



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

XX GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA

Convegno

ACQUA, VEGETAZIONE, CLIMA: L'AVVENTO DELL'ECOIDROLOGIA

22 marzo 2021

FASCICOLO ABSTRACT

PROGRAMMA

Comitato Ordinatore: Roberto BASSI, Bruno CARLI, Sandro PIGNATTI,
Andrea RINALDO, Giovanni SEMINARA (Coordinatore)

Il convegno si occupa dell'interazione fra acqua e vegetazione, con particolare riferimento all'impatto che su tali processi può esercitare il cambiamento climatico. Che la vegetazione eserciti un ruolo fondamentale nel ciclo dell'acqua, in particolare restituendo all'atmosfera una parte significativa dell'acqua di precipitazione attraverso la traspirazione delle piante, è ben noto e da tempo oggetto di studio da parte dell'idrologia. Così, che la vegetazione svolga un ruolo fondamentale nel ciclo del carbonio attraverso la fotosintesi clorofilliana, attraverso cui miliardi di tonnellate di carbonio atmosferico vengono trasformate in biomassa ogni anno, è ben noto e oggetto di studio nell'ambito dell'ecologia. Ma tradizionalmente idrologia ed ecologia non hanno dialogato molto. Solo negli scorsi vent'anni esse hanno cominciato ad interagire, dando luogo a sviluppi molto fecondi e alla nascita di una nuova disciplina, l'eco-idrologia, cui è dedicata la Giornata.

9.45 Saluto della Presidenza dell'Accademia

Giovanni SEMINARA (Linco, Università di Genova): Apertura dei lavori

Sessione 1 - Presiede Giovanni SEMINARA

10.00 Andrea RINALDO (Linco, EPFL, Lausanne): *Le reti fluviali come corridoi ecologici*

10.30 Roberto BASSI (Linco, Università di Verona): *Piante e acqua: meccanismi fisiologici ed ecologici nella crescita e distribuzione delle specie*

11.00 Simone FATICHI (National University of Singapore): *Il ruolo della vegetazione nel cambiamento climatico: una storia di acqua e carbonio*

11.30 Intervallo

Sessione 2 - Presiede Roberto BASSI

11.45 Paolo PERONA (École Polytechnique Fédérale de Lausanne and University of Edinburgh): *La resilienza nell'ecomorfodinamica fluviale come risultato di determinismo e stocasticità*

12.15 Guido ZOLEZZI, Walter BERTOLDI, Francesco CAPONI, Alyssa Jennifer SERLET, Simone ZEN, Aurelie KOCH, Marco TUBINO, Annunziato SIVIGLIA (Università di Trento): *Eco-Morfodinamica fluviale: uno spostamento di paradigma*

12.45 Stefano LANZONI (Università di Padova): *Ecomorfodinamica lagunare e il futuro delle aree umide costiere*

13.15 Discussione

Sessione 3 – Presiede Bruno CARLI

- 14.30 Carlo CAMPOREALE (Politecnico di Torino): *Il ruolo mancante della morfodinamica fluviale nel ciclo del carbonio*
- 15.00 Enrico BERTUZZO (Università Cà Foscari, Venezia): *Il metabolismo delle reti fluviali*
- 15.20 Andrea D'ALPAOS, Marco MARANI (Università di Padova): *Dinamica accoppiata di vegetazione e morfologia: ruolo degli ambienti a marea nella cattura del carbonio*
- 15.40 Sonia SILVESTRI (Università di Bologna - Duke University, Durham, USA) - Neal Flanagan, Curtis RICHARDSON (Duke University, Durham, USA) - Helgard ANSCHÜTZ, Asgeir O. K. LYSDAHL (Norwegian Geotechnical Institute, Oslo) - Gusti Z. ANSHARI (Tanjungpura University, Pontianac, Indonesia) - Craig W. CHRISTENSEN, Andreas A. PFAFFHUBER (EMerald Geomodelling AS, Norway) - Xavier COMAS (Florida Atlantic University, Boca Raton, USA) - Noah DEWAR, Rosemary KNIGHT (Stanford University, USA) - Neal FLANAGAN, (Duke University, Durham, USA) - Andrea VIEZZOLI (Aarhus Geophysics, Risskov/Cascina): *Eco-geomorfologia delle torbiere*
- 16.00 Intervallo

PhD Session – Presiede Andrea RINALDO

- 16.15 Matteo B. BERTAGNI (Princeton University): *Il ruolo del regime idrologico nella crescita di vegetazione sulle barre fluviali*
- 16.30 Francesco CAPONI (ETH, Zürich - Università di Trento): *Influenza delle caratteristiche morfologiche delle piante sulla sopravvivenza della vegetazione riparia al passaggio delle piene*
- 16.45 Luca CARRARO (EAWAG, Dübendorf): *La diffusione di una malattia letale per i salmonidi: ruoli connessi di acqua, clima e vegetazione*
- 17.00 Discussione e conclusioni

ROMA - PALAZZINA DELL'AUDITORIO - VIA DELLA LUNGARA, 230

Segreteria del convegno: piemontese@lincei.it

I lavori si svolgeranno in videoconferenza ZOOM e potranno essere seguiti dal pubblico in streaming. Il link sarà disponibile sul sito dei Lincei la mattina del convegno. Quanti, durante i lavori, intendano intervenire alla discussione potranno inviare le domande con una email alla Segreteria del convegno, che le trasmetterà ai relatori.

Con preghiera di segnalare l'eventuale partecipazione

Introduzione al Convegno

Giovanni SEMINARA (Accademia dei Lincei)

La Giornata Mondiale dell'Acqua (World Water Day) è una ricorrenza istituita dalle Nazioni Unite nel 1992, prevista all'interno delle direttive dell'agenda 21, risultato della conferenza di Rio. Il 22 marzo di ogni anno gli Stati che siedono all'interno dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite sono invitati a dedicare attenzione all'acqua promuovendo attività concrete nei loro rispettivi Paesi, con particolare riferimento ai problemi dell'accesso all'acqua dolce e della sostenibilità degli habitat acquatici. Dunque: acqua vista come risorsa preziosa per la vita dell'uomo, per la sopravvivenza degli animali, per la sostenibilità degli habitat acquatici. L'Accademia dei Lincei celebra la Giornata dell'Acqua fin dal 2001, includendo fra i temi discussi anche quelli che vedono l'acqua come minaccia da cui difendersi, a causa delle catastrofi idrogeologiche che può determinare in conseguenza di eventi atmosferici intensi. Gli incontri hanno sempre avuto uno scopo di alta divulgazione.

Questi aspetti del ruolo dell'acqua continuano ad essere fondamentali, ma fin dagli anni 70 del secolo scorso, è cresciuta la consapevolezza che lo studio dei sistemi idrici (corsi d'acqua, estuari, lagune, coste) non possa prescindere dalle interazioni fisiche dell'acqua con il suo contenitore. Il fondo e le pareti laterali dei corpi idrici sono infatti materiali erodibili, che quindi evolvono nel tempo ed è proprio la loro evoluzione a dar luogo agli infiniti e spesso suggestivi patterns osservati in natura. Lo studio di questi processi si è sviluppato molto negli ultimi decenni, con il parallelo sviluppo delle conoscenze sulla Meccanica dei Fluidi e sulla meccanica del trasporto dei sedimenti. Ne è scaturita una nuova disciplina che si è sviluppata attraverso l'interazione interdisciplinare fra ingegneria e geomorfologia, la cosiddetta **morfodinamica** (fluviale, costiera, lagunare)

Più recentemente, ha fatto irruzione in questo campo di studi un nuovo fondamentale paradigma, che vede i corpi idrici nelle loro interazioni con un ulteriore importante componente, la **componente biotica**. Sono nate così l'eco-idrologia e l'eco-morfodinamica. La giornata dell'acqua di quest'anno è proprio dedicata a questi temi.

Una prima ampia area di interazione fra idrologia ed ecologia è quella che interpreta **le reti fluviali come corridoi ecologici**, vere e proprie autostrade attraverso cui si trasmettono le malattie veicolate dall'acqua nel loro diffondersi epidemico o endemico. 'La dinamica di questo processo è scritta nei caratteri idrologici e geomorfologici delle reti fluviali', osserva Andrea Rinaldo, Linceo, che, insieme al suo Maestro, Ignacio Rodriguez Iturbe, ha aperto strade nuove in questo campo, che esporrà nel primo intervento di questo Convegno. Su un caso di studio, relativo alla diffusione di una malattia letale per i salmonidi, riferirà Carraro, un giovane PhD student del Politecnico di Zurigo.

