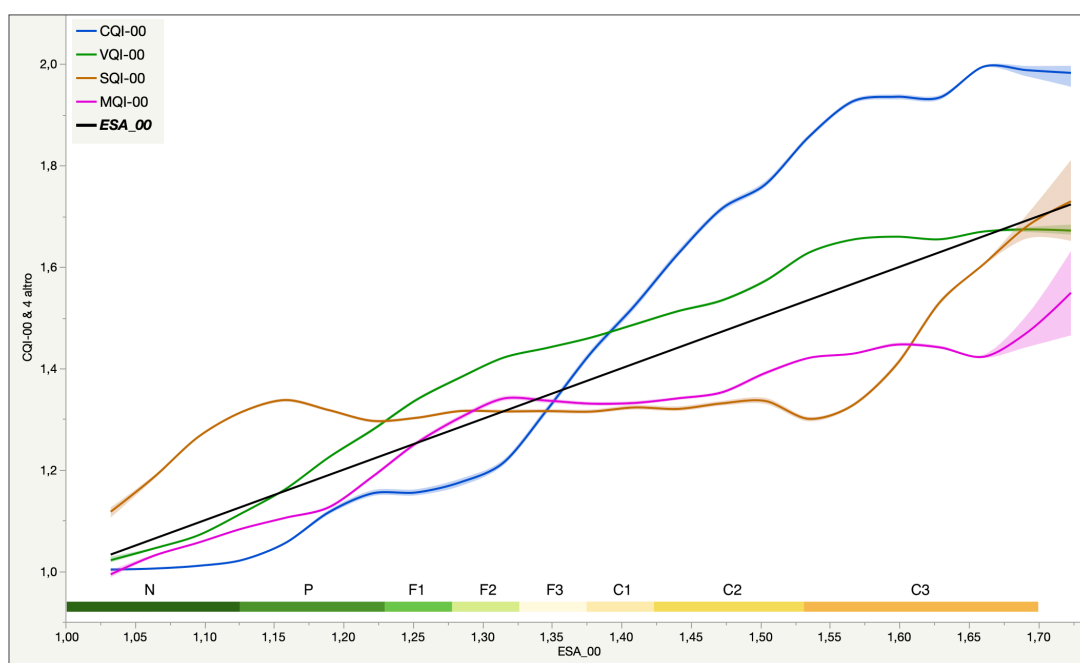


Figura 33. Andamento dei valori di sensitività ambientale delle Qualità in funzione delle classi ESA per l'anno 2015.

Gli andamenti rappresentati in Figura 33 chiariscono il contributo degli indicatori di Qualità ai livelli complessivi di Sensitività Ambientale ai processi di LDD laddove punteggi superiori o inferiori, rispetto all'indice ESA (linea nera), indicano un contributo negativo (peggiorativo) o positivo (in miglioramento) ai livelli di sensitività ambientale.

Analizzando il complesso degli andamenti il clima (CQI) è il fattore che maggiormente determina il livello di SA al di sopra della soglia critica C1. Il fattore vegetazione (VQI) presenta un contributo mediamente negativo a partire dalle classi Fragili, collegato con l'impatto della agricoltura e delle condizioni climatiche. Il suolo, come indicato anche nella PCA, contribuisce ai punteggi ESA in maniera non correlata alle altre variabili. In altre parole le differenti Qualità dei suoli si ritrovano indifferentemente e variamente distribuite in molti ambienti anche molto differenti per condizioni climatiche, vegetazionali e di pressione antropica. La qualità del suolo è inoltre un fattore raramente



associato a valori particolarmente elevati di Sensitività del terreno alla LDD, ma svolge un ruolo importante nella definizione delle aree in cui la Sensitività può essere rapidamente trasformata in livelli più critici dalle interazioni di altri fattori. Il *Management* (MQI) è un fattore che maggiormente determina le condizioni di fragilità ambientale (F1, F2, F3), soprattutto in corrispondenza di suoli e condizioni climatiche favorevoli.

Da un punto di vista statistico è interessante notare la presenza di una seppur limitata variabilità solo nei valori più alti di Sensitività Ambientale.

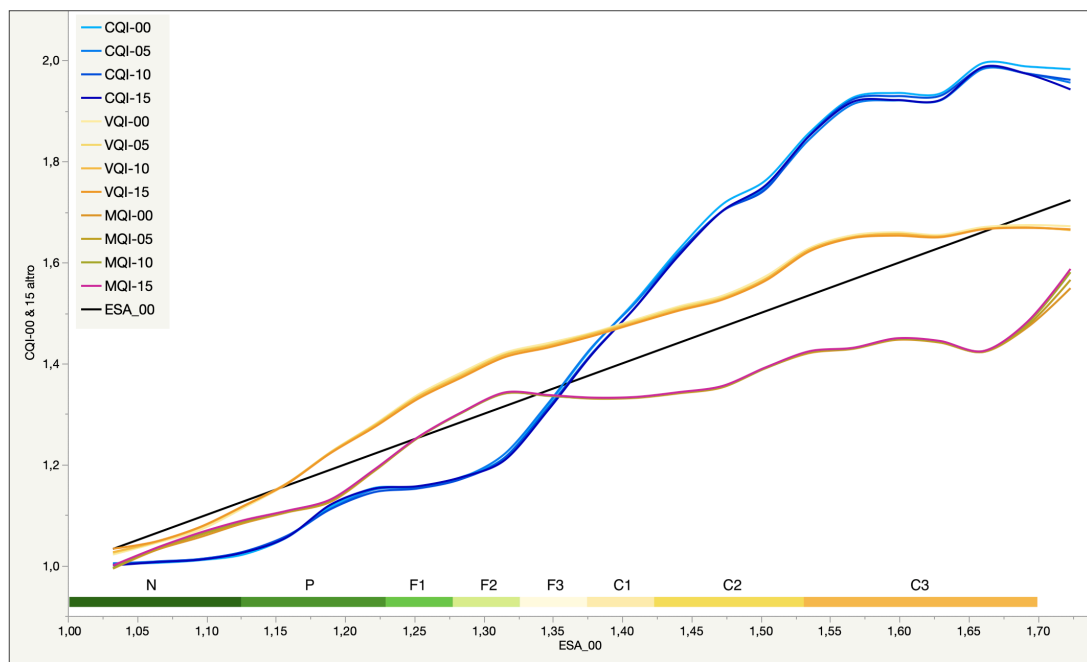


Figura 34. Andamento dei punteggi di Sensitività Ambientale delle Qualità in funzione delle classi ESA per gli anni 2000, 2005, 2010, 2015.

Gli andamenti rappresentati in Figura 34 permettono di analizzare gli andamenti temporali delle differenti indicatori parziali (Qualità) rispetto all'indice ESA. Come per le precedenti analisi temporali a scala globale, le singole variazioni locali, seppur di notevole interesse e consistenza, vengono solo in parte evidenziate a livello complessivo. Si può già tuttavia notare una maggiore presenza di variazioni climatiche (CQI) rispetto a quelle del *Management* (MQI) presenti solo nelle classi estreme e della vegetazione (VQI), che comunque presenta variazioni in tutte le classi, a dimostrazione di una dinamicità legata a differenti ambienti e condizioni socio-ecologiche.

Rimane inoltre confermato l'andamento relativo delle qualità nella formazione dei punteggi ESA, con l'interessante andamento del management (che rappresenta soprattutto la pressione dell'uomo sui

sistemi territoriale) laddove diminuisce consistentemente in termini di sensitività al peggiorare delle condizioni climatiche (ESA F3).

#### **4.3 Velocità e impatto dei cambiamenti della Sensitività Ambientale nel tempo e nello spazio (*Fast and slow drivers of change*)**

Obiettivo principale della presente tesi è la valutazione degli impatti (cambiamenti) che variazioni di stato delle singole variabili hanno sul sistema, piuttosto che una loro distinzione tra interna o esterna al sistema stesso (cfr. cap. 2.2), in quanto, a scala globale e in riferimento alla complessità e alla molteplicità dei fenomeni in esame (di *LDD*), tale aspetto perde gran parte di significato. Rimane tuttavia necessario precisare meglio cosa si intende, in tale contesto, per velocità e impatto delle variabili nei cambiamenti del sistema (*fast and slow drivers of change*).

Nella ampia bibliografia relativa all'analisi e alla comprensione dei meccanismi alla base di un sistema territoriale complesso, quali i Sistemi Socio-Ecologici, è sottolineata l'utilità di una separazione tra drivers esterni e variabili di un sistema a loro volta divise in veloci e lente (Ludwig *et al.*, 1978; Holling 1986; Carpenter e Turner 2000; Crépin 2007) in quanto le dinamiche di queste variabili veloci sono fortemente modellate da altre variabili del sistema che generalmente cambiano molto più lentamente (ad esempio i livelli di produzione variano velocemente mentre le caratteristiche di un suolo si modificano molto più lentamente, se non a seguito di reazioni o *feedback*, dovute ad altre componenti del sistema). In questo schema una variabile lenta, come ad es. la quantità di sostanza organica del suolo, determina il modo in cui una variabile veloce, come la produzione agricola, risponde alla variazione di un *driver* esterno, come la variazione delle precipitazioni durante la stagione di crescita. Lo schema adottato nel presente lavoro di tesi tiene conto della dimensione globale del sistema in esame che, di fatto, riconduce le componenti variabili del sistema (Clima, Vegetazione, *Management*) a un livello superiore assimilandole quindi ai cosiddetti *drivers*, mentre la componente suolo contribuisce a definire gli stati di equilibrio per quelle determinate condizioni variabili, o, in altri termini la capacità di supportare fluttuazioni del sistema. In tale ambito le variabili si connotano in *drivers Fast* o *Slow* in base alla capacità di provocare cambiamenti significativi e permanenti nello stato del sistema e non in base alla loro velocità intrinseca.

##### **4.3.1 Le variazioni della Sensitività Ambientale tra i periodi considerati**

Una prima valutazione delle variazioni della sensibilità ambientale può essere condotta analizzando le variazioni complessive dell'indice ESA nel tempo e nello spazio. Nelle Figure 35, 36, 37, sono rappresentate le differenze di prime, in valori assoluti, dei punteggi ESA, tra i quattro periodi temporali considerati, ovvero tra 2000-05, 2005-10, 2010-15. Mentre nelle Figure 38 e Figura 39 sono rappresentate le variazioni nel tempo di tali differenze in funzione delle classi ESA.

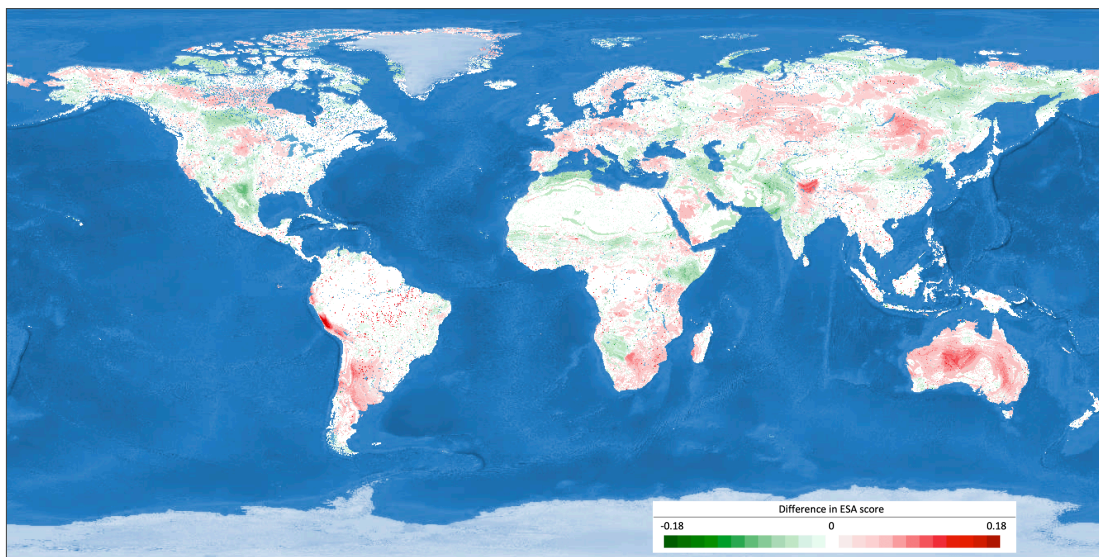


Figura 35. Variazioni dell'indice ESA tra il 2000 e il 2005.

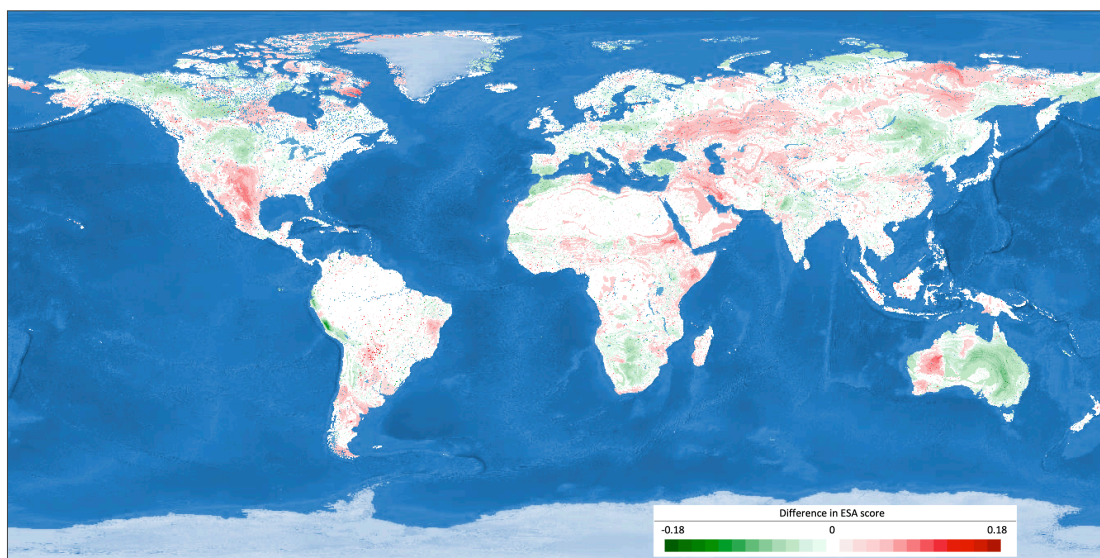


Figura 36. Variazioni dell'indice ESA tra il 2005 e il 2010.

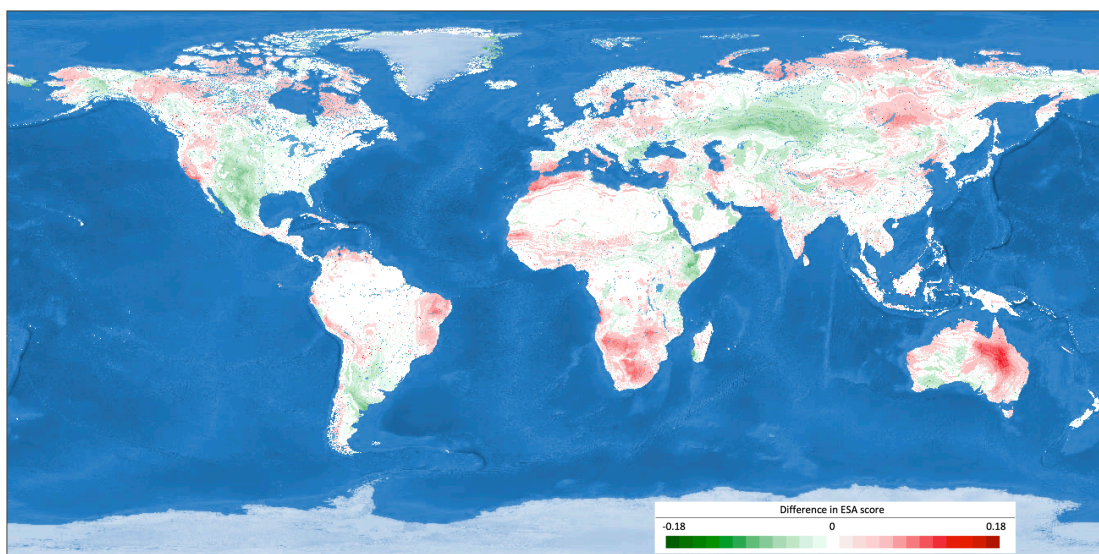


Figura 37. Variazioni dell'indice ESA tra il 2010 e il 2015.