La componente biotica su cui si concentrerà l'attenzione prevalente del convegno è la **vegetazione**. Che questa eserciti un ruolo fondamentale nel **ciclo dell'acqua** e, in particolare, che gran parte dell'acqua di precipitazione torni nell'atmosfera attraverso la traspirazione delle piante, è noto da tempo. Ed è l'idrologia la disciplina dell'Ingegneria che si è sempre quantitativamente occupata del ciclo dell'acqua. Analogamente, è ben noto che la vegetazione ha un ruolo fondamentale nel **ciclo del carbonio**. Tutti sanno che, attraverso la fotosintesi clorofilliana, l'anidride carbonica atmosferica e l'acqua metabolica, in presenza di luce solare, reagiscono producendo glucosio, uno zucchero fondamentale per la vita della pianta, e liberano ossigeno nell'atmosfera. La fotosintesi trasforma miliardi di tonnellate di carbonio atmosferico in biomassa ogni anno. Questo processo ha quindi una diretta attinenza con il problema del cambiamento climatico. Sono i fisiologi vegetali e, in generale, gli ecologi, che si occupano di questi aspetti.

Nel passato, idrologia ed ecologia si sono sviluppate indipendentemente. Negli scorsi vent'anni queste due discipline hanno cominciato ad interagire, dando luogo a sviluppi molto fecondi, che saranno discussi nel convegno, in cui sono presenti sia fisiologi vegetali, il prof. Bassi dell'Università di Verona, Linceo, sia idrologi, in particolare, oltre ad Andrea Rinaldo, Simone Fatichi, un cervello in fuga, di origine fiorentina, cui l'Accademia ha conferito il Premio Feltrinelli giovani 2019 per l'Ingegneria dei sistemi complessi.

I problemi affrontati nell'ambito dell'**eco-idrologia** sono numerosi. Anzitutto, il ruolo fondamentale della vegetazione nel ciclo del carbonio che, negli ultimi decenni, ha consentito di limitare il riscaldamento globale: gli ecosistemi terrestri nel periodo 2010-2019 hanno assorbito circa il 30% di tutte le emissioni di CO₂ di origine antropica. Ma, osserva Fatichi, ci sono segnali che "... il sink biosferico di carbonio possa essere limitato dalla eccessiva domanda atmosferica di acqua, legata alle più alte temperature, e dalla riduzione di acqua nel suolo". Si impone, quindi, l'approfondimento di questa delicata e complessa questione. Che deve essere declinata analizzando i diversi processi attraverso cui il ciclo del carbonio viene influenzato nei diversi ecosistemi.

- Nelle aree umide costiere, la vegetazione nasce, cresce e muore accumulando nel suolo umido enormi quantità di sostanza organica non decomposta. E malgrado si stimi che nei **suoli torbieri** sia accumulato più del doppio del carbonio organico contenuto nella biomassa vegetale di tutte le terre emerse, le nostre conoscenze sulle reali dimensioni di questi meravigliosi ambienti umidi sono molto limitate. Su questo tema interverranno Sonia Silvestri, dell'Università di Bologna, in rappresentanza di un nutrito gruppo internazionale di Autori e, inoltre, D'alpaos e Marani dell'Università di Padova.

- I corsi d'acqua rinnovano la vegetazione riparia attraverso i processi di erosione spondale ed evoluzione planimetrica, che Camporeale, nel suo contributo, denomina 'pompa geomorfica'.

- Ancora le reti fluviali, fissano il carbonio negli organismi autotrofi mediante fotosintesi e drenano carbonio dagli ecosistemi terrestri adiacenti, dando luogo al cosiddetto metabolismo delle reti fluviali, discusso nel contributo di Bertuzzo.

Tutte queste questioni svolgono un ruolo rilevante anche per la valutazione dell'impatto che il cambiamento climatico eserciterà sulla resilienza delle aree vegetate, in particolare nelle regioni aride.

Una seconda area di interazione che verrà discussa nel Convegno è la cosiddetta **eco-morfodinamica**. Di cosa si tratta? Per illustrarlo, è sufficiente fare riferimento ad un problema di particolare importanza, quello della preservazione delle aree umide costiere, aree di transizione fra la terra ed il mare, che svolgono un ruolo fondamentale per la conservazione della biodiversità. Nel nostro Paese, il prototipo di questi preziosi ecosistemi è la Laguna di Venezia. La laguna è minacciata da due fenomeni concomitanti: l'abbassamento del suolo (subsidenza) e l'innalzamento del livello del mare (eustatismo), accelerato dal cambiamento climatico. Se la laguna si approfondisce, scompaiono quelle aree vegetate, le cosiddette barene, che distinguono le lagune dalle baie costiere e sono ricche di biodiversità. Questa importante questione sarà trattata da un esponente della scuola Padovana, il prof. Lanzoni.

L'eco-morfodinamica ha poi molti altri aspetti, che hanno a che fare con **l'influenza che la vegetazione esercita sui pattern dei corsi d'acqua e delle coste**, un tema fondamentale per l'individuazione di strategie di gestione degli ecosistemi, in tempi di cambiamento climatico: *understanding patterns in terms of the processes that produce them is the essence of science, and is the key to the development of principles for management* (Levin, The problem of pattern and scale in ecology, 1992). Un esponente della scuola trentina (Zolezzi) ed alcuni 'cervelli in fuga' di origine torinese (Bertagni e Perona) o trentina (Caponi) forniranno un quadro di alcuni recenti sviluppi in questo settore.

Sessione 1

Le reti fluviali come corridoi ecologici

(NOTE SU ECOIDROLOGIA E SOSTENIBILITÀ)

Andrea RINALDO (Lincoo, École Polytechnique Fédérale de Lausanne & Università di Padova)

L'*Ecoidrologia* è la scienza, di relativamente recente formale costituzione come disciplina a sè, che studia i controlli dell'acqua sulle comunità vive: riguarda dunque lo stabilirsi, l'abbondanza e la distribuzione di specie e popolazioni dove esista un ruolo di forzante e controllo delle acque del ciclo idrologico. Muovendo dalle origini della disciplina, la relazione raccoglie e idealmente ordina diversi piani di riflessione per suggerire che un quadro di riferimento coerente, centrato sull'acqua, è saldamente al centro del concetto moderno di sostenibilità - anche, e soprattutto, nella prospettiva ineludibile dell'adattamento a cambiamenti climatici [1]. Infatti per sviluppo sostenibile dovremmo riferirci alla evoluzione del contesto economico e sociale - lo sviluppo, appunto -- nel quale la ricchezza *pro-capite*, che ricomprenda il capitale naturale, e che sia equa nella sua distribuzione, non diminuisce nel tempo. Una tale prospettiva diventa fondamentale se vista dall'acqua: vista cioè dalla prospettiva francamente quantitativa che permettono gli studi idrologici e dell'emergenza ambientale e climatica. Recenti *water studies* infatti suggeriscono una nuova e diversa capacità predittiva nelle determinazioni quantitative, in particolare delle perdite di valore del capitale naturale ma estendibili agli effetti sinergici, positivi o negativi, nell'uso dell'acqua (piene, siccità e una giusta distribuzione in quantità e qualità) tra nuove tecnologie e nuove e vecchie Istituzioni deputate al governo dell'acqua. Si tratta, com'è evidente, di una chiave di lettura per il governo di processi di produzione di conoscenza, e anche di controllo e legislativi. Il capitale naturale, che stiamo dilapidando a ritmi preoccupanti in molte parti del mondo, è il patrimonio complessivo di beni naturali (comunità vive, aria, acqua, suolo, risorse), contribuisce in modo essenziale a fornire beni e servizi di valore diretto o indiretto, e include tutti gli ecosistemi controllati dall'acqua che forniscono al *welfare* globale servizi fondamentali.

Il sottotitolo invita a una riflessione su alcune sfide di grande modernità poste alle scienze dell'acqua. Potranno le risorse idriche globali soddisfare i crescenti bisogni di cibo e di energia dell'umanità? Potranno i grandi piani di gestione delle risorse idriche includere il controllo o la riduzione nella perdita di biodiversità?

Saremo capaci di costruire argomenti cogenti per prevenire schemi di sviluppo delle infrastrutture di gestione e distribuzione dell'acqua che implicino aumenti di incidenza di malattie veicolate dall'acqua? (Figura 1) Ancora: Possiamo predire dalla forma e dalla funzione delle reti idrauliche i caratteri di invasioni biologiche, incluse le migrazioni di popolazioni che hanno formato le comunità umane come le vediamo noi ora? [2] Esistono forzanti idrologiche e legate alla mobilità umana che controllano la diffusione epidemica di malattie (veicolate dall'acqua o da altro come tristemente viviamo oggi)?

Ci si chiede dunque se possiamo oggi contribuire in modo significativo, dal punto di osservazione - limitato ma rilevante -- del governo dell'acqua, a una mediazione di pensiero economico, legato ancora in larga parte allo sviluppo tradizionale, e di pensiero ambientale: rivolto cioè a un concetto moderno e quantitativo di sviluppo sostenibile che ricomprenda la conservazione del capitale naturale, piuttosto che la mera dipendenza da indicatori economici, come il prodotto interno lordo, che cambiano radicalmente quando la degradazione o la riduzione di risorse naturali siano tenute in conto in modo appropriato. In questo contesto, l'Ecoidrologia, scienza recente di grande momento, è centrata sulla valutazione quantitativa dei servizi degli ecosistemi controllati dalle acque del ciclo idrologico. È dunque destinata a fornire argomenti di fondamento per la regolazione anche economica di corpi e sistemi idrici che coinvolgano alterazioni ambientali: aprendo una strada - l'essenza della democrazia - di scienza e politica tempestivamente partecipate.

Bibliografia

[1] Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, L. Ridolfi, V. Isham, D.R. Cox, Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation, *Proceedings of the Royal Society A*, 455, 3789-3805, 1999

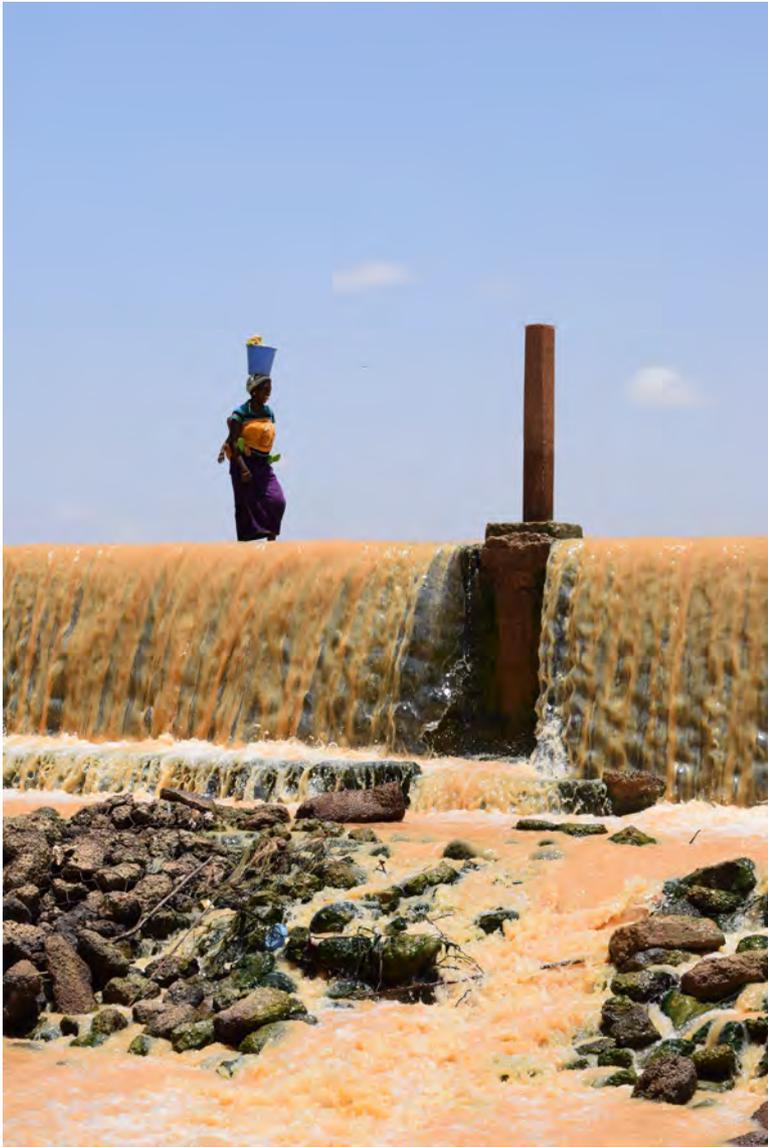


Figura 1. Mentre l'impatto dei miglioramenti agricoli indotti dalla costruzione di reti capillari di irrigazione connesse con la costruzione di piccoli sbarramenti di corsi d'acqua stagionali in regioni a regime idrologico semi-arido (nel caso dell'immagine, in Burkina Faso nell'Africa sub-Sahariana) è percepito quasi immediatamente dal PIL della regione che li implementa, i veri costi economici e sociali di correlati agli aumenti dell'incidenza di malattie *poverty-reinforcing* che provocano, come la scistosomiasi, non lo sono affatto. I veri costi dello sviluppo dell'irrigazione – quelli che ricomprendono il valore dei servizi degli ecosistemi come acque libere da patogeni -- sono dunque difficili da prevedere e da quantificare. Una malattia debilitante ma raramente mortale, la scistosomiasi (o Bilarzosi) colpisce prevalentemente le fasce povere e rurali della popolazione, e la sua incidenza si espande proporzionalmente alle espansioni dell'*habitat* dell'ospite intermedio obbligatorio (una chiocciola d'acqua dolce della specie *Bulinus*) causate dalle natura delle reti di irrigazione in quei climi. La capacità di prevedere l'espansione di malattie croniche veicolate dall'acqua costituisce dunque la condizione necessaria per una valutazione quantitativa della sostenibilità, che includa cioè in modo credibile la riduzione del capitale naturale [2].

*Piante e acqua: meccanismi fisiologici ed ecologici
nella crescita e distribuzione delle specie*

Roberto BASSI (Linco, Università di Verona)

Le piante hanno bisogno di acqua per la crescita e lo sviluppo. L'acqua è un costituente delle piante ancora più essenziale di quanto non lo sia per gli animali. La relazione quantitativa tra acqua utilizzata dalle piante e la biomassa accumulata è uno dei rapporti più strettamente conservati nella biosfera. La presentazione verterà sulle funzioni dell'acqua nelle piante e sui meccanismi fisiologici dell'assorbimento dell'acqua e della circolazione dei liquidi nell'organismo vegetale. Si passerà poi ad esaminare le ragioni biochimiche e fisiologiche che regolano il consumo dell'acqua e le ragioni per cui la crescita delle piante è direttamente proporzionale alla disponibilità d'acqua. Infine si mostrerà come la capacità di utilizzare acqua delle diverse specie ne determina la distribuzione geografica e la competizione con le altre specie nei diversi ambienti. Infine si mostrerà come sia possibile intervenire con tecniche biotecnologiche sulle piante coltivate al fine di controllare i cambiamenti climatici a livello planetario.