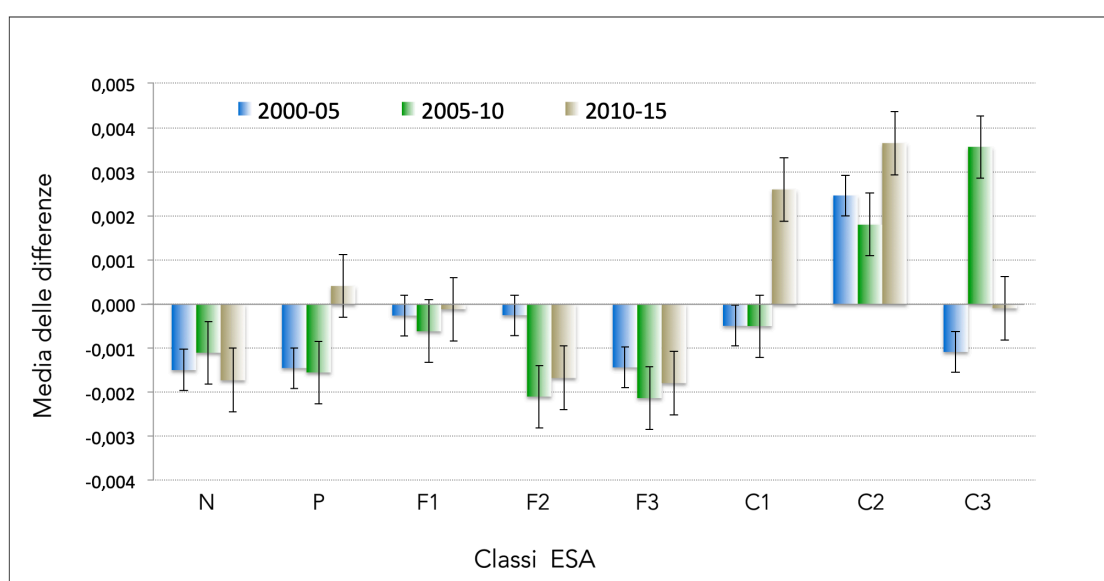


Figura 38. Variazioni dell'indice ESA nei periodi 2000-05, 2005-10, 2010-15 in funzione delle differenti classi di sensibilità (con barre di errore *standard*).

Dalla analisi delle mappe si possono innanzitutto notare due principali tipologie di variazioni, una di tipo prevalentemente ciclico, collegata agli andamenti climatici nel breve periodo, e una collegata alle variazioni di uso del suolo e della popolazione con un carattere di maggiore persistenza. Nello specifico gli andamenti del clima assumono, nelle diverse località della terra, differenti capacità di ritorno sui valori iniziali, evidenziando delle aree a maggiore persistenza (o capacità di ritorno), come

la parte centrale dell'America del Nord, la parte Centrale e la parte più a Nord della Russia, l'India, il Corno d'Africa, e la parte orientale dell'Australia. Andamenti meno marcatamente ciclici si ritrovano invece nell'Africa del Sud, nel Sudamerica (prevalentemente in Brasile e sulla catena delle Ande) e a ovest dell'Australia. Per quanto riguarda le variazioni di uso del suolo e della popolazione, queste confermano la loro sostanziale differenza di comportamento e di impatto sui vari sistemi territoriali rispetto alla componente climatica. Esse infatti contribuiscono, nella maggior parte dei casi, a un peggioramento stabile dei valori della sensibilità ambientale, dovuto sia a scelte verso un utilizzo a maggiore impatto (ad esempio con coltivazioni agrarie in aree naturali, semi-naturali o precedentemente meno utilizzate) dei territori, sia da una maggiore richiesta di risorse (energetiche, alimentari, di territorio) collegate alle aumentate concentrazioni della popolazione in alcune aree. E' da notare che la riduzione della pressione antropica in alcune aree collegata a questi spostamenti delle popolazioni in altre aree, non produce automaticamente effetti positivi immediati, sia perché maggiormente distribuita nello spazio, sia perché le ricadute positive sugli altri parametri ambientali hanno generalmente tempi molto lunghi (ad esempio la ricolonizzazione di aree abbandonate dalla agricoltura).

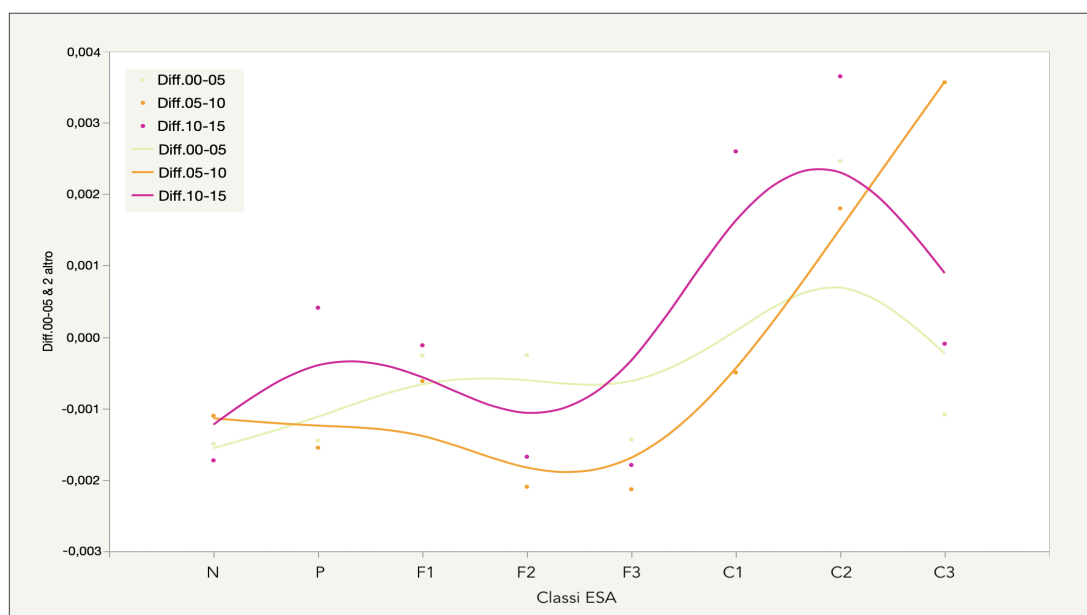


Figura 39. Tendenza dell'indice ESA nei periodi 2000-05, 2005-10, 2010-15 in funzione delle differenti classi di sensibilità.

Analizzando poi il grafico in Figura 38 si può evidenziare una tendenza complessiva di quei territori alla conservazione (o leggero miglioramento) delle condizioni di assente o scarsa sensibilità ambientale. Questa condizione, seppure con qualche differenziazione si ritrova anche nelle classi Potenziale e Fragili. In particolare, va notato, seppure nell'ambito di variazioni positive complessive,



un peggioramento della sensibilità ambientale in tutte queste classi nell'ultimo quinquennio (colonne marrone chiaro). Completamente differente è invece il comportamento delle classi critiche C1, C2, e C3, tutte con un bilancio, nei tre anni, negativo, dovuto in gran parte alle oscillazioni climatiche (si vedano le colonne marrone chiaro e blu in C3). Questi comportamenti sono confermati dagli andamenti illustrati nel grafico in Figura 39.

A fronte di una consistente variazione della sensibilità ambientale nel tempo e nello spazio, come sopra analizzata, è tuttavia interessante notare come una altrettanto consistente quota dei territori mondiali sia rimasta inalterata nei periodi di tempo considerati (tutte le differenze prime sono risultate uguali a zero). Nella Figura 40a è rappresentata la distribuzione spaziale di queste aree mentre nella successiva Figura 40b è riportata la loro distribuzione in classi di sensibilità ambientale.

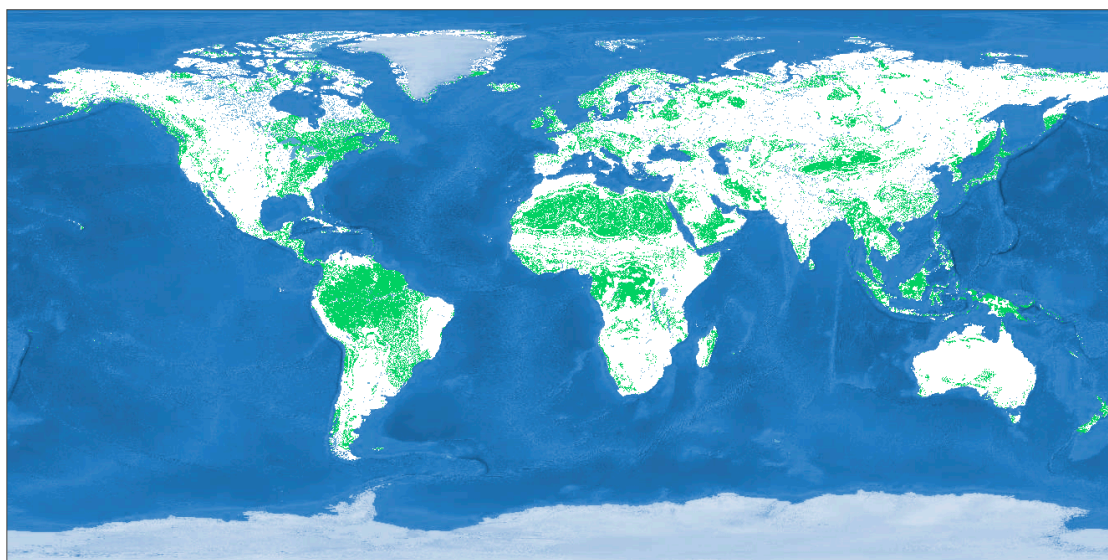


Figura 40a. Distribuzione spaziale dei pixel senza variazioni di punteggio nei 4 periodi considerati.

Dalla analisi degli andamenti riportati sulla mappa e nel grafico appare chiaro come la dimensione complessiva del fenomeno sia legata soprattutto alle due condizioni estreme di Sensibilità Ambientale, rappresentate da una parte dalle foreste della fascia equatoriale, dall'altra dalle zone aride dell'Africa, dell'Asia e dell'America latina. Condizioni determinate da una maggiore resilienza complessiva delle prime e dalla bassa capacità ad evolversi verso ulteriori stati negativi, per le seconde. Dai dati in Figura 40b appare inoltre evidente la grande dinamicità delle classi di SA intermedie (da P a C1) sottoposte a pressioni ripartite in modo complessivamente omogeneo tra tutte le variabili del sistema ma, per questo, in un equilibrio maggiormente precario (un lieve peggioramento dei fattori può generare importanti aumenti nella sensibilità ambientale complessiva – indice ESA). Vedi al riguardo la Figura 33.

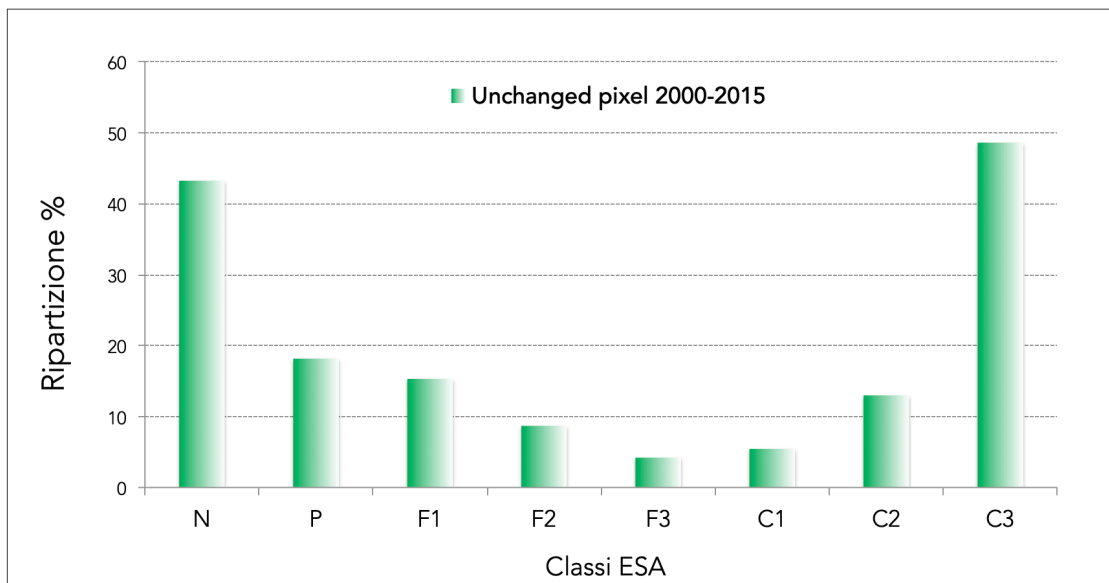


Figura 40b. Ripartizione percentuale, tra classi ESA, dei *pixel* senza variazioni di punteggio nei 4 periodi considerati.

#### 4.3.2 Le variazioni complessive della Sensitività Ambientale nell'intero periodo considerato

Nel presente paragrafo vengono analizzati gli andamenti complessivi che i singoli *pixel* hanno avuto sia come indice ESA e sia nelle tre qualità relative al Clima alla Vegetazione e al Management. Questa valutazione viene effettuata tenendo conto sia della pendenza della retta di regressione calcolata sui quattro valori di ogni *pixel* (relativi ai quattro periodi), sia analizzando la loro variabilità nel tempo. Questi dati permettono una valutazione dei trend della SA nelle differenti zone della terra anche se relativa tra variabili ed ESA, e, soprattutto, interna al periodo considerato in quanto l'arco temporale disponibile è troppo breve per più robuste proiezioni future (cfr. cap. 3.7.). Nelle figure che seguono (Figure 41, 41a, 42, 43, 44) sono riportati gli andamenti dei coefficienti *b* calcolati per i quattro indici intermedi e per l'indice ESA, sia sui valori continui che sulle classi. Dalla analisi delle mappe rappresentate nelle Figure 41, e 41a si può innanzitutto notare che, al di là della ciclicità degli andamenti analizzati nel precedente paragrafo, questa non conduce, in molte aree, al ripristino delle condizioni iniziali del sistema mentre esprime la presenza di una tendenza al peggioramento o al miglioramento, seppur all'interno di sequenze cicliche.



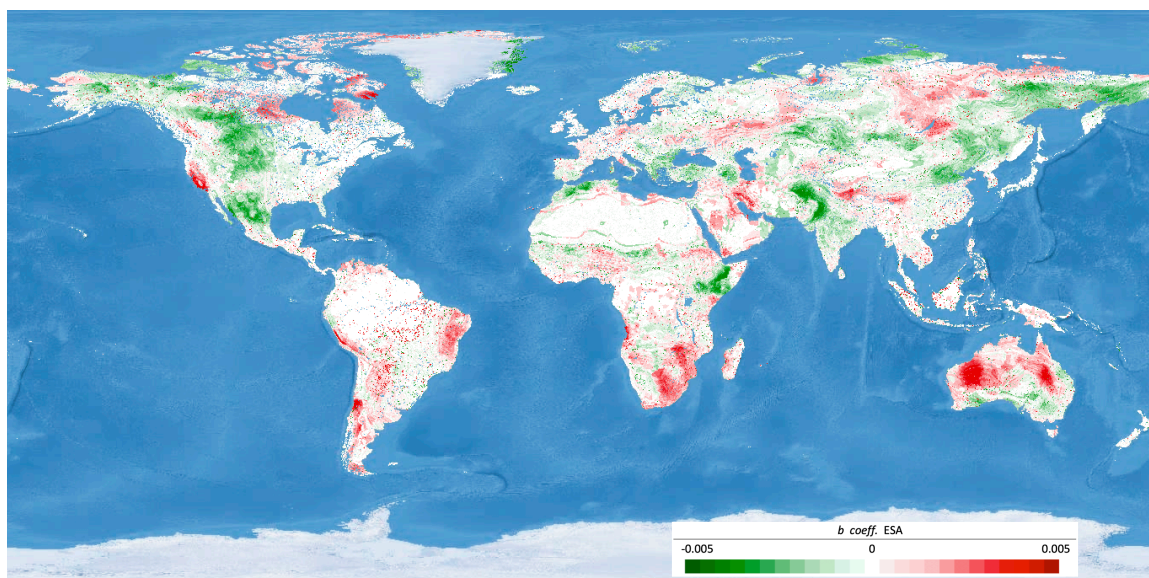


Figura 41. Andamento del coefficiente  $b$  della retta di regressione tra i valori di ESA 2000-2015.

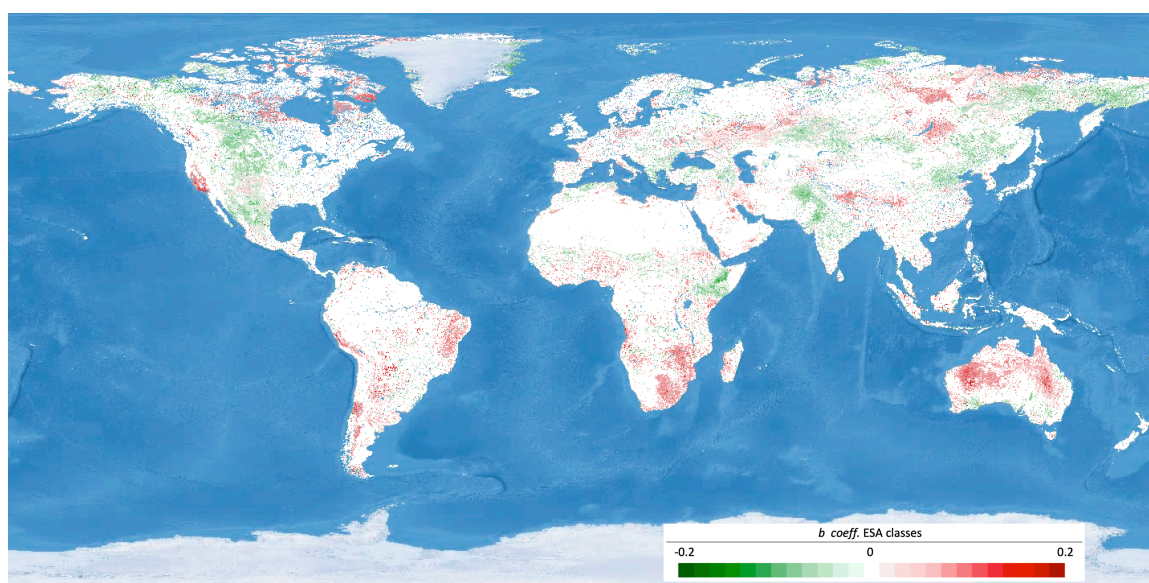


Figura 41a. Andamento del coefficiente  $b$  della retta di regressione tra i valori delle classi ESA 2000-2015.