Il ruolo della vegetazione nel cambiamento climatico: una storia di acqua e carbonio

Simone FATICHI (National University of Singapore)

La concentrazione di anidride carbonica (CO₂) nell'atmosfera è attualmente intorno ai 415 ppm, approssimativamente un valore 45% più elevato dei valori di concentrazione di CO₂ osservabili prima della rivoluzione industriale. Lo sviluppo economico e le attività antropiche ad esso legate hanno fatto largo uso di combustibili fossili che hanno quasi totalmente contribuito a questo incremento di CO₂ in atmosfera. L'incremento di CO₂ e di altri gas nell'atmosfera ha contribuito a riscaldare il pianeta per ragioni legate ad alterazioni di scambi di radiazione termica in quello che è noto come effetto serra. Di fatto, il riscaldamento non è direttamente dovuto solo alla più alta concentrazione di gas serra, ma è anche controllato da una serie di retroazioni positive e negative innescate dall'incremento di gas serra, per esempio associate a cambiamenti nella quantità di vapore acqueo, delle nuvole, dell'estensione delle aeree coperte da ghiaccio e neve e dal ciclo del carbonio. In particolar modo il ciclo del carbonio negli ultimi decenni ha consentito di limitare il riscaldamento globale, perché una quota parte significativa delle emissioni di CO₂ sono state assorbite dagli oceani (approssimativamente il 20%) e ancor di più dagli ecosistemi terrestri che recentemente (2010-2019) hanno assorbito circa il 30% di tutte le emissioni di CO₂ di origine antropica (Fig. 1). Questo ha fatto sì che soltanto circa metà delle emissioni di CO₂ abbiano contribuito all'incremento della CO₂ atmosferica, la cosiddetta "airborne fraction" (Fig. 1). Questo assorbimento e stoccaggio di CO₂ da parte della vegetazione e del suolo ha rappresentato e rappresenta un servizio ecosistemico di inestimabile valore. Tuttavia il futuro di questo "sink" biosferico di carbonio è molto incerto e dipende fortemente dall'interazione tra piante, e domanda e disponibilità di acqua. Il legame tra acqua e carbonio è indissolubile dalla scala della singola foglia dove acqua e carbonio condividono lo stesso percorso fisico (ma in direzioni opposte) attraverso delle piccole aperture nelle foglie chiamate stomi. In particolare l'aumento di CO₂ favorisce la fotosintesi e migliora l'efficienza di utilizzo dell'acqua. Alla scala della pianta, la disponibilità di acqua nel suolo influenza fortemente la capacità di fare fotosintesi e crescere. Questi meccanismi estesi alla scala globale fanno sì che i cicli dell'acqua e del carbonio siano fortemente interconnessi e influenzati da un pianeta che si riscalda con una quantità crescente di CO₂ nell'atmosfera. In particolar modo la produttività della vegetazione è l'efficienza di utilizzo dell'acqua sono cresciute significativamente a scala globale, il che è stato accompagnato da un generale inverdimento della terra. Questo effetto si pensa abbia contribuito in modo significativo al "sink" biosferico di carbonio, anche se le incertezze sulla distribuzione geografica e attribuzione del "sink" biosferico sono notevoli. L'incremento della temperatura e l'inverdimento della terra hanno contribuito negli ultimi decenni ad aumentare l'evapotranspirazione e diminuire l'umidità del suolo, sottraendo in certe aeree acqua che prima sarebbe fluita nei fiumi o nelle falde. In certe regioni, questo fenomeno è stato parzialmente o totalmente contrastato da un utilizzo più efficiente dell'acqua da parte delle piante, mantenendo il ciclo idrologico più stabile di quanto ci si potesse aspettare. Tuttavia in risposta alle continue mutate condizioni climatiche, cominciano ad emergere prove che il "sink" biosferico di carbonio possa essere limitato dalla eccessiva domanda atmosferica di acqua, legata alle più alte temperature, e dalla riduzione di acqua nel suolo. Questo implica che il servizio ecosistemico di assorbimento e immagazzinamento della CO₂ da parte della vegetazione e del suolo del quale abbiamo usufruito per decenni potrebbe venire a mancare in futuro con potenziali conseguenze negative per il clima, ossia un'accelerazione del riscaldamento globale. Allo stesso tempo il comportamento della vegetazione ha anche un'influenza significativa sull'evapotranspirazione e pertanto sulla disponibilità futura di risorse idriche. La capacità della vegetazione di assorbire carbonio può essere infatti collegata ad un maggiore utilizzo di acqua, se l'incremento nell'efficienza nell'uso dell'acqua viene meno. In sostanza i cicli dell'acqua e del carbonio sono fortemente interconnessi e non possono essere studiati separatamente, soprattutto quando l'interesse è di capire come rispondano, e a loro volta influenzino, i cambiamenti del clima. In questo contesto è fondamentale capire meglio e prevedere come evolverà un indispensabile servizio ecosistemico - il "sink" biosferico - che rischia di essere ridimensionato o scomparire in futuro.

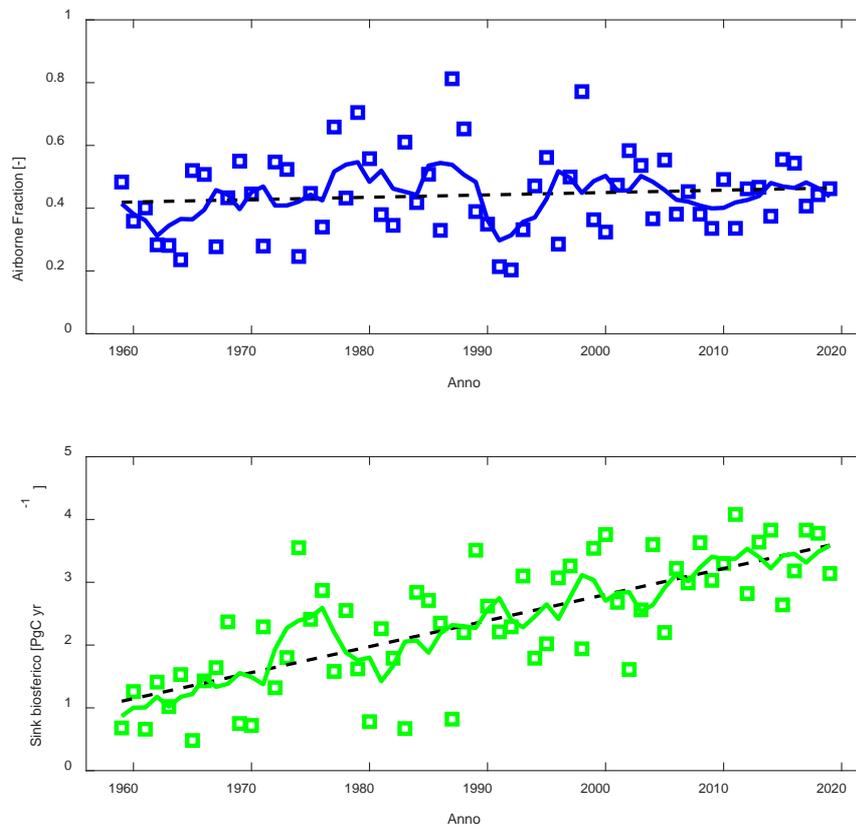


Figura 1 - Serie temporale della cosiddetta "airborne fraction", ossia la frazione di emissioni di CO₂ che rimane nell'atmosfera e del "sink biosferico" ossia la CO₂ assorbita dagli ecosistemi terrestri. I dati sono derivati dal "2020 Global Carbon Budget" (Friedlingstein et al., 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/>). Le linee continue rappresentano una media mobile su 5 anni, le linee tratteggiate rappresentano i trend lineari sull'intero periodo (1959-2019).

Sessione 2

La resilienza nell'ecomorfodinamica fluviale come risultato di determinismo e stocasticità

Paolo PERONA (École Polytechnique Fédérale de Lausanne and University of Edinburgh)

I fiumi contribuiscono alla redistribuzione della risorsa idrica del pianeta, il cui stato e quello dei processi coinvolti, p.es. idraulici, geomorfologici, ecologici, etc. devono essere mantenuti entro determinati limiti operativi. Tali limiti sono conosciuti nella terminologia anglosassone come “planetary boundaries” e sono ad oggi considerati i limiti operativi per garantire il funzionamento del sistema terrestre e delle sue componenti (Ecosfera). Per alcuni processi terrestri l’evidenza suggerisce come questi si trovino ormai da tempo nella cosiddetta zona di incertezza ad alto rischio di raggiungimento o addirittura di superamento del limite (p.es., flussi biochimici e l’alterazione della diversità genetica, vedasi Figura 1). Tuttavia, i processi influenzati dall’uso delle risorse idriche dell’acqua cosiddetta ‘dolce’ sembrano ancora al di sotto del limite, ovvero nella cosiddetta zona operativa di sicurezza [1]. Tra questi processi, per esempio, l’ecomorfodinamica fluviale ricopre un’importanza fondamentale in quanto contribuisce alla formazione dell’habitat dell’ecosistema, alle caratteristiche funzionali e morfologiche degli ambienti acquatici e terrestri ad esso adiacenti, nonché alla biodiversità delle specie che lo popolano. La resistenza e la resilienza di tali ecosistemi alle perturbazioni (leggasi uso intensivo della risorsa idrica) aiutano probabilmente il sistema a rallentare il raggiungimento del limite, oltre il quale esiste tuttora molta incertezza sulla possibile risposta del sistema e sulla sua capacità di recupero una volta rimossa la perturbazione (Figura 1). Le dinamiche di equilibrio mostrate in Figura 1b,c appaiono tuttavia incomplete se si considera l’esistenza di molteplici punti di equilibrio per l’ecosistema.

La dinamica di un ecosistema fluviale appare particolarmente complessa e la modellazione matematica del suo comportamento fisico risulta particolarmente ardua. All’elevato numero di variabili coinvolte, si aggiungono il carattere fortemente nonlineare e le diverse scale temporali e spaziali delle interazioni che legano i diversi processi. Per descrivere il sistema da un punto di vista fisico sono stati proposti in letteratura sia approcci deterministici che stocastici. Tuttavia, l’utilizzo di una o dell’altra tecnica dipende molto dalla tipologia di problema che si intende modellare, dal grado di dettaglio in relazione alle scale temporali e spaziali coinvolte e dalle ipotesi semplificative che si è disposti ad accettare.

In questo intervento, esamineremo come la struttura deterministica e le fluttuazioni casuali del regime fluviale [3] influenzano i processi ecomorfodinamici fluviali e come la loro combinazione possa aiutare nella definizione dei concetti di resistenza e resilienza alle perturbazioni degli ecosistemi fluviali.

Dopo un breve inquadramento bibliografico, esamineremo alcuni processi caratteristici dell’ecomorfodinamica fluviale dei quali l’autore e svariati collaboratori e studenti si sono fino ad oggi occupati.

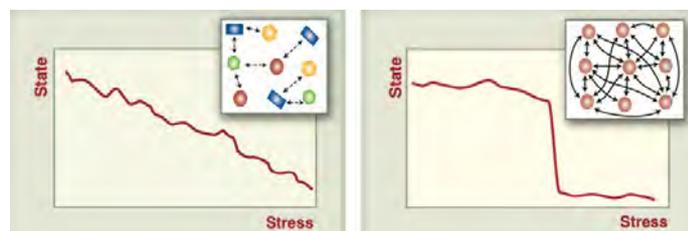
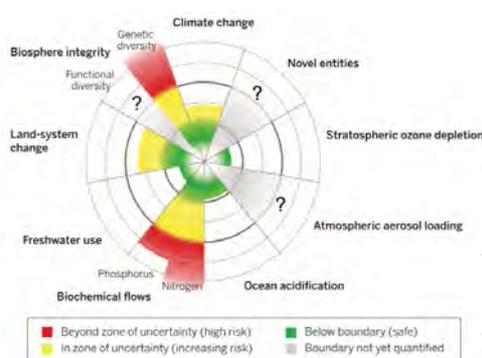


Figura 1 (adattate da [1,2]). (Sx) Processi terrestri fondamentali e relative zone di sicurezza (verde), medio rischio (giallo) ed alto rischio di incertezza (rosso) in prossimità dei limiti planetari. (Sopra) punti di equilibrio di sistemi complessi con possibile salto (shift) di stato al raggiungimento di un limite operativo dovuto ad un livello di perturbazione eccessivo (stress).

Sulla scia dei risultati delle scuole italiane e internazionali sulla modellazione morfodinamica [4], sull'interazione fiume-sedimenti e vegetazione riparia [5-9], prenderemo in considerazione aspetti biomorfodinamici aggiuntivi quali la crescita delle radici della vegetazione riparia [10,11] e la relativa dinamica allo sradicamento da erosione fluviale [12-14]. Uniremo tutti i processi sotto un unico modello alla scala puntuale [15], quasi interamente analitico, atto a definire i possibili punti di equilibrio di un sistema ecomorfodinamico al variare dell'intensità della perturbazione (Figura 2). In primo luogo, verrà dimostrato come l'adattamento dell'apparato radicale al regime fluviale caratterizzi la resilienza del sistema e come lo schema di Figura 1b,c possa apparire più complesso per via della presenza di molteplici punti di equilibrio innescati dalla dinamica della vegetazione sotto l'influenza della perturbazione. Questo sarà propedeutico per una migliore comprensione dei processi ecomorfodinamici e il loro ruolo nel ciclo del carbonio nei fiumi, come successivamente presentato da altri autori della giornata. Dimostreremo che le misure sostenibili poste a difesa dei confini planetari per i processi di acqua dolce devono garantire parte delle componenti deterministiche e stocastiche del regime fluviale. La conferenza si concluderà con una panoramica sulle nuove prospettive e opportunità per lo sviluppo transdisciplinare delle future scienze acquatiche e dell'ingegneria fluviale.

Bibliografia

- [1] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J. et al. (2015). Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, **347** (6223), DOI: 10.1126/science.1259855;
- [2] Scheffer, M., Carpenter, S. R., Lenton, T. M. et al. (2012). Anticipating critical transitions. *Science*, **338**, DOI: 10.1126/science.1225244 ;
- [3] Botter, G., Basso, S., Rodriguez-Iturbe, I. and A. Rinaldo (2013). Resilience of river flow regimes. *PNAS*, **110** (32), 12925-12930;
- [4] Blondeaux, P., Colombini, M., Seminara, G. and G. Vittori (2018). Introduction to morphodynamic of sedimentary patterns. GUP ;
- [5] Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L. and A. Gurnell (2013). Modeling the interaction between river morphodynamics and riparian vegetation. *Reviews of Geophysics*, **51**, 1–36.
- [6] Baerenbold, F., Crouzy, B. and P. Perona (2016). Stability analysis of ecomorphodynamic equations. *Wat. Resour. Res.*, **52**, 1070-1088
- [7] Bertoldi, W., Siviglia, A., Tettamanti, S. et al. (2014). Modeling vegetation controls on fluvial morphological trajectories. *GRL*, **41** (20);
- [8] Caponi, F., & Siviglia, A. (2018). Numerical modeling of plant root controls on gravel bed river morphodynamics. *GRL*, **45** (17);
- [9] Bertagni, M. B., Perona, P., & Camporeale, C. (2018). Parametric transitions between bare and vegetated states in water-driven patterns. *PNAS*, **115** (32);
- [10] Tron, S., Laio, F., & Ridolfi, L. (2014). Effect of water table fluctuations on phreato-phytic root distribution. *Journal of Theoretical Biology*, **360**, 102–108
- [11] Gorla, L., Signarbieux, C., Turberg, P., Buttler, A. and P. Perona, 2015. Transient response of *Salix* cuttings to changing water level regimes. *Wat. Resour. Res.*, **51**
- [12] Perona, P. and B. Crouzy (2018). Resilience of riverbed vegetation to uprooting by flow. *Proc. Royal Soc. London A*, **474**, 20170547.
- [13] Calvani, G., P. Perona, S. Zen, V. Bau and L. Solari (2019). Return times of plant uprooting by flow. *J. of Hydrol.*, **578**, 124103
- [14] Bau, V., G. Calvani, S. Zen, and P. Perona (2019). On the critical rooting depth determining plant uprooting. *Wat. Resour. Res.* **55**
- [15] Bau, V., Borthwick, A. G. L. and P. Perona (in revision). Vegetation root biomechanics and its role in river ecomorphodynamics. PhD thesis, University of Edinburgh;

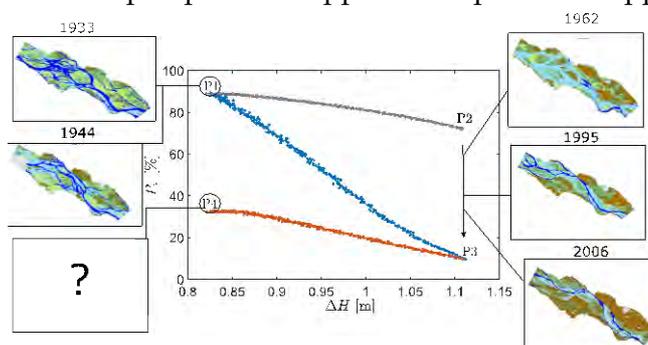


Figura 2 (adattata da [15]). Torrente Maggia (CH): sequenza di stati di equilibrio in termini di probabilità di sradicamento all'erosione fluviale (blu) per diversi livelli di perturbazione; punti di equilibrio che impediscono il ritorno alle condizioni iniziali (rosso). I pannelli mostrano l'evoluzione morfologica del corso d'acqua causata dalla messa in uso (1952-53) dei serbatoi (dighe) per uso idroelettrico.