Un altro aspetto di rilievo è rappresentato dal differente comportamento degli andamenti presenti nelle due Figure 41 e 41a. Infatti mentre la prima esprime le variazioni dell'indice ESA nel periodo considerato, la seconda valuta se quei cambiamenti hanno prodotto un cambiamento di classe di sensibilità. La distinzione è infatti importante in quanto, di là delle differenze cromatiche dovute alle diverse scale e distribuzioni dei valori presenti, gli andamenti della prima mappa risentono delle posizioni di partenza dei valori rispetto ai successivi andamenti e quindi si può verificare il caso che

variazioni forti non producano un cambio di classe (e quindi non siano rappresentati nella seconda mappa), mentre, con valori vicini a quelli delle classi, basse variazioni possono provocare un passaggio di classe. Rispetto ai fenomeni evidenziati possiamo notare l'andamento positivo complessivo in numerose aree della terra (zone centrali dell'America e dell'Asia, il corno d'Africa, ampie zone dell'est di Cina e Russia, dell'India, Pakistan e Afghanistan), mentre andamenti negativi con aumento della sensibilità ambientale si riscontrano soprattutto in America del Sud, nelle zone a Sud dell'Africa e in Australia. Dalla distribuzione spaziale dei coefficienti  $b$  riportati in Figura 42 risulta evidente la correlazione degli andamenti tra questa mappa e quelle dell'ESA sopra riportate e, di conseguenza, il ruolo e l'impatto che il clima ha sulla sensibilità complessiva.

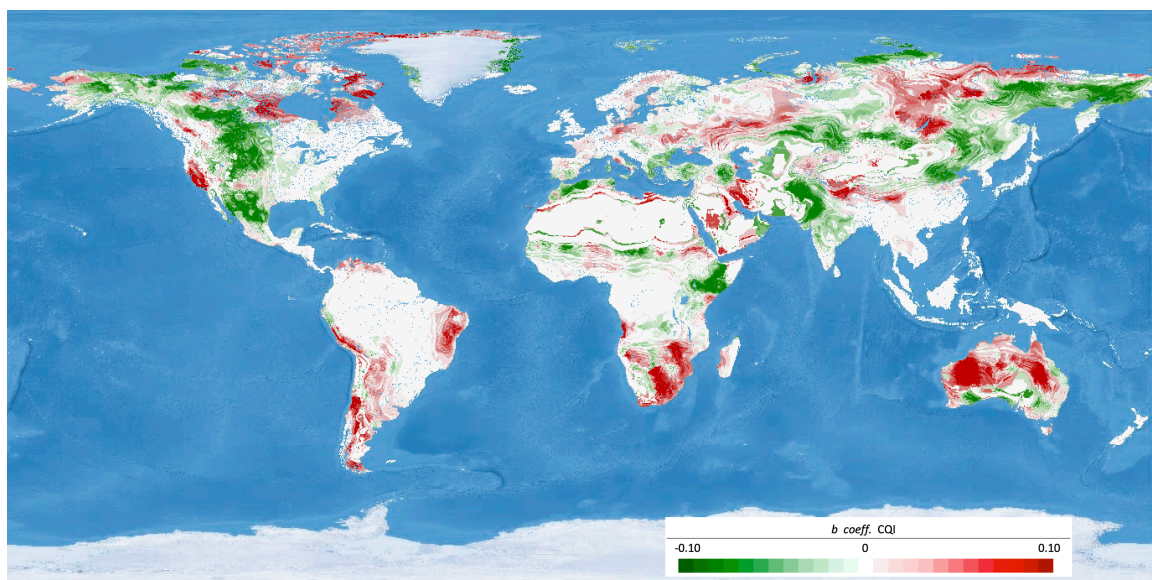


Figura 42. Andamento del coefficiente  $b$  della retta di regressione tra i valori di CQI 2000-2015.

Inoltre dalla analisi comparata delle differenze tra i periodi considerati dell'indice CQI (Figura 42) si può notare come l'elevata ciclicità degli andamenti periodici (linee verdi e blu di inizio e fine ciclo e linea rossa intermedia) non portino ad un completo ritorno ai valori di partenza, come evidenziato in Figura 42



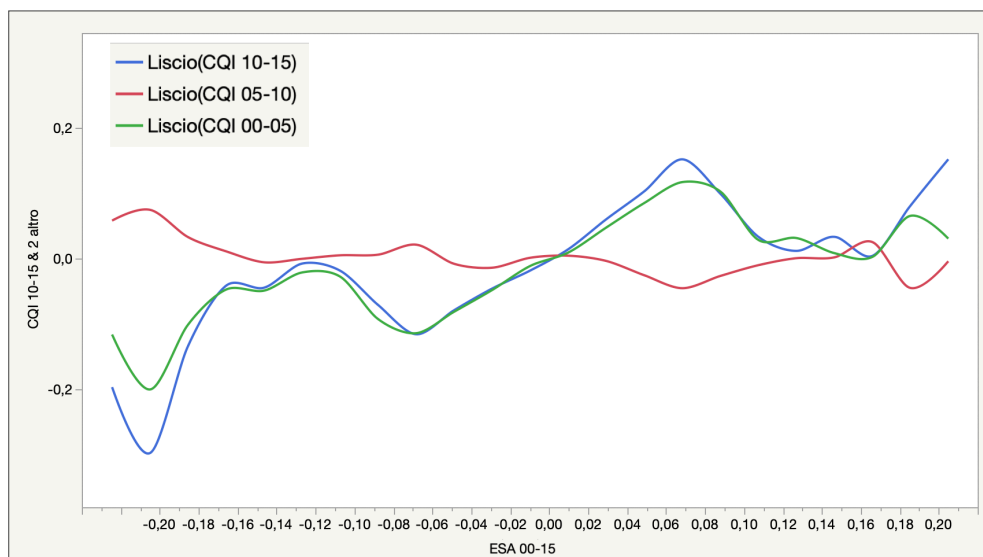


Figura 42. Andamento delle differenze dell'indice CQI tra i tre intervalli temporali rispetto alle variazioni complessive dell'indice ESA tra 2000-2015.

Le mappe riportate nelle Figure 43, 44 rappresentano invece il contributo della vegetazione e del management ai valori complessivi di sensitività ambientale (indice ESA). Dalla loro analisi si conferma, seppur con alcune distinzioni, l'andamento complessivamente molto differente rispetto al clima con un impatto sui sistemi territoriali globali importante e persistente. In particolare la vegetazione presenta una tendenza complessiva al miglioramento e una tendenza localizzata al peggioramento, dato risultante delle due principali componenti della VQI, uso del suolo e copertura vegetale.

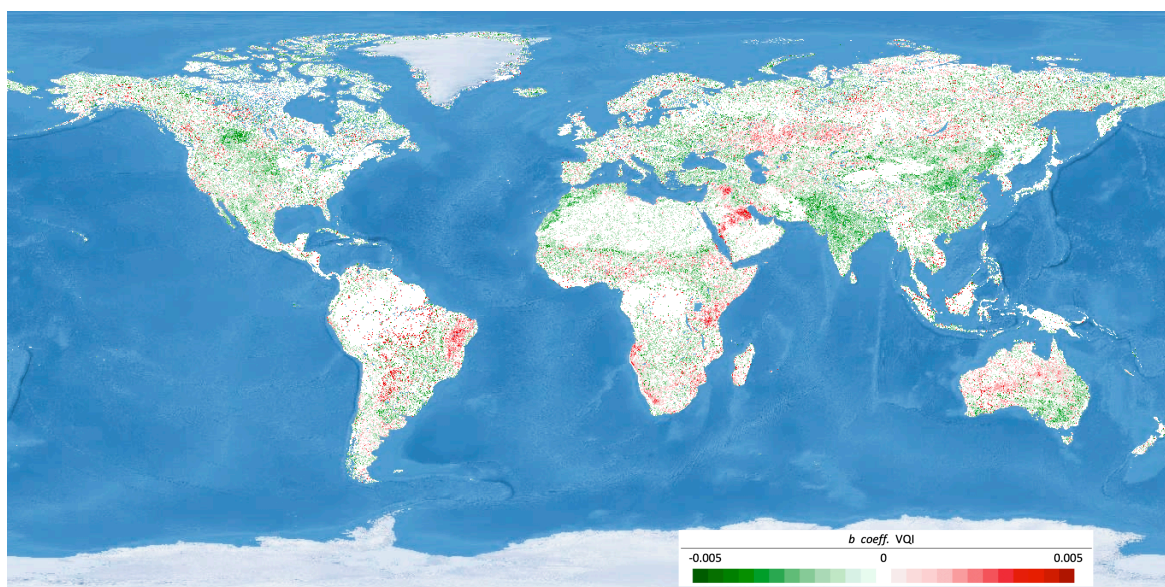


Figura 43. Andamento del coefficiente b della retta di regressione tra i valori di VQI 2000-2015.

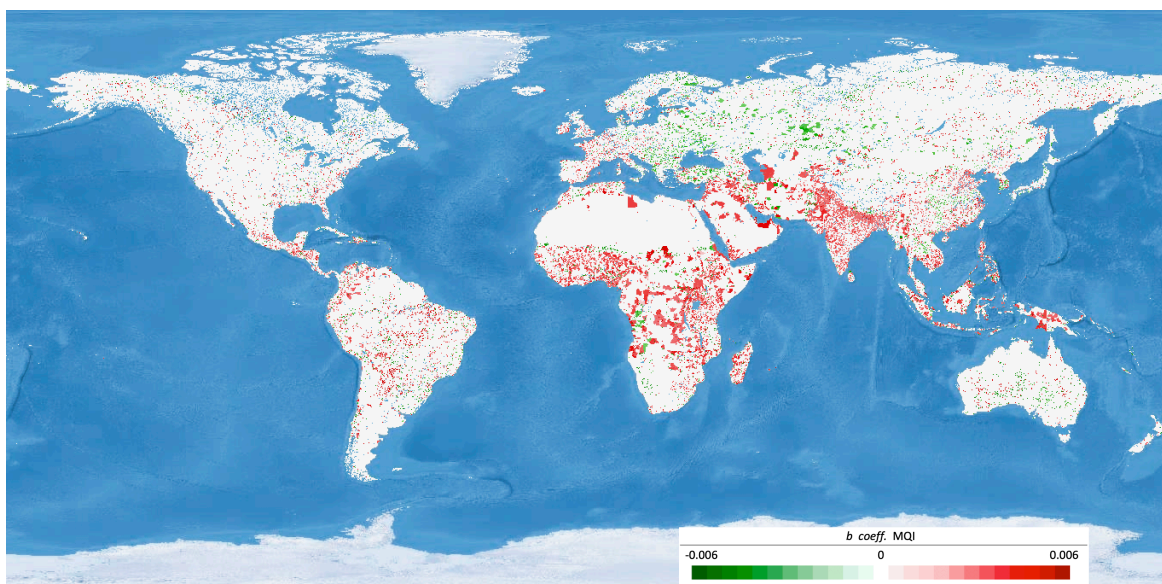


Figura 44. Andamento del coefficiente  $b$  della retta di regressione tra i valori di MQI 2000-2015.

Infatti i cambiamenti di uso del suolo sono rapidi e persistenti soprattutto quando dovuti ad un diverso sfruttamento del territorio (agricoltura su aree precedentemente poco o non utilizzate, o coltivazioni a maggior impatto ambientale) prevalentemente ad impatto negativo, la copertura vegetale invece presenta un miglioramento (seppur molto lieve) complessivamente diffuso dovuto alla probabile differente ciclicità dell'NDVI (alla base del calcolo della Plant cover), in ritardo rispetto a quella dei parametri climatici, anche se occorrono più osservazioni nel tempo per avvalorare questa ipotesi. Il *management* si conferma infine come una componente ad alto impatto e alta persistenza in molte zone della terra (Sudamerica, Africa centrale, India, Malesia, Indonesia. Filippine e Nuova Guinea), sia per quanto riguarda la popolazione che l'uso del suolo. Nella Figura 45 sono riportate infine le medie dei coefficienti  $b$  delle tre *quality* e dell'indice ESA in funzione delle classi ESA.

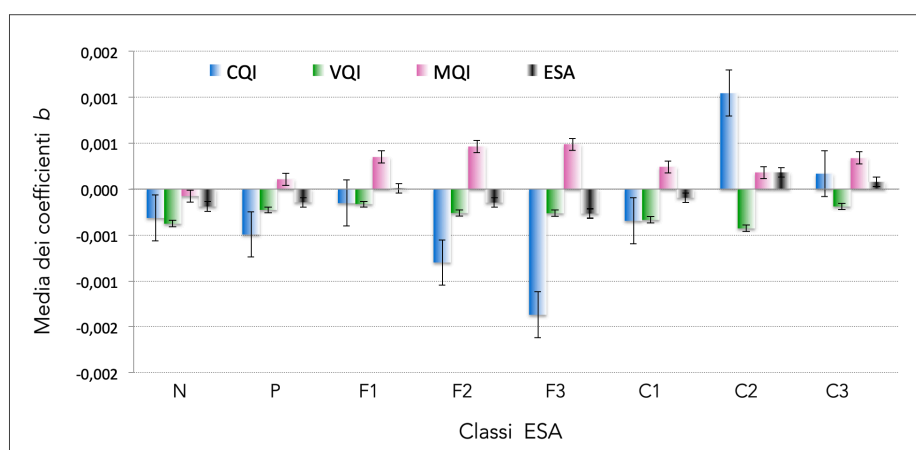


Figura 45. Medie dei coefficienti  $b$  delle tre *quality* e dell'indice ESA in funzione delle classi ESA (con barre di errore standard).

Gli andamenti delle variabili riportati in Figura 45 chiariscono come le aree con qualità del clima (CQI) in peggioramento appartengano alle classi di maggiore criticità (peggiorando ulteriormente una situazione già critica), mentre quelle in miglioramento permettono di influire positivamente su situazioni di fragilità (F2, F3) dovute ad altri fattori. Il *management* (MQI) conferma gli andamenti complessivi delle mappe, dimostrandosi una variabile a elevato e distribuito impatto negativo sulla evoluzione dei sistemi soci-ecologici. La componente vegetazionale conferma questa sua duplice influenza: locale (positiva e negativa) e globale (positiva) già evidenziata nella cartografia esaminata. Infine, l'indice ESA complessivo conferma una variazione lievemente positiva nelle classi di bassa e intermedia sensibilità (P, N, F2, F3, C1) e una variazione leggermente negativa sulle classi a maggiore criticità (C2 e C3). A completamento delle analisi precedenti, la Figura 46 rappresenta la distribuzione spaziale della variabilità dell'indice ESA nel tempo (deviazione standard dell'indice ESA nel tempo), che conferma quanto rappresentato nelle Figura 40a e 40b ovvero la minore variabilità temporale nelle aree a maggiore e minore sensibilità ambientale (Amazzonia e aree Sahariane, ad esempio).

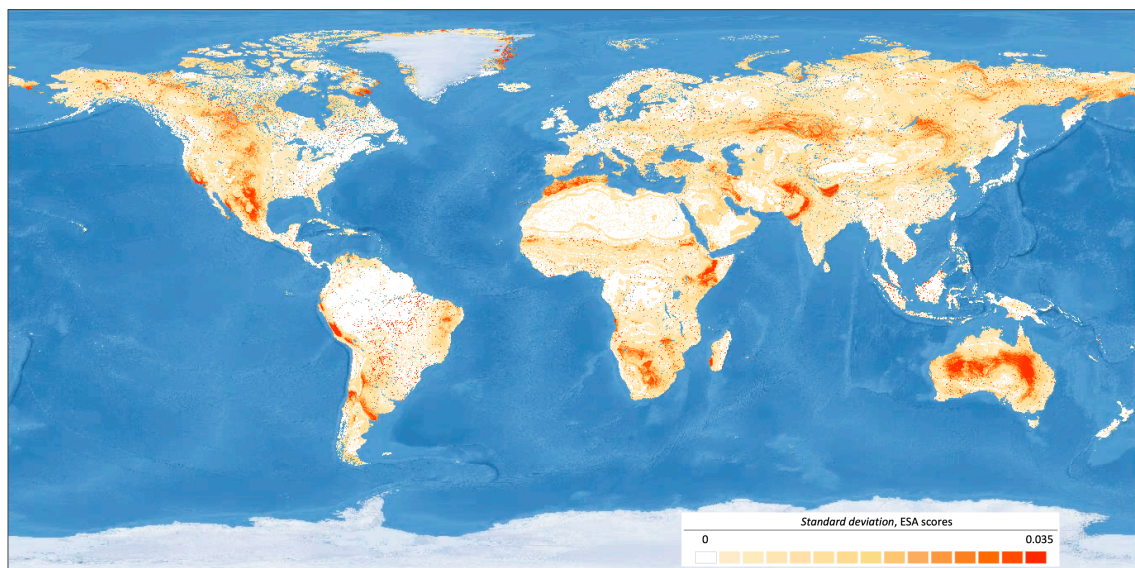


Figura 46. Distribuzione nello spazio della deviazione *standard* relativa ai punteggi dei quattro indici ESA (2000, 2005, 2010, 2015).

A sostegno delle precedenti analisi nelle Figure 47 e 48 viene riportato il dendrogramma (relativo alla Analisi dei *Cluster* eseguita sui coefficienti *b* relativi alle tre qualità CQI, VQI, MQI e alle classi ESA) e il corrispondente plot della Costellazione dei cluster. Nella analisi sono state individuati 9 *cluster*, che, per similitudine, aggregano nove differenti livelli e tipologie di comportamento nella evoluzione

temporale dei principali indici di sensibilità ambientale. Tale evoluzione temporale è rappresentata graficamente con un gradiente di colore dal blu al rosso in funzione di variazioni dell'indice ESA da meno critiche a più critiche.

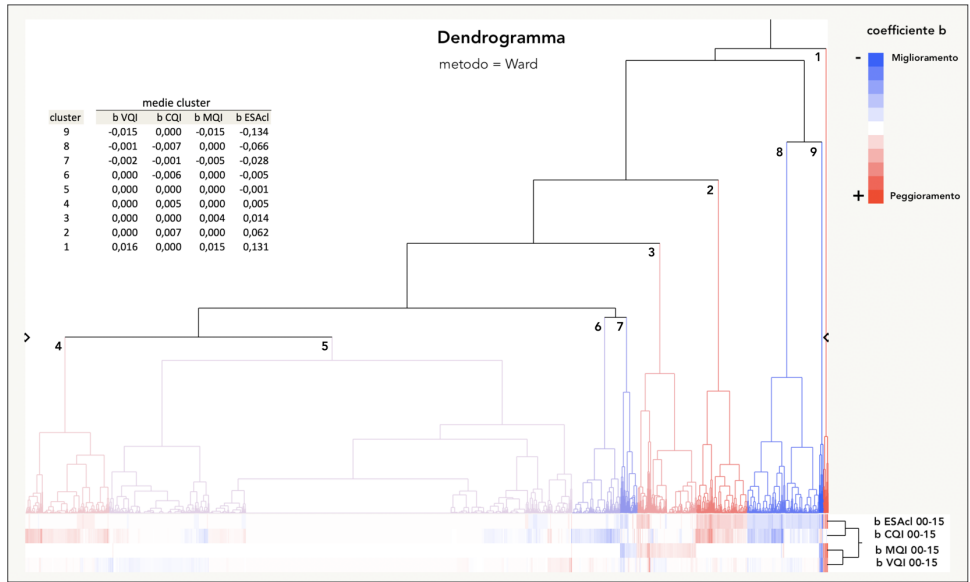


Figura 47. Dendrogramma relativo alla Analisi dei cluster sui coefficienti b delle rette di regressione calcolati sugli indici di sensibilità ambientale intermedi e finali (Qualità e classi ESA). I colori indicano i differenti gradi di variazione.

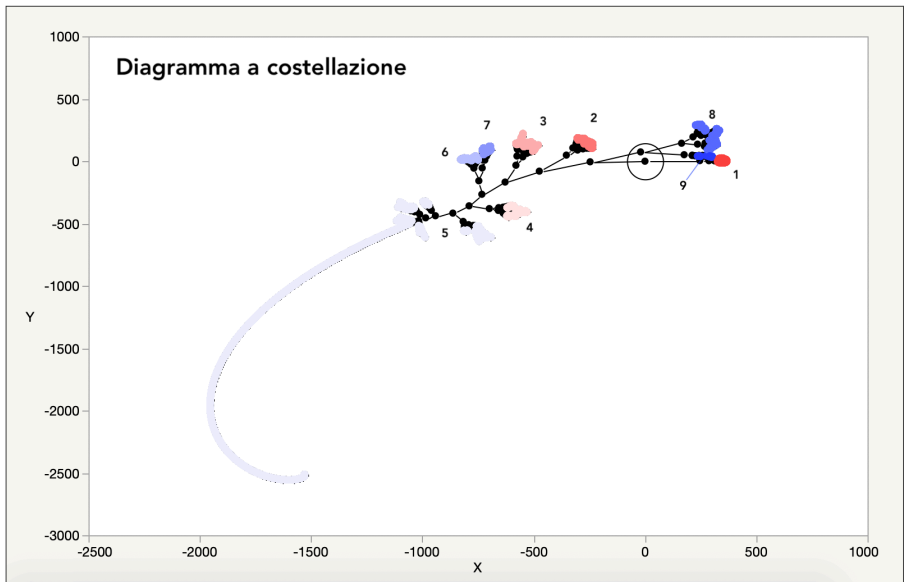


Figura 48. Diagramma a costellazione relativo alla Analisi dei cluster.



Dalla analisi delle due figure risulta evidente come i *cluster* con un peggioramento (da quello lievissimo del *cluster* 5 a quello sempre più consistente dei *cluster* 4, 3, 2 e 1) sono sicuramente prevalenti a livello mondiale, rispetto a quelli in miglioramento. Questi ultimi però presentano una maggiore consistenza rispetto agli equivalenti in peggioramento (i due ultimi *cluster* in miglioramento migliorano maggiormente rispetto agli ultimi due in peggioramento). Dalla analisi della Figura 47 si vede inoltre come il clima incida fortemente nella formazione dei *cluster* con maggiori e minori variazioni complessive mentre si conferma il ruolo chiave della vegetazione e il *management* nella definizione dei livelli di sensibilità ambientale a scala locale. Il grafico a costellazione in Figura 48 mostra infine come i *cluster* 1, 8, e 9 abbiano una distanza simile a quella con gli altri *cluster*, confermando la loro diversità rispetto al comportamento di quelli rimanenti. Nella Figura 49 è infine riportata la distribuzione, per nazione, dei *cluster* (come media del numero identificativo del *cluster*). Gli andamenti riportati confermano quelli indicati in precedenza (cfr. cap. 4.3.1), anche se con le dovute approssimazioni.

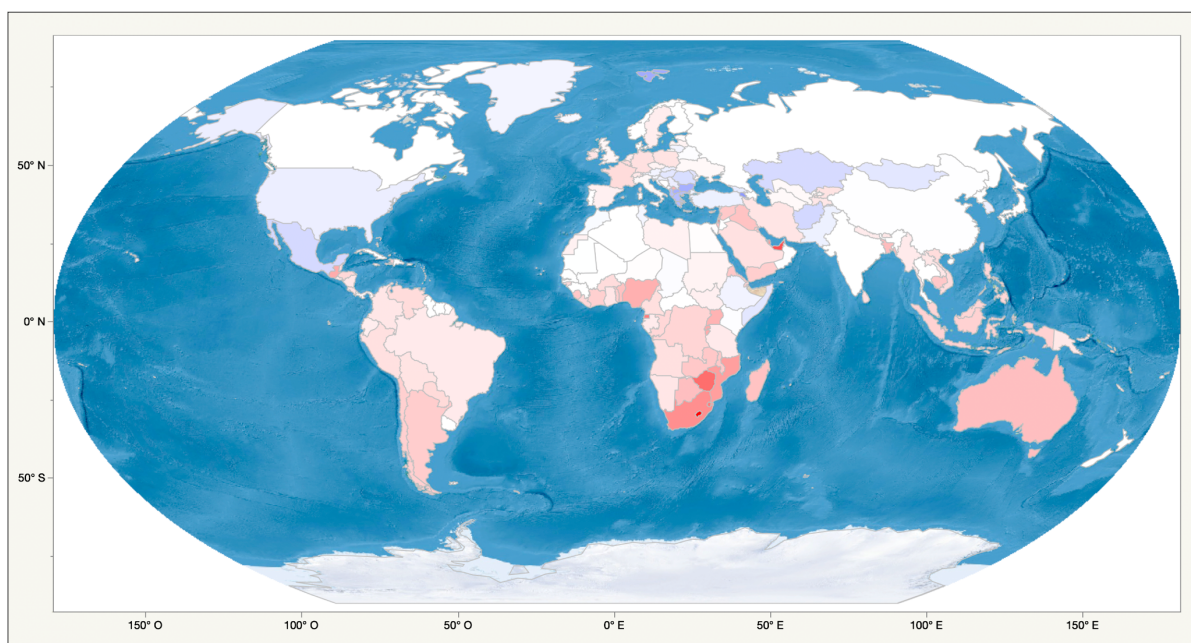


Figura 49. Distribuzione dei cluster per nazione (media del numero identificativo del *cluster*). Le gradazioni di rosso indicano una presenza di *cluster* con valori degli indici (CQI, VQI, MQI, ESAcl) in peggioramento, quelle blu il contrario.

Eseguendo una infine una Analisi delle Componenti Principali sugli stessi 4 strati di base si può scomporre il contributo al cambiamento nel tempo degli strati intermedi su quello finale (CQI, VQI, MQI, ESAcl). Dalla analisi dei diagrammi riportati nelle Figure 50 e 51 si può innanzitutto vedere come le prime due componenti descrivano, da sole quasi il 90% della varianza complessiva. In particolare

management e vegetazione (PC1) contribuiscono maggiormente al peggioramento temporale dell'ESA soprattutto laddove il clima rappresenta un fattore a minore variabilità. La seconda componente invece, rappresentata per intero dal clima, agisce come fattore di fondo nella definizione delle velocità di cambiamento. Queste analisi trovano ulteriore conferma in Figura 51 dove si può vedere quanto le variabili siano rappresentate dalle differenti componenti principali (ovvero si può valutare quante componenti principali sono necessarie per rappresentare una variabile). Si noti infine l'andamento dei colori nel diagramma degli score che rappresenta le velocità di miglioramento o peggioramento riportate nel dendrogramma in Figura 48, in coerenza con i risultati della PCA.

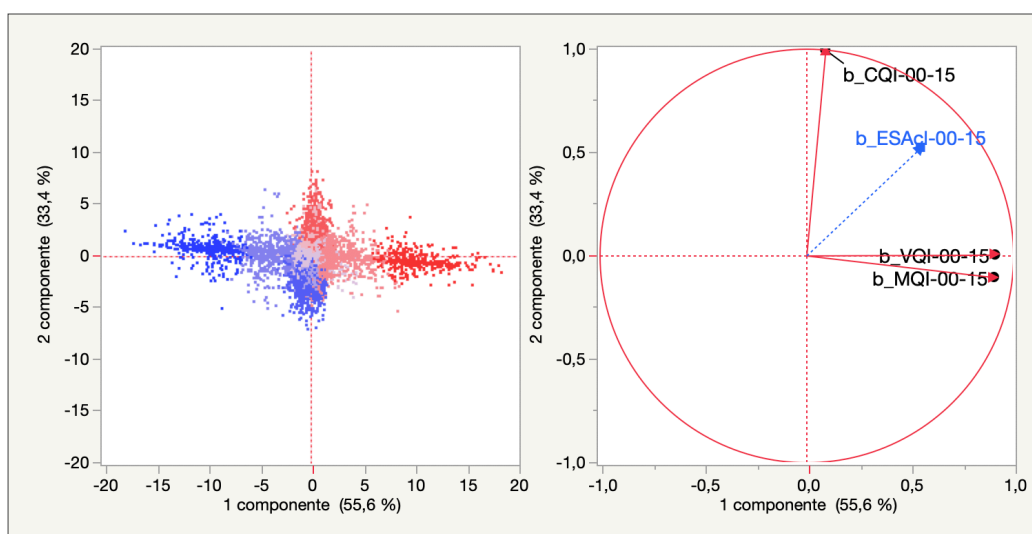


Figura 50. Diagrammi degli score (a sinistra), degli autovalori (a destra).

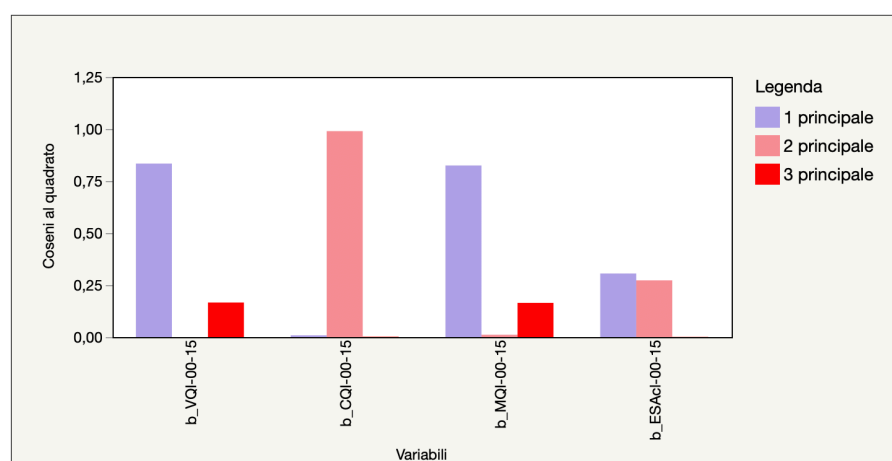


Figura 51. Diagramma dei coseni al quadrato delle variabili.

#### 4.4. Rapporti tra SQI e variabili *fast and slow*

Come indicato in precedenza, le variabili relative al suolo contribuiscono in maniera significativa alla determinazione dei differenti livelli di SA ai processi di LDD (indice ESA). Tuttavia, nelle analisi sulle variazioni dello stato dei sistemi territoriali nel tempo, queste rimangono costanti, in considerazione delle loro stesse caratteristiche per le quali si possono ipotizzare tempi molto lunghi per eventuali, e non sempre scontati, cambiamenti: si pensi ad esempio alla tessitura, alla roccia madre o alla pendenza. In tale ambito esse agiscono quindi come elemento di maggiore o minore capacità di compensazione dei cambiamenti indotti dalle altre variabili del sistema. La loro distribuzione spaziale e il generale disaccoppiamento rispetto agli andamenti delle altre Qualità come illustrato in Figura 52, conferma la maggiore o minore capacità di contribuire alla resilienza complessiva dei differenti sistemi territoriali nei diversi ambiti che si ritrovano a livello globale.

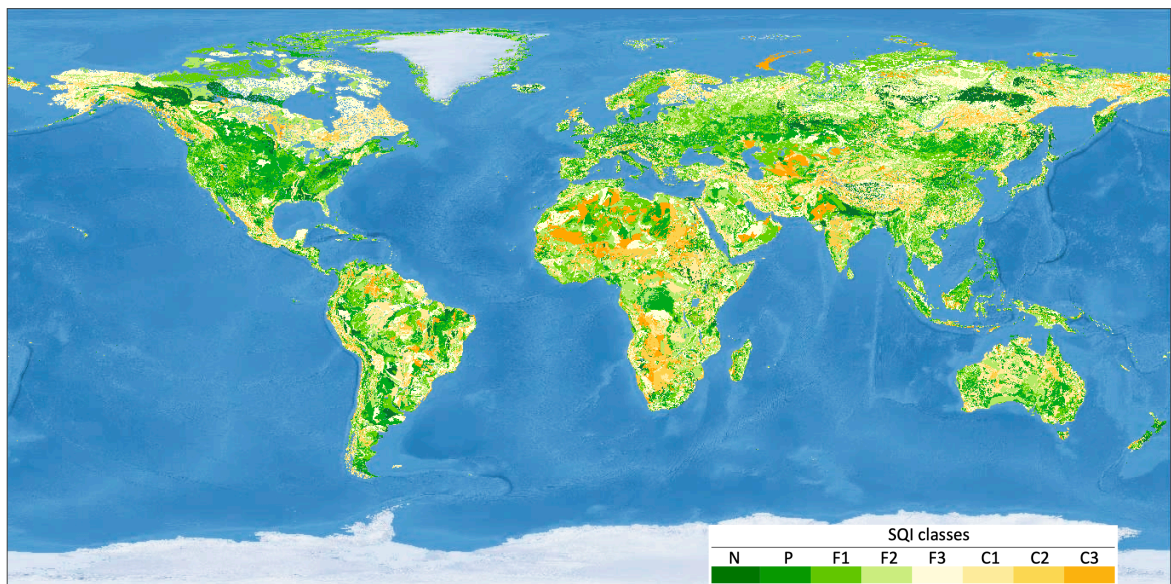


Figura 52. Distribuzione nello spazio delle differenti classi di qualità del Suolo.