Eco-Morfodinamica fluviale: uno spostamento di paradigma

Guido ZOLEZZI, Walter BERTOLDI, Francesco CAPONI, Alyssa Jennifer SERLET,
Simone ZEN, Aurelie KOCH, Marco TUBINO, Annunziato SIVIGLIA

(Università di Trento)

A partire dagli anni '90 la crescente consapevolezza della complessità dei fenomeni ambientali ha determinato, nella comunità scientifica, un progressivo emergere di nuove aree disciplinari all'interfaccia fra le scienze fisico-matematiche e le scienze della vita. L'eco-idraulica, in particolare, ha visto lo sviluppo della conoscenza di processi fisici con rilevanti implicazioni per gli ecosistemi fluviali, focalizzandosi perlopiù su fenomeni che avvengono "a fondo fisso". Più recentemente, secondo un percorso analogo a quanto accaduto decenni or sono nell'idraulica fluviale, la disciplina si è concentrata sulle mutue interazioni fra elemento vivo, in particolare la vegetazione riparia, il campo di moto e il trasporto dei sedimenti, spostando il paradigma verso un approccio "a fondo mobile", dando vita all'ambito ormai noto come "eco-morfodinamica" fluviale.

A partire da queste considerazioni, in questo intervento presentiamo una panoramica organica di processi biofisici che regolano l'evoluzione di forme fluviali in presenza di vegetazione riparia, in particolare barre alternate e meandri, integrando osservazioni sul campo e approcci modellistici sia numerici che a ridotta complessità. Tali processi vengono inquadrati secondo livelli diversi di interazione fra la vegetazione riparia e la morfodinamica fluviale, in base a un bilancio dinamico fra il "disturbo" di origine idrologica, principalmente associato a morbide e piene che tendono a rimuovere la vegetazione e la "resistenza" alla rimozione offerta dalle piante che a sua volta condizionata da e condiziona i processi di trasporto solido e il campo di moto. La presentazione mostra come approcci modellistici bio-fisicamente basati siano di notevole supporto alla comprensione di queste complesse dinamiche e, di conseguenza, a supportare la gestione sostenibile dei corsi d'acqua.

Ecomorfodinamica lagunare e il futuro delle aree umide costiere

Stefano LANZONI (Università di Padova)

Le regioni costiere sono progressivamente diventate più vulnerabili a eventi idrodinamici e atmosferici intensi, sollevando così importanti interrogativi sul loro destino e la loro resilienza in risposta al possibile riscaldamento globale del pianeta. Una varietà di fattori naturali e antropici hanno contribuito a questa fragilità: innalzamento del livello del medio mare, subsidenza, compattazione del suolo, ridotto apporto di sedimenti e ridotta estensione delle difese naturali costituite da unità morfologiche tipiche, quali barene e bassifondi (Figura 1a).

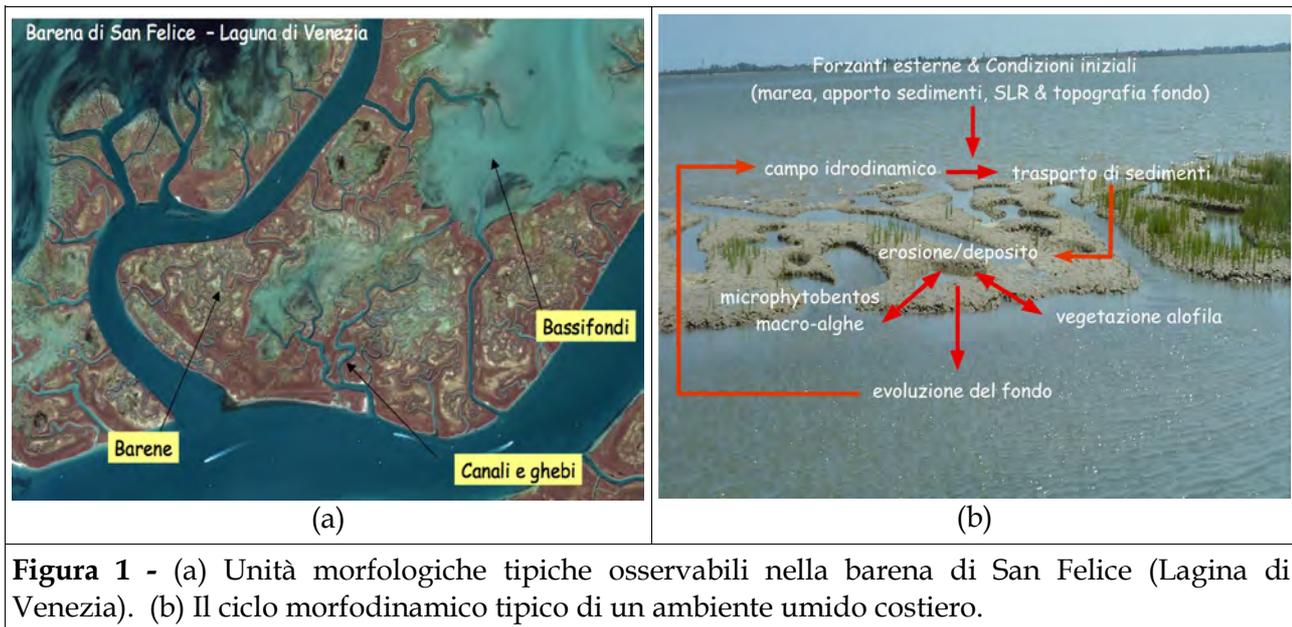


Figura 1 - (a) Unità morfologiche tipiche osservabili nella barena di San Felice (Laguna di Venezia). (b) Il ciclo morfodinamico tipico di un ambiente umido costiero.

La formazione e l'evoluzione di bassifondi e barene, in genere innervate da canali che trasportano e scambiano sedimenti e nutrienti sotto l'azione ricorrente della marea, sono controllati da complesse interazioni tra l'idrodinamica, il trasporto di sedimenti, i fenomeni di erosione e deposito, la dinamica della vegetazione alofila, che contribuisce alla formazione delle barene, e del micro-phyto-bentos e delle macro-alghe, che colonizzano i bassifondi (Figura 1b).

I canali a marea influenzano e, allo stesso tempo, sono influenzati dalla crescita delle barene e/o dei bassifondi che li circondano (Figura 2a). In particolare, la vegetazione promuove la formazione di reti di canali più complesse e con capacità di drenaggio più elevato. L'aumentata resistenza al moto offerta dalla vegetazione favorisce la concentrazione del flusso dell'acqua nei canali, tendendo ad inciderli maggiormente. D'altra parte, i sedimenti catturati dalla vegetazione e la produzione di suolo organico determinano un aumento dei tassi di crescita della quota della superficie di barena. Ne consegue una progressiva riduzione del prisma di marea (ovvero del volume d'acqua che durante il ciclo di marea fluisce complessivamente nel canale) che tende a produrre canali meno incisi. Il prevalere del primo o del secondo dei meccanismi sopra descritti dipende dal posizionamento temporale del sistema umido rispetto alla sua traiettoria evolutiva verso una configurazione finale di quasi equilibrio.

La tipologia di vegetazione, ed in particolare la quota alla quale una specifica vegetazione presenta la massima produzione di biomassa, rappresenta un ulteriore elemento di complessità che influenza la distribuzione spaziale dei sedimenti e della biomassa stessa, nonché il grado di complessità e di incisione della rete di canali.

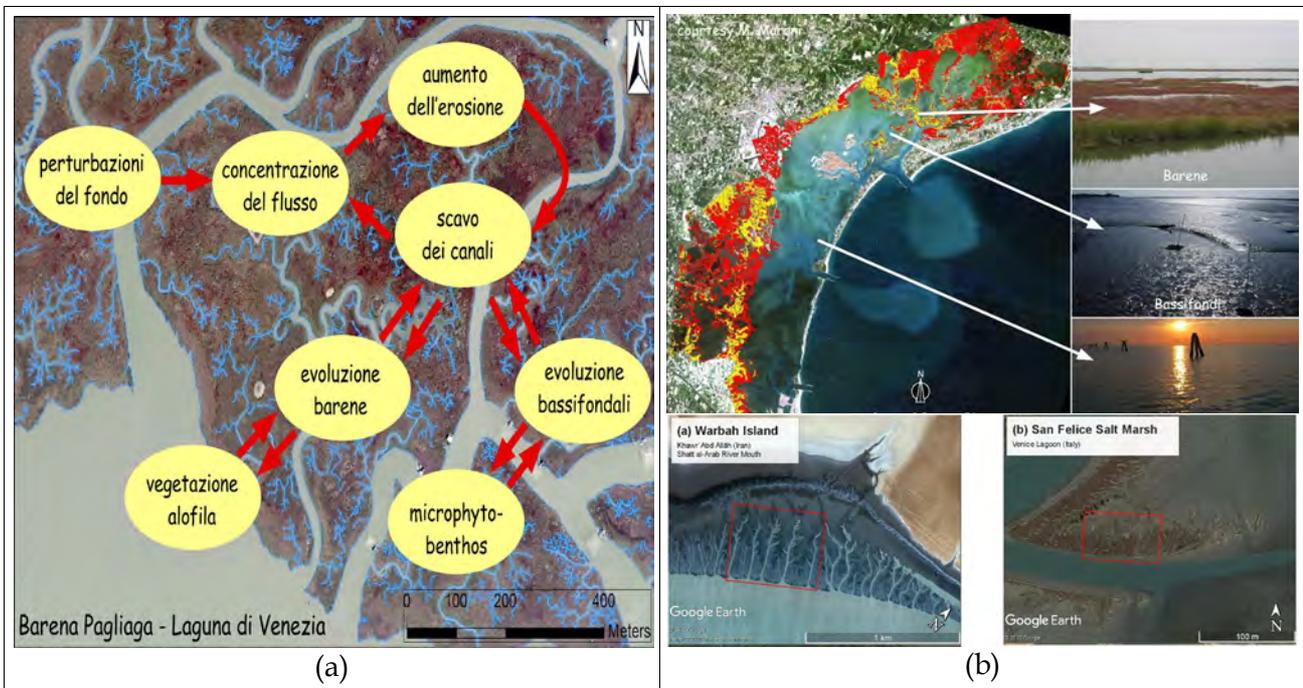


Figura 2 - a) Interazioni tra le varie unità morfologiche caratterizzanti gli ambienti umidi costieri. b) Forme morfologiche tipiche della laguna di Venezia e variazione delle aree di barena osservata nell'ultimo secolo (pannello superiore); reti di canali che drenano le aree di barena/bassofondo poste in fregio a un canale principale (pannello inferiore).

L'evoluzione accoppiata delle varie unità morfologiche risulta quindi un ingrediente chiave per comprendere il comportamento tipico degli ambienti umidi costieri. Utilizzando modelli di complessità via via crescente, che incorporano i vari meccanismi tipici (erosione/deposito; produzione di suolo organico e cattura di sedimento da parte della vegetazione alofila di barena; incremento della resistenza all'erosione dovuta alla crescita di biofilm bentonico e/o macro-alghe) nel presente contributo vengono analizzati l'emergere di eventuali stati puntuali di equilibrio stabile (Figura 2b, pannello superiore), il comportamento eco-morfodinamico monodimensionale di un canale e delle aree di barena/bassofondo che possono crescere in corrispondenza della sua testata, anche per l'effetto dell'azione del vento, la co-evoluzione della topografia del fondo di un canale e delle aree di barena ad esso adiacenti, la co-evoluzione di una rete di canali che innerva le barene/bassifondi posti in fregio ad un canale principale (Figura 2b, pannello inferiore).

Sessione 3

Il ruolo mancante della morfodinamica fluviale nel ciclo del carbonio

Carlo CAMPOREALE (Politecnico di Torino)

I fiumi sono sistemi estremamente dinamici, che esibiscono instabilità morfologiche di vario tipo. I fiumi reagiscono ai disturbi imposti dall'esterno (ad esempio la regolazione delle portate, la gestione del regime dei sedimenti, i cambiamenti climatici) esibendo transizioni planimetriche e altimetriche. Le interazioni mutue tra sedimento, vegetazione e idrodinamica giocano un ruolo fondamentale nell'evoluzione plano-altimetrica dei sistemi fluviali.

Recentemente, è emerso che i fiumi giocano un ruolo importante nel ciclo del carbonio. Mentre in passato i fiumi erano considerati come dei semplici "condotti" che passivamente trasportavano carbonio organico dalle terre ai mari, la letteratura ha evidenziato che essi sono in grado di produrre, trasportare e immagazzinare carbonio all'interno di diversi comparti del corridoio fluviale e sotto diverse forme. Più recentemente, questo concetto è stato esteso includendo lo scambio di carbonio tra il corridoio fluviale e la zona ripariale, attraverso i flussi iporreici e i processi legati all'erosione e alla deposizione di sedimenti e biomassa vegetale (ciclo del carbonio del fiume).

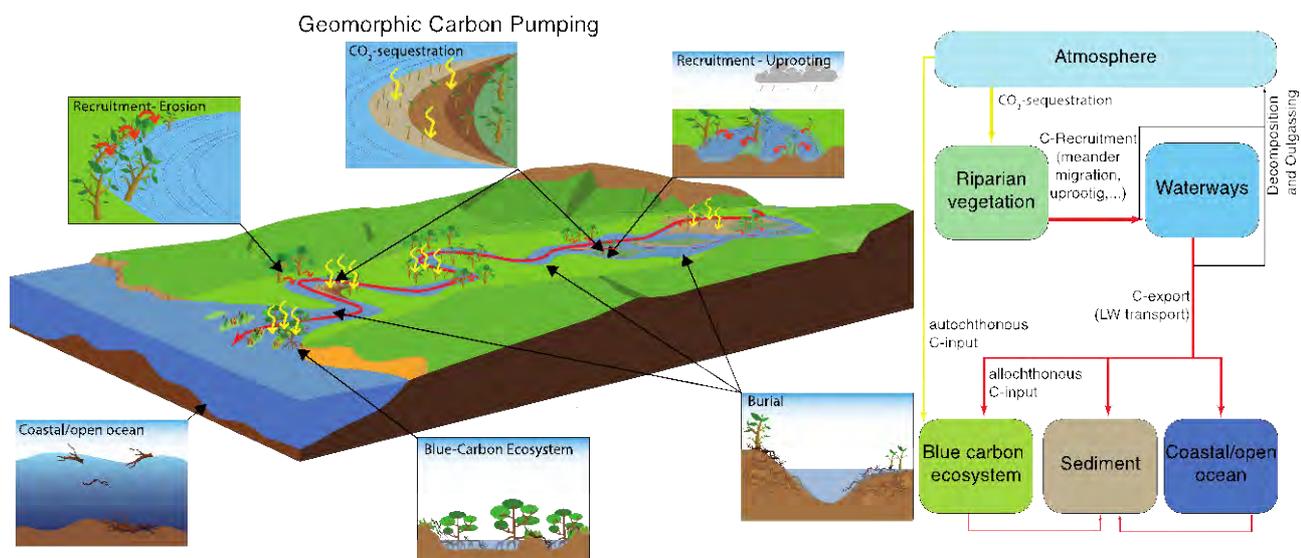


Figura 1 - La pompa geomorfica nel ciclo del carbonio

Nel presente contributo si mette in luce un nuovo meccanismo di pompaggio del flusso di carbonio (qui chiamato pompa geomorfica, Figura 1) che agisce dall'atmosfera verso la matrice liquida, e che è direttamente guidato dalla morfodinamica fluviale. La migrazione fluviale per erosione spondale e i fenomeni alluvionali inducono la rimozione di materiale vegetale ripario, ricco di carbonio organico, che viene parzialmente incamerato nei depositi fluviali (e quindi accumulato in maniera permanente) o trasportato verso l'oceano. In questo modo, il fiume libera porzioni di territorio dalla vegetazione, promuovendo la colonizzazione e la crescita di nuove piante, con il risultato netto di prelevare nuovamente carbonio dall'atmosfera attraverso il meccanismo della fotosintesi. Un fiume attivo e sano dal punto di vista morfodinamico presenta una pompa geomorfica efficace. Viceversa, la regolazione e l'arginatura del fiume riducono questo meccanismo.

Tramite un'analisi capillare di dati satellitari sviluppata sulla piattaforma Google Earth Engine, l'entità della pompa geomorfica è stata misurata in tutta la fascia tropicale, tra il 2000 e il 2019. A tale scopo sono stati utilizzati alcuni data-set contenenti informazioni sulla copertura vegetale e la densità di biomassa, con una risoluzione spaziale di 30 m. Sono stati analizzati nel dettaglio 550000 km² di territorio, 200 aste fluviali, per una lunghezza complessiva di 100000 km di fiume (Figura 2). Un algoritmo di filtering è stato sviluppato per escludere tutti i casi di rimozione vegetale non riconducibile alla dinamica fluviale. Le prime analisi suggeriscono che il flusso indotto dalla pompa geomorfica è pari a circa 100 milioni di tonnellate di carbonio all'anno, all'interno della sola fascia tropicale. Questa quantità è comparabile ad altri flussi tradizionalmente considerati nel ciclo del carbonio.