Queste considerazioni sono confermate dagli andamenti sulle variazioni dei sistemi socio-ecologici a livello mondiale tra il 2000 e il 2015 riportati in Figura 53, dove alle differenti classi di qualità del suolo corrisponde una pressoché uniforme distribuzione dell'impatto complessivo dell'MQI e del VQI e, in minor misura, del CQI.

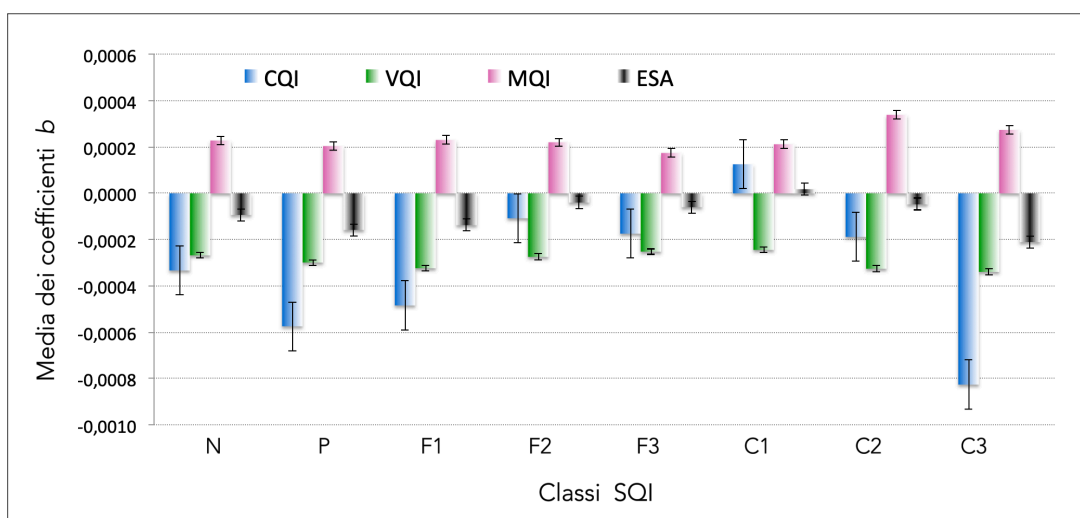


Figura 53. Medie dei coefficienti b di CQI, VQI, MQI in funzione delle classi qualità del Suolo.

La Figura 53 e la Figura 54 confermano inoltre come, a fronte di andamenti negativi (miglioramenti) di VQI e CQI, e a parità di impatti dell'MQI, nelle classi di suolo migliori, si abbia un corrispondente miglioramento dell'indice ESA complessivo, miglioramento che diminuisce al passaggio verso le classi F e C1 e C2. L'andamento della classe C3 conferma l'influenza positiva del clima e della vegetazione anche in arre a bassa qualità dei suoli. Ovviamente questi effetti assumono una evidenza maggiore e maggiormente chiara, a scale locali, come vedremo in seguito.

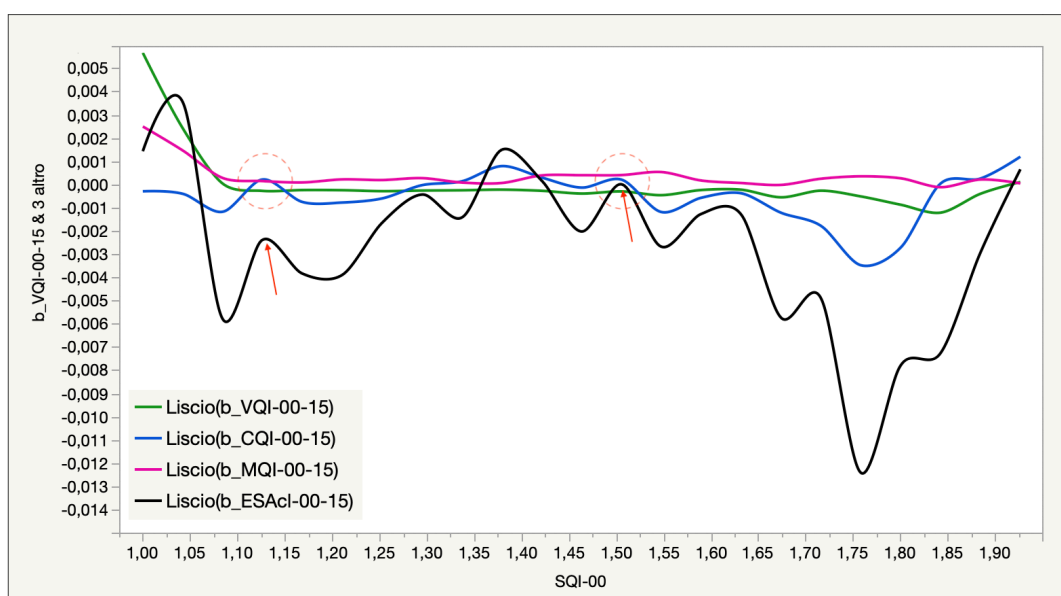


Figura 54. Andamento dei coefficienti b di CQI, VQI, MQI in funzione delle classi di qualità del Suolo.

#### 4.5. Casi di studio (*Hot-Spots*)

Le analisi dei cambiamenti dell'indice ESA nel tempo e delle variabili che lo compongono (Clima, Suolo, Vegetazione e *Management*) rappresentano e definiscono, a livello globale, un quadro chiaro sulle relazioni tra le variabili di input e livelli di LDD espressi dall'indice ESA, mostrando una dualità di comportamento tra le variabili climatiche e quelle di vegetazione e *management*, con comportamenti sostanzialmente ciclici in alcune aree, e quindi a minore persistenza temporale, del clima e cambiamenti soprattutto unidirezionali e a maggiore persistenza, delle seconde. Questo dualismo nella evoluzione temporale appare evidente dalle analisi a scala globale condotte in precedenza come anche appare evidente una differenziazione spaziale di tali fenomeni, localmente anche molto diversi tra loro (si veda a solo titolo di esempio la Figura 41a).

Questa dualità di comportamento nel tempo e nello spazio tra scala globale e scala locale verrà di seguito approfondita con analisi di maggior dettaglio condotte su alcuni casi esemplificativi (*Hot Spots*) attraverso un approccio basato sull'uso integrato di differenti strumenti di analisi, concettualmente riconducibile alle tecniche di *Knowledge Discovery in Databases*. A livello globale, moltissime sono le aree che presentano situazioni localmente interessanti e caratteristiche; la scelta di questi necessariamente pochi *Hot Spots* è del tutto esemplificativa di un approccio metodologico che è stato differenziato sulle tre qualità in esame (management, clima e vegetazione) e ovviamente non esaustiva,

##### 4.5.1. *Hot Spot 1, impatto della popolazione*

Il primo caso di studio permette di evidenziare l'entità e la velocità dell'impatto prodotto sul sistema socio-ecologico nell'area del Guangdong (Hong Kong) in Cina dalle variazioni delle variabili considerate nel sistema ESA (clima, vegetazione e management). Nella Figura 55 è rappresentata la variazione degli indici di sensitività ambientale delle tre qualità CQI, VQI e MQI, calcolati, per ogni singolo *pixel*, come coefficiente *b* della linea di tendenza (considerando, per ogni *pixel*, i valori degli indici nei tre periodi considerati 2000-2015). Valori *b* negativi (*pixel* verdi) indicano un miglioramento della sensitività ambientale, quelli positivi (*pixel* rossi), un peggioramento (confronta paragrafo 3.7-3).



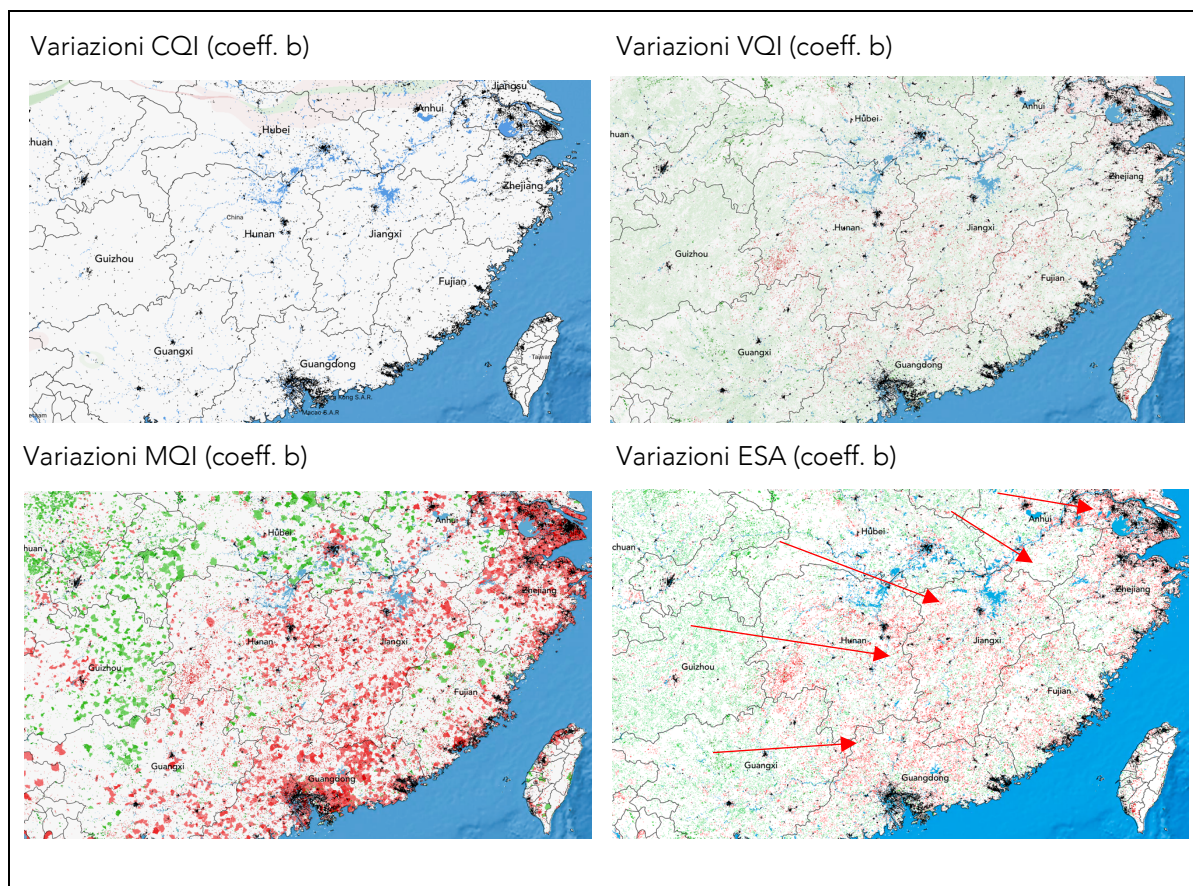


Figura 55. Andamento dei coefficienti b di CQI, VQI, MQI ed ESA nell'intervallo 2000-05-10-15

Dalla analisi delle mappe in Figura 55 si può notare come negli ultimi 20 anni ci sia stato un peggioramento della sensibilità ambientale (variazioni ESA) nelle province costiere a fronte di un miglioramento dei valori ESA delle zone più interne. Questo peggioramento è stato determinato soprattutto dalla variazione della popolazione associato ad un aumento, seppur modesto, della *Land Use Intensity*. Questo è confermato anche dal comportamento della vegetazione nelle zone interne, che presenta vaste aree di miglioramento (soprattutto nelle aree con vegetazione naturale, semi-naturali o mista). Il clima invece non ha avuto variazioni significative.

Nella Figura 56 è rappresentato il comportamento degli indici di qualità (CQI, VQI e MQI) rispetto alle categorie di uso del suolo. Gli andamenti confermano quanto indicato in precedenza: 1) la completa ininfluenza delle variazioni climatiche; 2) un leggero peggioramento dell'MQI e del VQI soprattutto in aree agricole, già caratterizzate alti valori di ESA, un peggioramento nelle aree riferite alle classi di Land cover 50 e 70, anche se a partire da condizioni di minore criticità e un miglioramento per la classe 120 (confronta Tabella S1). Da questi andamenti si può valutare che per le condizioni climatiche generalmente favorevoli, a fronte di variazioni significative della popolazione, non si siano verificati impatti significativamente negativi sulla vegetazione e sull'uso del suolo.



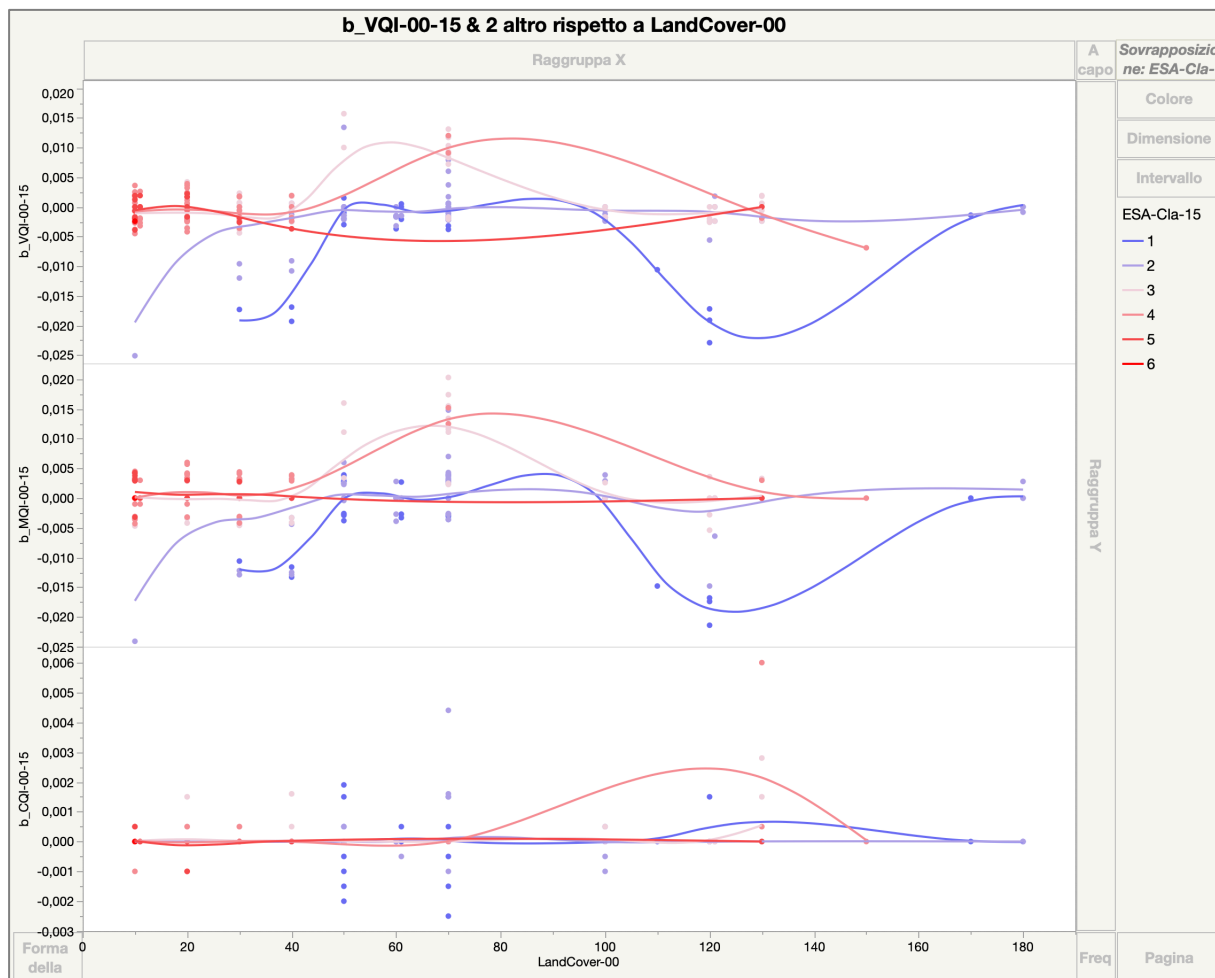


Figura 56. Andamento dei coefficienti b nelle differenti classi ESA, Qualità e Classi ESA nell'intervallo 2000-2015.

#### 4.5.2. Hot Spot 2, impatto del Clima

Questo secondo caso di studio permette di evidenziare l'entità e la velocità dell'impatto prodotto sul sistema socio-ecologico sul continente australiano dalle variazioni delle variabili del sistema (relative a clima, vegetazione e management). In analogia con le precedenti analisi, nella Figura 57 è rappresentata la variazione degli indici di sensibilità ambientale delle tre qualità CQI, VQI e MQI, calcolati, per ogni singolo *pixel*, come coefficiente b della linea di tenenza (considerando, per ogni *pixel*, i valori degli indici nei tre periodi considerati 2000-2015). Valori negativi (*pixel* verdi) indicano un miglioramento della sensibilità ambientale, quelli positivi (*pixel* rossi), un peggioramento (confronta paragrafo 3.7-3).

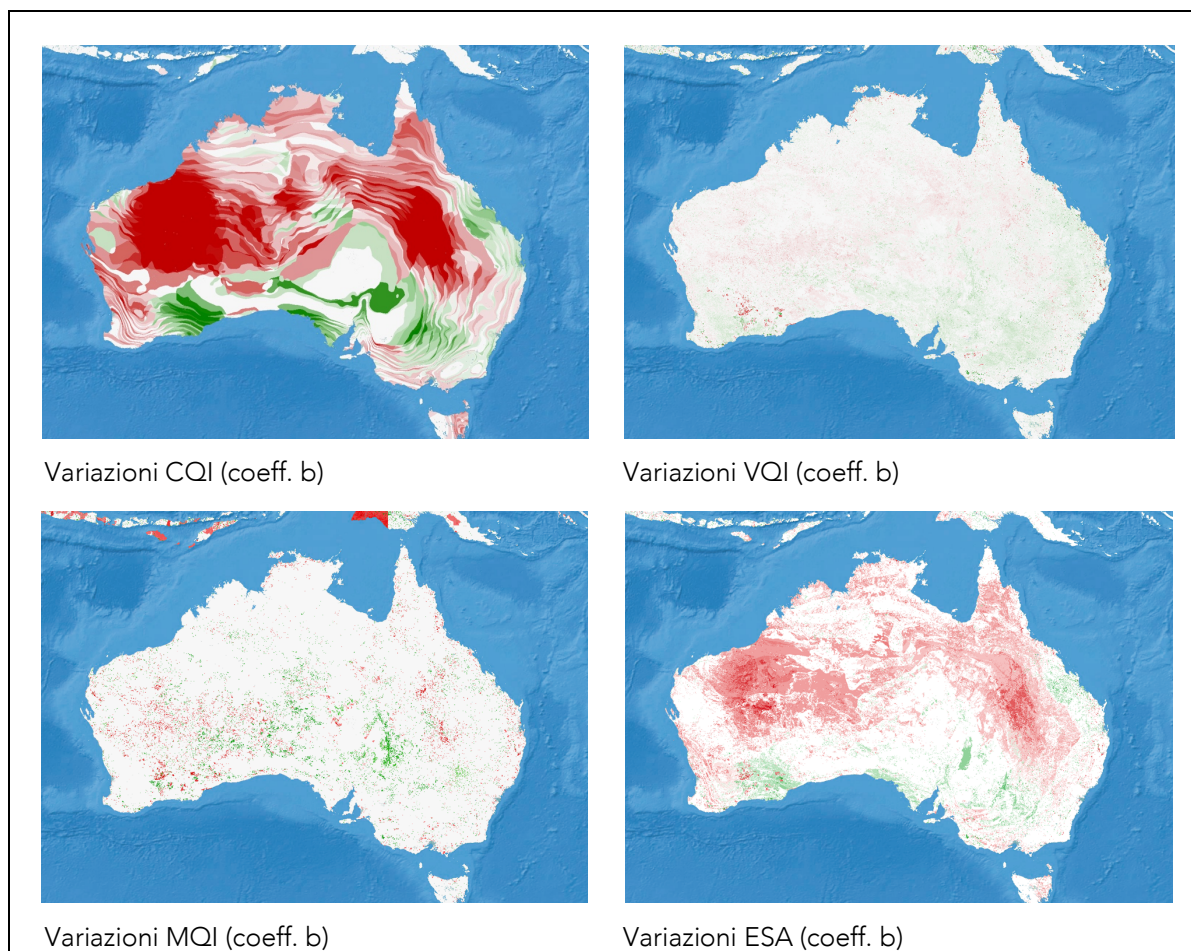


Figura 57. Andamento dei coefficienti b di CQI, VQI, MQI ed ESA nell'intervallo 2000-05-10-15

Dalla analisi delle mappe in Figura 57 si può notare come negli ultimi 15 anni ci sia stato un netto e consistente peggioramento della sensibilità ambientale (variazioni ESA) in molte aree interne del continente australiano. Questo peggioramento è da ascrivere in gran parte al persistente andamento negativo degli indici climatici (precipitazioni e indice di aridità) che in parte si è riflesso sulle condizioni della vegetazione e della LUI. Tali considerazioni sono confermate dagli andamenti delle variabili elementari presenti nel sistema per gli anni 2000-2015 rispetto alle *Quality* e all'ESA dello stesso periodo, rappresentati nel grafico delle componenti principali in Figura 58. In particolare, si può notare come i) le prime due componenti da sole spieghino quasi il 94% della variabilità; ii) l'andamento degli indici climatici nel tempo è coerente e consistente con le variazioni della CQI e dell'ESA; iii) le variazioni della MQI e della VQI hanno una scarsa influenza sull'andamento dell'ESA pur risentendo invece delle variazioni della CQI (variazione positiva nella prima componente principale dovuta soprattutto alla *plant cover* e alla LUI).

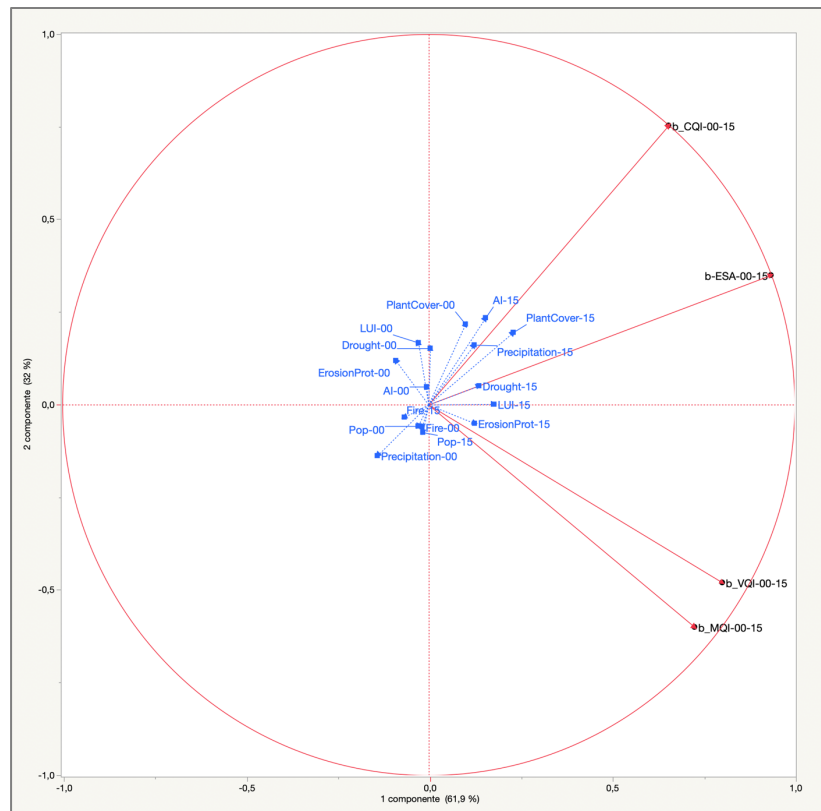


Figura 58. Prime due componenti della PCA effettuata sulle variazioni delle variabili elementari presenti nel sistema per gli anni 2000 e 2015 rispetto alle *Quality* e all'ESA dello stesso periodo.

Nella Figura 59 è rappresentato il comportamento degli indici di qualità (CQI, VQI e MQI) nel tempo, in funzione delle variazioni dell'ESA (espressi come coefficiente  $b$  della retta – vedi paragrafo 3.4-3). Gli andamenti, oltre a confermare la stretta correlazione tra variazioni degli indici climatici ed ESA già sottolineata in precedenza, evidenziano il comportamento delle variazioni nel tempo nelle differenti classi di sensibilità ambientale. In particolare va notato l'andamento delle classi a bassa sensibilità ambientale (linee blu) che risultano poco, mediamente e molto collegate in relazione alle tre qualità (CQI, VQI e MQI). Rispetto a quanto evidenziato nel precedente grafico delle componenti principali questo ci permette di valutare come, a fronte di una complessiva minore associazione tra variazioni temporali di VQI, MQI ed ESA, ci sia comunque stato un certo peggioramento nelle classi in passato meno vulnerabili (Classi ESA N, P, F1) soprattutto dovuto al peggioramento dei parametri della vegetazione e della LUI.

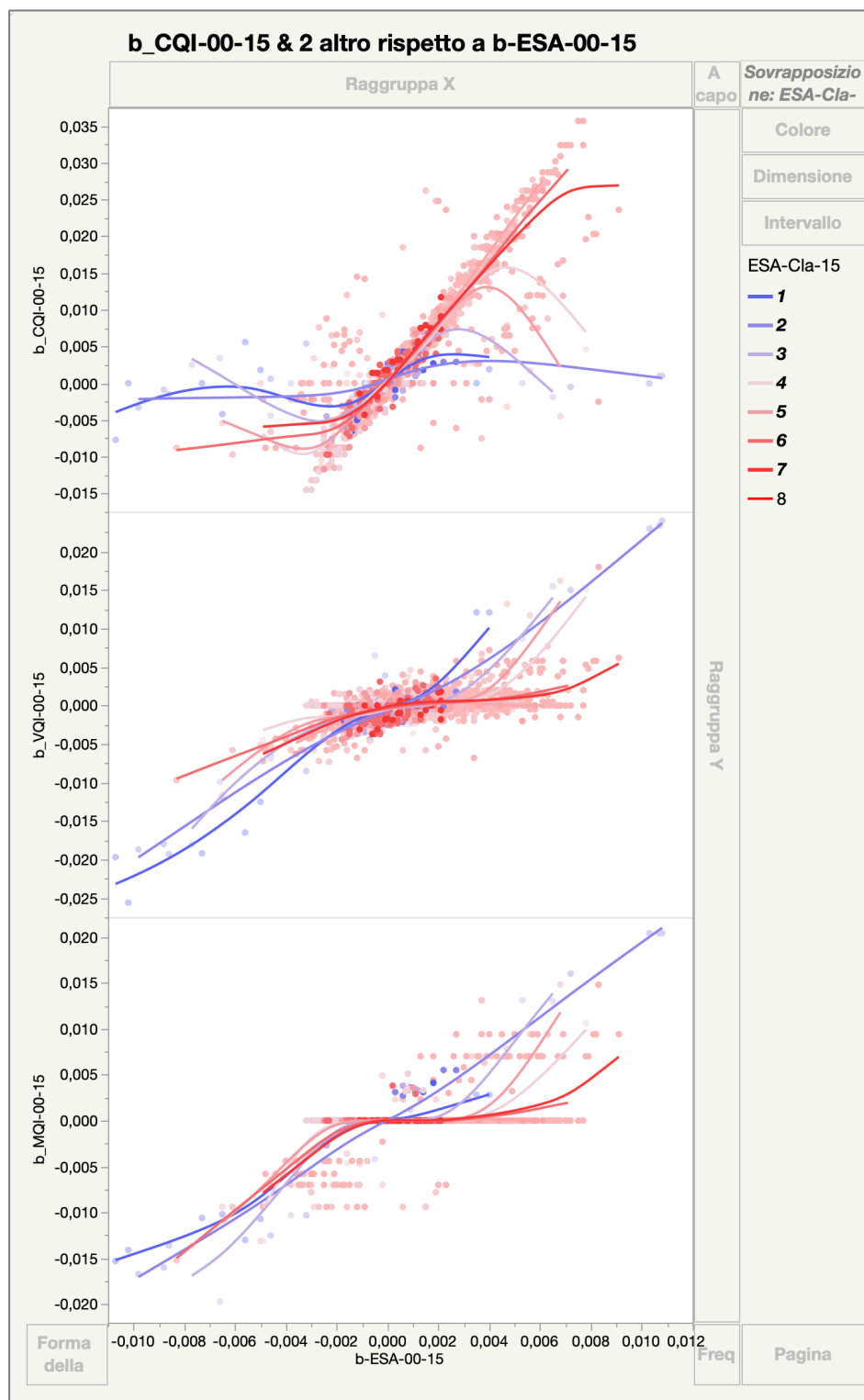


Figura 59. Andamento nel tempo (2000-2015) del coefficiente ESA rispetto alle tre Qualità (CQI, VQI e MQI) e alle classi ESA.



#### 4.5.3. Hot Spot 3, impatto della vegetazione e del management

Questo terzo caso di studio evidenzia l'entità e la velocità dell'impatto prodotto sul sistema socio-ecologico del rio Paranà e delle zone limitrofe della foresta amazzonica dalle variazioni occorse alle differenti variabili del sistema (clima, vegetazione e *management*) tra il 200 e il 2015. In Figura 60 sono rappresentate l'area in esame e le classi di copertura del suolo per gli anni 2000 e 2015.

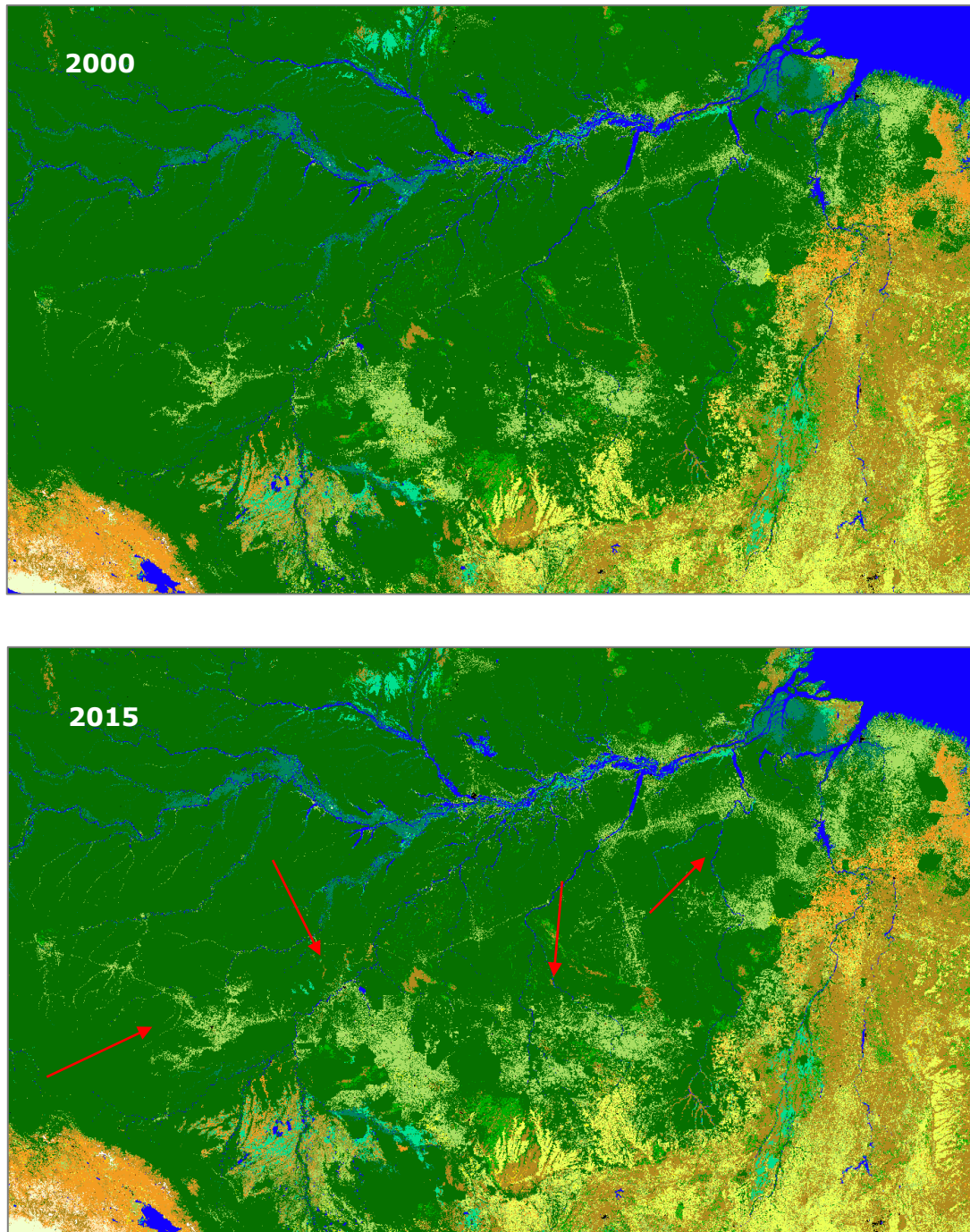


Figura 60. Rio Paranà e zone limitrofe. Classi di copertura del suolo per gli anni 2000 e 2015.

Quest'area del Rio Parana rappresenta un interessante esempio delle criticità socio-ecologiche indotte dall'uomo sull'equilibrio, e sulla natura stessa, dei delicati sistemi naturali della Amazonia, con evidenti e irreversibili cambiamenti occorsi in passato e continuati negli ultimi 15 anni considerati. In analogia con le precedenti analisi, nella Figura 57 è rappresentata la variazione degli indici di sensitività ambientale delle tre qualità CQI, VQI e MQI, calcolati, per ogni singolo *pixel*, come coefficiente *b* della linea di tendenza (considerando, per ogni *pixel*, i valori degli indici nei tre periodi considerati 2000-2015). Valori negativi (*pixel* verdi) indicano un miglioramento della sensitività ambientale, quelli positivi (*pixel* rossi), un peggioramento (confronta paragrafo 3.7-3).

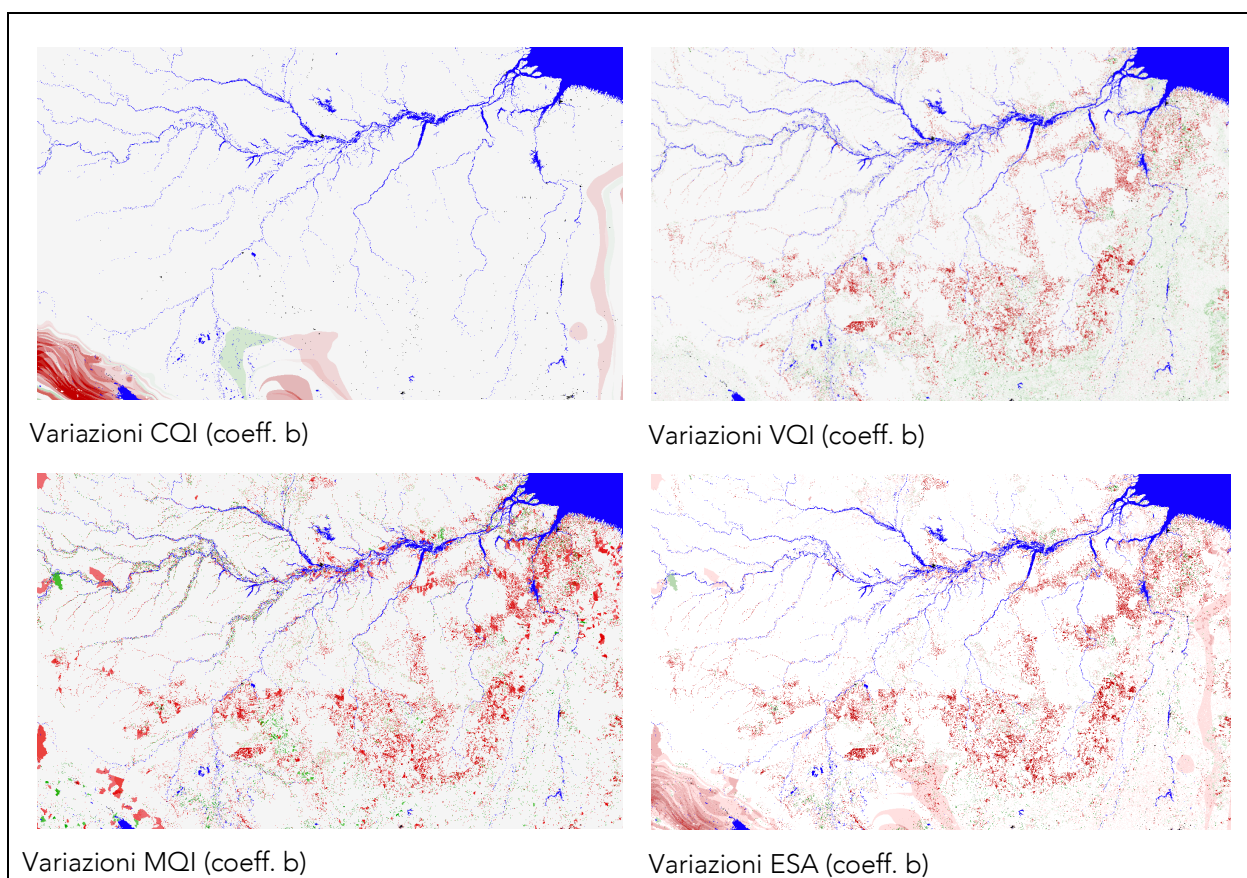


Figura 57. Andamento dei coefficienti *b* di CQI, VQI, MQI ed ESA nell'intervallo 2000-2015

Dalla analisi delle mappe in Figura 57 si può notare, anche in questo caso, come negli ultimi 15 anni ci sia stato un progressivo e consistente peggioramento della sensitività ambientale (variazioni di VQI, MQI ed ESA) in gran parte di questa area della foresta amazzonica.

Questo peggioramento è stato determinato dal crescente sfruttamento delle risorse naturali di quella area con un conseguente, determinante impatto sui livelli di sensitività ambientale. In particolare va notato come, a differenza del caso relativo all'*hot spot* 1, la possibilità di uno sfruttamento delle risorse



dell'area ha prodotto sostanziali cambiamenti e impatti sul territorio con un forte incremento della intensità di uso del suolo (LUI) che, associata all'incremento della popolazione, hanno prodotto un consistente peggioramento della qualità del uso del suolo e dei relativi livelli complessivi di sensibilità ambientale. In altre parole, la sostituzione delle foreste naturali con colture a ciclo annuale, con terreni abbandonati, aree improduttive, etc., ha innescato il progressivo impoverimento del suolo e la conseguente minore capacità biologica e produttiva.

Tali considerazioni sono confermate dai dati rappresentati nel diagramma dei coseni al quadrato delle variabili riportato in Figura 61, ottenuto dalla analisi delle componenti principali effettuata utilizzando le variabili relative a clima, vegetazione e *management* unitamente alle variazioni del coefficiente *b* dei cambiamenti occorsi tra il 2000 e il 2015 nelle qualità del clima, vegetazione e *management* ed ESA.

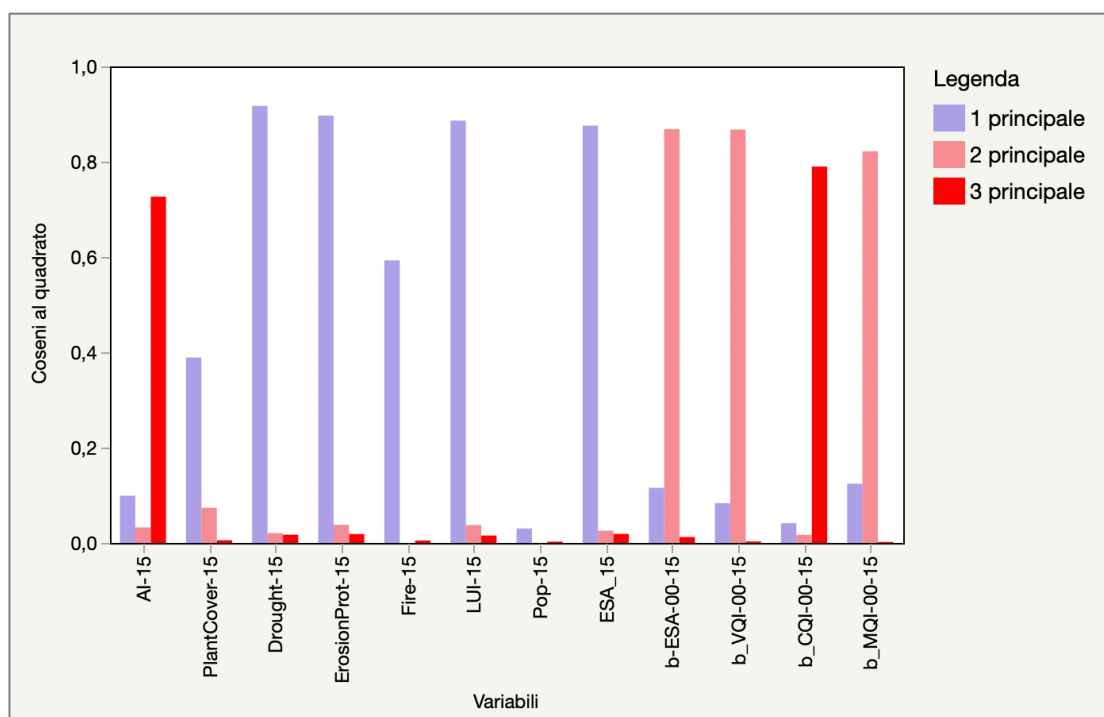


Figura 61. Diagramma dei coseni al quadrato delle variabili utilizza nella PCA.

Dalla analisi della Figura 61 si può innanzitutto notare come la prima componente principale sia espressione delle variabili della vegetazione e del LUI come maggiormente associate ai valori di ESA. La seconda componente esprime e conferma la stretta relazione che sussiste tra le variazioni della sensibilità ambientale (b-ESA-00-15) e variazioni di VQI ed MQI intercorse tra il 2000 e il 2015. Una ulteriore conferma di questo stretto legame tra variazioni di ESA, VQI e MQI, viene anche dalla analisi dei grafici riportati in Figura 62.

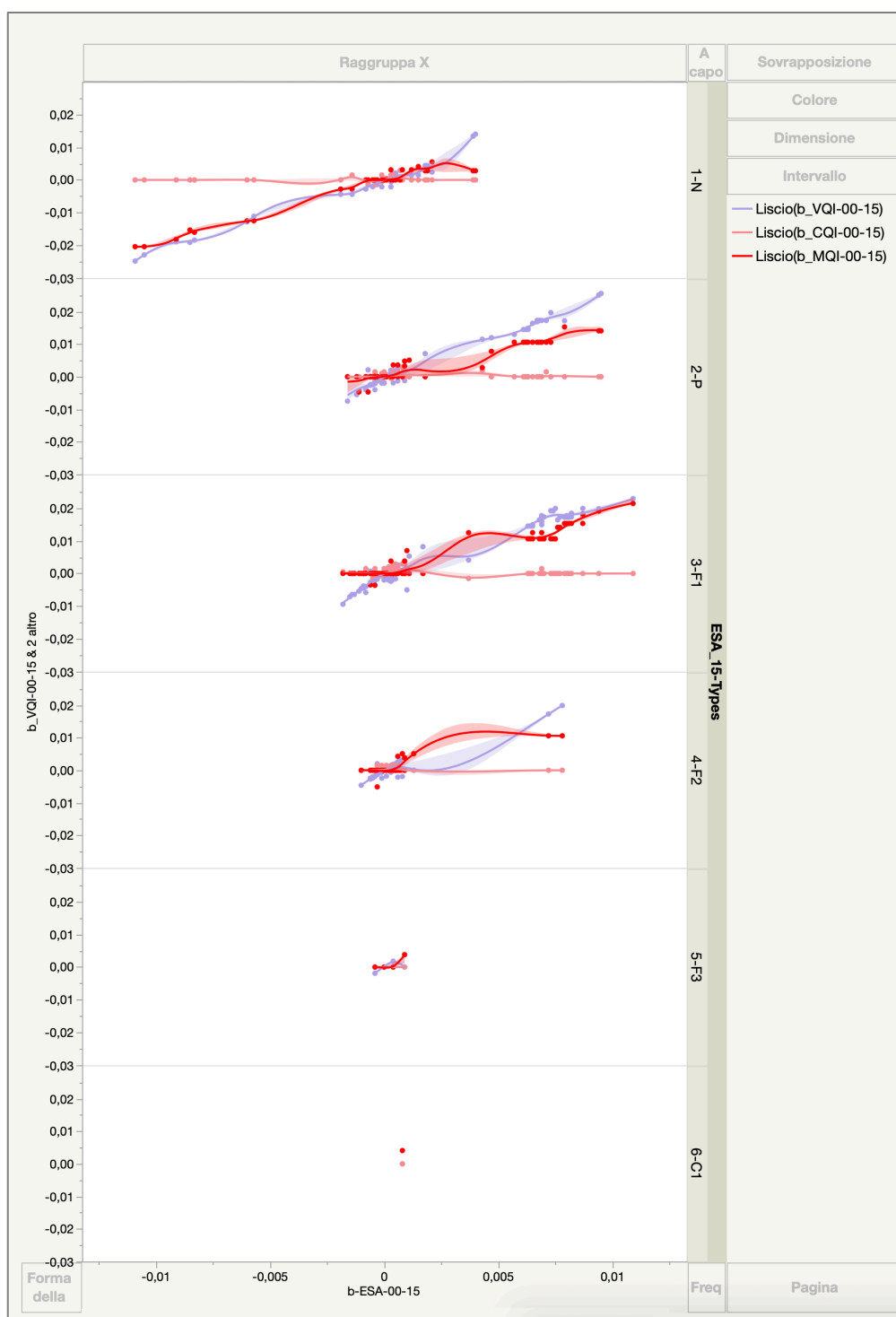


Figura 62. Variazioni dei coefficienti b di VQI, CQI e MQI in funzione del coefficiente b dell'ESA per le differenti classi di sensibilità ambientale.

Gli andamenti in figura confermano la relazione tra MQI e VQI ed ESA (linee blu e rosse, con andamenti crescenti), mentre non correlata è la VQI (linee rosa orizzontali) permettono inoltre di valutare l'impatto dei cambiamenti intercorsi tra le varie classi di sensibilità ambientale, che risulta massimo o molto alto proprio nelle classi inizialmente a nulla o bassa sensibilità (classi 1-N, 2-P e 3-F1).

## Conclusioni

---

La necessità di disporre di strumenti di analisi e monitoraggio dei processi di LDD a scala globale, basati su un approccio di tipo integrato, che includa le componenti fisiche e socio-economiche delle problematiche e che sia finalizzato a supportare una gestione sostenibile delle risorse è una esigenza necessaria e richiamata, ad esempio, nella Convenzione delle Nazioni Unite per la Lotta alla Desertificazione che sottolinea l'importanza di tale approccio come elemento essenziale per l'implementazione di azioni efficaci per contrastare i fenomeni di degrado del territorio. A questo e in considerazione della complessità dei cambiamenti climatici e socio-economici in atto, si aggiunge la ulteriore necessità di studiare i processi di LDD nella loro evoluzione nel tempo e nello spazio, anche in relazione ad una migliore definizione di possibili scenari futuri. Da molti studi emerge infatti come l'elevata variabilità delle situazioni in atto e delle forze in gioco rendono necessario lo sviluppo di ulteriori e specifici strumenti di analisi.

I primi progetti sullo studio della desertificazione hanno avuto come obiettivo principale la raccolta di informazioni prevalentemente quantitative come elementi di partenza volti a individuare lo stato dei processi di degradazione del suolo e di desertificazione. Ad esempio, tale approccio ha caratterizzato le prime carte mondiali sulla desertificazione prodotte nell'ambito di differenti lavori tra cui si ricordano quello pubblicato sulla rivista *Economic Geography* nel 1977 e quelli sviluppati con i progetti GLASOD (*Global Assessment of Human Induced Soil Degradation*, 1987-1990).

Successivamente, i progetti inseriti nell'ambito della lotta alla desertificazione a livello mondiale, hanno focalizzato una buona parte delle attività sulla comprensione delle cause e degli effetti di tali processi e sulle dinamiche che ad essi sottendono (ad es. il progetto LADA - *Land Degradation Assessment in Drylands*) proposto dalla FAO. In tale ambito i risultati dei progetti Medalus e Desertlinks hanno rappresentato un avanzamento sostanziale nella capacità di analisi e comprensione dei fenomeni di LDD sia da un punto di vista metodologico che pratico (con l'utilizzo di un sistema ad indicatori chiave a due fasi di facile implementazione, uso e di applicabilità alle più differenti situazioni di degrado ambientale. Tali caratteristiche infatti hanno contribuito alla diffusione della metodologia cosiddetta Medalus-ESA che è risultata, nel tempo, la più utilizzata per la mappatura dei processi di LDD (cfr. pag. 28). Per questo motivo nel 2020 la metodologia ESA è stata successivamente aggiornata per una più efficiente applicabilità a scala mondiale (Ferrara et al., 2020) e su intervalli temporali funzionali alle nuove esigenze di controllo e monitoraggio temporale dei vari processi di LDD.

La presente tesi di ricerca ha avuto, come obiettivo principale, lo studio e la messa a punto di un sistema di analisi e valutazione sugli impatti che la velocità di cambiamento dei fenomeni di LDD, e delle variabili che li originano, hanno sui sistemi socio-ecologici a scala globale.

L'approccio concettuale e metodologica proposto è stato basato sull'uso del modello ESA nella sua versione aggiornata (Ferrara *et al.*, 2020) e sulla applicazione di un set di analisi e approcci statistici integrati e complementari (quali la statistica descrittiva e le analisi univariate, il data *mining*, le analisi della tendenza o le analisi multivariate) in grado di esplorare, nella loro molteplicità tutti i differenti aspetti delle forze in gioco.

I risultati prodotti hanno dimostrato l'efficienza e la potenzialità applicativa del modello ESA per la valutazione dei cambiamenti spazio temporali che caratterizzano i sistemi socio-ecologici e la capacità del *framework* proposto di analizzare e discriminare l'impatto che le differenti variabili hanno su questi cambiamenti.

L'originalità di questo studio risiede nella capacità dell'approccio proposto di identificare i principali fattori a livello globale che interagiscono con i fenomeni collegati alla LDD non solo in termini di velocità di cambiamento ma anche in termini di impatto sullo stato dei differenti sistemi socio-ecologici. I risultati confermano anche la capacità di identificare le tendenze in termini di distribuzione spaziale e fare luce sulle relazioni intrinseche che esistono tra le caratteristiche temporali e spaziali delle variabili che incidono sul sistema utilizzando la metodologia ESA aggiornata.

Il presente studio fornisce inoltre, un contributo metodologico per il supporto all'implementazione di azioni di mitigazione attraverso pratiche sostenibili di gestione, con particolare riguardo ai cambiamenti socio-economici, di uso del suolo e ai cambiamenti climatici.

## Bibliografia

---

- AA.VV, World Atlas of Desertification, 2018. Cherlet M., Hutchinson C., Reynolds J., Hill J., Sommer S., von Maltitz G. (Eds.). Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2018
- AA.VV. 1999. Medalus – Mediterranean desertification and land use. Research project. [online] URL: <http://www.medalus.demon.co.uk/>
- AA.VV. 2005. DIS4ME: Desertification indicator system for mediterranean europe (Brandt J ed). ISSN: 1749-8996. [online] URL: <http://www.kcl.ac.uk/projects/desertlinks/>
- Abidi-Habib M., Lawrence A., 2007. Revolt and remember: how the Shimshal Nature Trust develops and sustains social-ecological resilience in northern Pakistan. *Ecol. Soc.* 12 (2), 35 (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss2/art35/>
- Adger W.N., Arnell N.W., Tompkins E.L., 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Glob. Environ. Change* 15, 77-86
- Bai Z.G., Dent D.L., Olsson L., and Schaepman M.E., 2008. Global Assessment of Land Degradation and Improvement. 1 Identification by remote sensing. Report 2008/01 (GLADA Report 5), ISRIC – World Soil Information, Wageningen, 70p
- Bajocco S., Salvati L., Ricotta C. 2011. Land degradation vs. fire: a spiral process? *Progress in Physical Geography* 35 (1): 3-18
- Basso B., De Simone L., Ferrara A., et al. 2009. Analysis of contributing factors to desertification and mitigation measures in Basilicata region. *Ital. J. Agron.*, 5, pp. 33-44
- Basso F., Bove E., Dumontet S., Ferrara A., Pisante M., Quaranta G., Taberner M., 2000. Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: an example covering the Agri basin - Southern Italy. *Catena* 40: 19-35 - doi: 10.1016/S0341-8162(99)00062-4
- Berkes F., Colding J., Folke C., 2003. *Navigating Social-ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Berkes F., Folke C., 1998. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press, New York
- Bot A., and Snel M. 2002. Some suggested indicators for Land Degradation Assessment of Drylands. Draft paper. Food and Agriculture Organization, Rome. LADA Virtual Centre [ftp://ftp.fao.org/agl/agll/ladadocs/paper\\_281102.doc](ftp://ftp.fao.org/agl/agll/ladadocs/paper_281102.doc).
- Bouhata R., Kalla M., 2014. Mapping of environmental vulnerability of desertification by adaptation of the Medalus method in the endoreic area of Gadaïne (eastern Algeria). *Geographia Technica*. 9 (2): 1-8
- Calviño-Cancela M., Chas-Amil M.L., García-Martínez E.D., Touza J. 2016. Wildfire risk associated with different vegetation types within and outside wildland-urban interfaces. *Forest Ecology and Management*, 372, pp. 1-9
- Carpenter S. R., and Turner M. G., editors. 2000. Special issue on interactions of fast and slow variables in ecosystems. *Ecosystems* 3(6):495–595. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s100210000043>
- Chauhan D.S., Singh B., Chauhan S., Dhanai C.S., Todaria N.P., 2010. Regeneration and plant diversity of natural and Planted Sal (*Shorea robusta* Gaertn. F.) forests in the Terai-Bhabhar of Sohagibarwa Wildlife Sanctuary. *India. J. Am. Sci.* 6 (3), 32e45
- Chiesura A., De Groot R., 2003. Critical natural capital: a socio-cultural perspective. *Ecol. Econ.* 44, 219e231

- Costanza R., D'Arge R., De Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., Van den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387,253e260
- Crépin A.S., 2007. Using fast and slow processes to manage resources with thresholds. *Environmental and Resource Economics* 36:191–213. <http://dx.doi.org/10.1007/s10640-006-9029-8>
- De Pina Tavares J., Baptista I., Ferreira A.J.D., Amiotte-Suchet P., Coelho C., Gomes S., Amoros R., Dos Reis E.A., Mendes A.F., Costa L., Bentub J., Varela L. 2015. Assessment and mapping the sensitive areas to desertification in an insular Sahelian mountain region Case study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde. *Catena*. 128: 214-223
- Deutsch L., Folke C., Skanberg K., 2003. The critical natural capital of ecosystem performance as insurance for human wellbeing. *Ecol. Econ.* 44 (3), 205e217
- Diez E., and McIntosh B.S., 2011. Organisational drivers for, constraints on, and impacts of decision and information support tool use in desertification policy and management *Environmental Modelling and Software*, 26 (3), pp. 317-327
- DIS4ME: Desertification Indicator System for Mediterranean Europe, 2005. (Brandt J ed). [online] URL: <http://www.kcl.ac.uk/projects/desertlinks/> - ISSN: 1749-8996
- Dregne H.E., 1977. Carta dei livelli della desertificazione nelle regioni aride del mondo. *Desertificazione di terre aride, Geografia economica*, Vol. 53 (4): 322-331. © Clark University, ristampato su autorizzazione di Informa UK Limited, operando come Taylor & Francis Group, [www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com) per conto della Clark University
- Enne G., Zucca C. 2000. Desertification indicators for the European Mediterranean region: state of the art and possible methodological approaches. ANPA, Roma - NRD, Sassari: 261
- European Environment Agency, 2003. Indicators. [online] URL: [http://themes.eea.eu.int/all\\_indicators\\_box](http://themes.eea.eu.int/all_indicators_box)
- European Union, 2001. Statistical information needed for indicators to monitor the integration of environmental concerns into the common agricultural policy. Communication from the Commission to the Council and the European parliament no. 15.01.(2001) COM 2001(144), Brussels
- FAO 2013. Land Degradation Assessment in Drylands - Methodology and results. FAO, Rome
- Ferragina A.M., e Quagliarotti D., 2006. L'Ambiente. Cambiamenti Climatici e Processi di Desertificazione del Mediterraneo. In P. Malanima (a cura di) *Rapporto sulle Economie del Mediterraneo*, ISSM-CNR, Bologna: Il Mulino, 181-209
- Ferrara A., Kelly C., Wilson G.A., Nolè A., Mancino G., Bajocco S., Salvati L., 2015. Shaping the role of 'fast' and 'slow' drivers of change in forest-shrub and socio-ecological systems. *J. Environ. Manag.*, 169 pp. 155-166
- Ferrara A., 2005. Expert system for evaluating the environmental sensitivity index (ESI) of a local area. In: 'DIS4ME: Desertification Indicator System for Mediterranean Europe', Brandt, J. ed. [online] URL: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/shared\\_folder/projects/DIS4ME/esi\\_jan\\_05/esi.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/esi_jan_05/esi.htm) - ISSN: 1749-8996
- Ferrara A., Bellotti A., Faretta S., Mancino G., Baffari P., D'Ottavio A., Trivigno V., 2004 Carta delle aree sensibili alla desertificazione della Regione Basilicata. *Forest@*, 2, pp. 66-73
- Ferrara A., Kosmas C., Salvati L., Padula A., Nolè A. 2020. Updating the MEDALUS-ESA Framework for Worldwide Land Degradation and Desertification Assessment. *Land Degradation & Development*. Online 20/01/2020. DOI: 10.1002/ldr.3559
- Fuzuni L., 2008. Investigating the current statues of desertification in the Sistan plain with modified MEDALUS method with emphasize on water and wind erosion [D], p. 131., Zabol University
- Garmestani A.S., Allen C.R., Gunderson L., 2009. Panarchy: discontinuities reveal similarities in the dynamic system structure of ecological and social systems. *Ecol. Soc.* 14 (1), 15 (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art15/>
- Geeson N., 2005. Desertification indicator system for mediterranean europe - Review of other indicator system. Desertlinks Project. [online] URL: <http://www.kcl.ac.uk/ desertlinks>
- GLASOD project - Global Assessment of Human Induced Soil Degradation 1987-1990 (<https://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>)



- Global-ESA project, 2019. <http://web.unibas.it/global-esa/>
- Gunderson L., Holling C. (Eds.), 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington D.C.
- Holling C.S., 1986. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change. Pages 292–317 in W. C. Clark and R. E. Munn, editors. *Sustainable development of the biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Imeson A., 2012. *Desertification, Land Degradation and Sustainability: Paradigms, Processes, Principles and Policies*. Wiley-Blackwell, Chichester
- Imeson A.C., Cammeraat L.H., 2002. Environmentally sensitive areas in the MEDALUS target area study sites. In: "Mediterranean desertification: a mosaic of processes and responses" (Geeso N, Brandt J, Thornes JB eds). Wiley, Chichester, NY, USA, pp. 177-186
- IUSS, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO
- Jafari R., Bakhshandehmehr L., 2016. Quantitative Mapping and Assessment of Environmentally Sensitive Areas to Desertification in Central Iran. *Land Degradation and Development*, 27 (2), pp. 108-119
- Karamesouti M., Detsis V., Kounalaki A., Vasiliou P., Salvati L., Kosmas C. 2015. Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from a traditional Mediterranean cropland (Greece). *Catena*, 132, pp. 45-55
- Kirkby M.J., Irvine B.J., Jones R.J.A., Govers G., and PESERA team, 2008. The PESERA coarse scale erosion model for Europe. Model rationale and implementation. *European Journal of Soil Science* 59 (6) , pp. 1293-1306
- Kosmas C. and Kirby M. 2004. Physically based top-down approaches to sensitive areas. in *The MEDRAP Concerted Action to support the Northern Mediterranean Action Programme to Combat Desertification*. Enne G., Peter D., Zanolla C., Zucca C [Eds], Sassari. Second Workshop on Identification of Sensitive Areas in the northern Mediterranean, Troia (Portugal) 6-8 June 2002, pp.358-374
- Kosmas C., Briassoulis H., Poesen J. 1999b. Key indicators of desertification at the ESA scale. In: "The Medalus project Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification" (Kosmas C, Kirkby M, Geeson N Eds). European Union Report no. 18882: 11-30. - ISBN: 92-828-6349-2
- Kosmas C., Danalatos N.G., Gerontidis S., 2000. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena* 40, 3-17
- Kosmas C., Ferrara A., Briassouli H., Imeson A. 1999c. Methodology for mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification. In 'The Medalus project Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification'. Edited by: C. Kosmas, M. Kirkby, N. Geeson. European Union 18882. pp:31-47 ISBN 92-828-6349-2
- Kosmas C., Kirkby M., Geeson N. (Eds), 1999d. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. European Commission, EUR 18882 (87 pp)
- Kosmas C., Tsara M., Moustakas N., Kosma D., Yassoglou N. 2006. Environmental sensitive areas and indicators of desertification. In *Desertification in the Mediterranean region. A security issue, NATO Security Through Science Series. Volume 3: Brussels*
- Kosmas K., Tsara M., Moustakas N., Karavitis C. 2003. Identification of indicators for desertification. *Ann. AridZones*, 42, pp. 393-416
- Kosmas, C., Ferrara, A., Briassouli, H., Imeson, A. 1999. Methodology for mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification. In 'The Medalus project Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification'. Edited by: C. Kosmas, M. Kirkby, N. Geeson. European Union 18882
- Lavado Contador J.F., Schnabel S., Gómez Gutiérrez A., Pulido Fernández M., 2009. Mapping sensitivity to land degradation in Extremadura, SW Spain. *Land Degradation and Development*, 20 (2), pp. 129-144
- Leuteritz T.E.J., Eklia H.R., 2008. Not all roads lead to resilience: a complex systems approach to the comparative analysis of tortoises in arid ecosystems. *Ecol. Soc.* 13 (1), 1 (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art1/>

- Liu X., Zhang W., Liu F., Qu Z., Tang X., 2011. Changes in species diversity and above-ground biomass of shrubland over long-term natural restoration process in the Taihang Mountain in North China. *Plant Soil Environ.* 57 (11), 505e512
- Ludwig D., Jones D., and Holling C.S., 1978. Qualitative analysis of insect outbreak systems: the spruce budworm and forest. *Journal of Animal Ecology* 47:315–332. <http://dx.doi.org/10.2307/3939>
- Maliva R., & Missimer T., 2012. *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Environmental science and engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978–3642291036
- Mancino G., Nolè A., Ripullone F., Ferrara A., 2014. Landsat TM imagery and NDVI differencing for vegetation change detection: assessing natural expansion of forests in Basilicata, southern Italy. *iForest* 7, 75e84
- Mancino G., Nolè A., Urbano V., Amato M., Ferrara A., 2009. Assessing water quality by remote sensing in small lakes: the case study of Monticchio lakes in Southern Italy. *iForest* 2, 154-161
- Manuchehr F., Mahbobeh N.E., 2007. Evaluation of MEDALUS model for desertification hazard zonation using GIS; study area: lyzad Khast Plain, Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10 (16), pp. 2622-2630
- McAllister R.R.J., Abel N., Stokes C.J., Gordon I.J., 2006. Australian Pastoralists in time and space: the evolution of a complex adaptive system. *Ecol. Soc.* 11 (2), 41 (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art41/>
- Middleton N.J., & Sternberg T. 2013. Climate hazards in drylands: A review. *Earth-Science Reviews*, 126, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.008>
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. *Ecosystem and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, Washington, DC
- Moreira F., Vaz P., Catry F., Silva J.S. 2009. Regional variations in wildfire susceptibility of land-cover types in Portugal: implications for landscape management to minimize fire hazard. *Int. J. Wildland Fire*, 18, pp. 563-574
- Nachtergaele F., Petri M., Biancalani R., Van Lynden G. Van Velthuisen H., 2010. Global Land Degradation Information System (GLADIS). Beta version. An information database for Land Degradation Assessment at Global Level. Land Degradation Assessment in Drylands Technical Report, no. 17. FAO. Rome Italy.
- Ochoa P.A., Fries A., Mejía D., Burneo J.I., Ruíz-Sinoga J.D., Cerdà A. 2016. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140, pp. 31-42
- OECD 2004. Key environmental indicators. [online] URL: <http://www.oecd.org/dataoecd/32/20/31558547.pdf>
- Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., e Sombroek W.G., 1991. Mappa mondiale dello stato della degradazione del suolo indotta d'Il'uomo: una nota esplicativa (rev. Ed.), UNEP e ISRIC, Wageningen
- Onaindiaa M., Domingueza I., Albizub I., Garbisub C., Amezagaa I., 2004. Vegetation diversity and vertical structure as indicators of forest disturbance. *For. Ecol. Manag.* 195 (3), 341e354
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L. 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, pp. 38-50
- Prävālie R., 2016. Drylands extent and environmental issues. A global approach DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.003
- Recanatesi F., Clemente M., Grigoriadis E., Ranalli F., Zitti M., & Salvati L. 2016. A fifty-year sustainability assessment of Italian agroforest districts. *Sustainability*, 8(1), 32. <https://doi.org/10.3390/ su8010032>
- Reynolds J.F., Stafford Smith M., Lambin E.F., et al. 2007. Ecology: Global desertification: Building a science for dryland development. DOI: 10.1126/science.1131634.
- Reynolds J.F., Stafford-smith D.M., Lambin E., 2003. Do humans cause deserts? An old problem through the lens of a new framework: the Dahlem desertification paradigm. In: Allsopp N, Palmer AR, Milton SJ, et al. (eds) the VIIth International Rangelands Congress. Durban, South Africa
- Robinson D.A., Lebron I., 2010. On the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 70, 137e138
- Roseta-Palma C., Ferreira-Lopes A., Sequeira T.N., 2010. Externalities in an endogenous growth model with social and natural capital. *Ecol. Econ.* 69, Routledge, London

- Salvati L. and Zitti M. 2008. Regional convergence of environmental variables: empirical evidences from land degradation. *Ecological Economics*, 68, 162e168
- Salvati L., Bajocco S., 2011. Land sensitivity to desertification across Italy: past, present, and future. *Applied Geography* 31 (1): 223-231. - doi: 10.1016/j.apgeog.2010.04.006
- Santini A., 1999. Application of the MEDRUSH Model to the Agri, in Final Report Covering the Period 1 January 1996 to 31 December 1998, (MEDALUS III Project 1) "MEDALUS: Mediterranean Desertification and Land Use"
- Sonneveld B.G.J.S., Dent D.L., 2007. How good is GLASOD? *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 1, January 2009, Pages 274-283 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.09.008>.
- Stafford-Smith D.M., Reynolds J.F., 2002. Desertification: a new paradigm for an old problem. In: Reynolds, J.F., Stafford-Smith, D.M. (Eds.), *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlin
- Tynsong H., Tiwari B.K., 2011. Diversity and population characteristics of woody species in natural forests and arecanut agroforests of south Meghalaya, Northeast India. *Trop. Ecol.* 52 (3), 243e252
- UNEP, 1997. *World Atlas of Desertification* 2ED. London: UNEP
- Wascher D.M., 2000. Agri-environmental indicators for sustainable agriculture in Europe. European centre for Nature Conservation, Tilburg, pp. 240. - ISBN: 90-76762-02-3