Lo studio pone degli interrogativi sulla gestione futura di alcuni bacini fluviali, con particolare riguardo alla realizzazione in programma di grosse dighe in varie regioni dell'area tropicale, come ad esempio nell'Amazzonia peruviana. La connessione causale tra trasporto solido, migrazione laterale e pompa geomorfica potrebbe infatti essere compromessa dalla presenza di invasi artificiali, i quali notoriamente sono un ostacolo al recapito di trasporto di materiale solido verso valle.

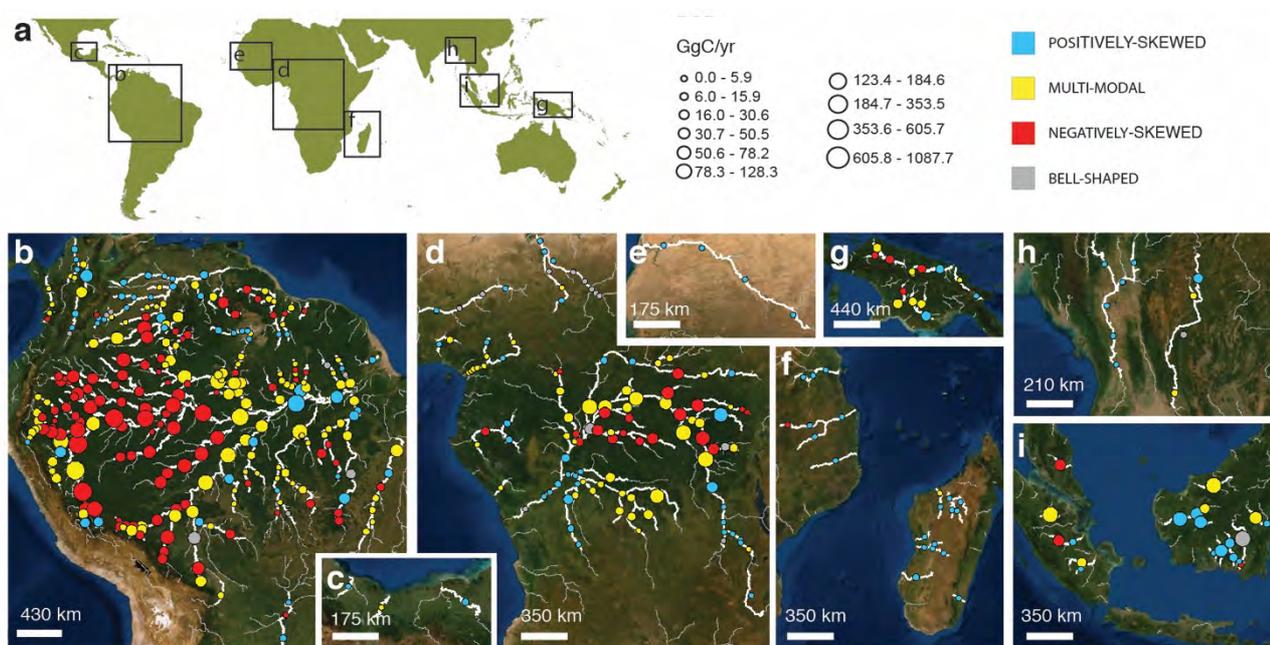


Figura 2 - Valutazione della pompa geomorfica in milioni di tonnellate di C / anno (GgC/yr) nella fascia tropicale

Il metabolismo delle reti fluviali

Enrico BERTUZZO (Università Cà Foscari, Venezia)

Le reti fluviali drenano, trasformano e trasportano carbonio e nutrienti dagli ecosistemi terrestri a quelli marini e oceanici, e quindi, sebbene ricoprono una piccola frazione delle terre emerse (circa lo 0.5%), hanno un ruolo fondamentale nei cicli biogeochimici globali. Storicamente le reti fluviali erano considerate come semplici "condotte" che traferivano carbonio organico dalla terra al mare. Solo recentemente il loro ruolo cruciale nel ciclo del carbonio è stato riconosciuto e anche il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC) ha raccomandato nel suo ultimo report una migliore integrazione degli ecosistemi acquatici terrestri nel ciclo globale del carbonio.

Le componenti principali del metabolismo fluviale sono la produzione primaria lorda (GPP Gross Primary Production), cioè il carbonio fissato dagli organismi autotrofi mediante fotosintesi, e la respirazione totale (ER Ecosystem Respiration), somma del carbonio organico respirato sia dagli organismi autotrofi che eterotrofi. Oltre alla produzione primaria che avviene all'interno dei fiumi stessi per opera principalmente di microorganismi algali, le reti fluviali drenano significative quantità di carbonio organico dagli ecosistemi terrestri adiacenti. Questo flusso può essere respirato ed evadere nell'atmosfera sotto forma di diossido di carbonio, può venire temporaneamente intrappolato nei sedimenti o può essere esportato verso il mare e gli oceani. Il bilancio tra questi flussi determina il regime metabolico delle reti fluviali che quindi rappresenta il collegamento tra i cicli del carbonio terrestre e acquatico. Inoltre, il metabolismo fluviale fornisce indicazioni sulla connettività biogeochimica dell'intera rete fluviale.

Lo studio dei processi metabolici fluviali ha ricevuto notevole attenzione negli ultimi decenni. Tuttavia, nonostante la connessione naturale tra i processi nelle acque correnti e l'eterogeneità intrinseca di tutti i fattori chiave influenzanti il metabolismo a scala di bacino, nessuna ricerca ha finora tentato di passare dalla stima e modellizzazione del metabolismo delle singole aste fluviali a quello della rete fluviale, in modo continuo sia nel tempo che nello spazio. In questa prospettiva, il contributo illustra i recenti sviluppi delle ricerche in questo ambito con particolare riferimento ai controlli idrologici del metabolismo fluviale e all'uso della teoria sulla forma frattale delle reti fluviali per estendere la conoscenza a livello locale, dove la maggior parte degli studi sperimentali si focalizza, alla scala di bacino, continentale e globale.

Il primo passo è lo sviluppo di un modello a scala locale in grado di stimare i flussi metabolici a partire da misurazioni di ossigeno ad elevata frequenza di campionamento, accoppiando la dinamica dell'ossigeno con due variabili di stato non osservate che descrivono l'evoluzione temporale di biomassa autotrofa ed eterotrofa. Il modello integra le attuali conoscenze sui fattori chiave del metabolismo e si pone come uno strumento complementare all'ampiamente utilizzato metodo a "single-station". Successivamente il contributo illustra il potenziale del machine learning nell'affrontare il problema di scala. L'algoritmo Random Forest è stato utilizzato per estrapolare predizioni per l'intera rete a partire da stime metaboliche a scala locale. Questo approccio è stato determinante per stabilire in modo affidabile regimi annuali su un'intera rete fluviale, per quantificare l'importanza dei driver metabolici, per valutare il contributo relativo dei corsi d'acqua, dai piccoli torrenti ai grandi fiumi, e per rivelare le proprietà che emergono dalla rete che formano. Sono state studiate la stabilità metabolica, l'allocalonia e le leggi di scala indotte dalla rete fluviale. Inoltre, lo stesso algoritmo è stato applicato sia alle osservazioni locali della temperatura dell'acqua corrente che della radiazione fotosintetica attiva rendendole disponibili su tutta la rete fluviale. Questo ha permesso di accoppiare il regime climatico (cioè i regimi di temperature e luce) con il modello di ecosistema a scala locale e, integrando la struttura

della rete, la vegetazione del bacino e il regime idrologico, sviluppare un framework di modellazione spazialmente distribuito in grado di simulare il funzionamento ecologico della materia organica (e quindi del metabolismo degli ecosistemi) su scala dell'intera rete, in modo tale da poter studiare la variabilità con cui gli ecosistemi utilizzano l'energia disponibile attraverso tutta la rete fluviale e valutare direttamente l'effetto del cambiamento climatico e idrologico.

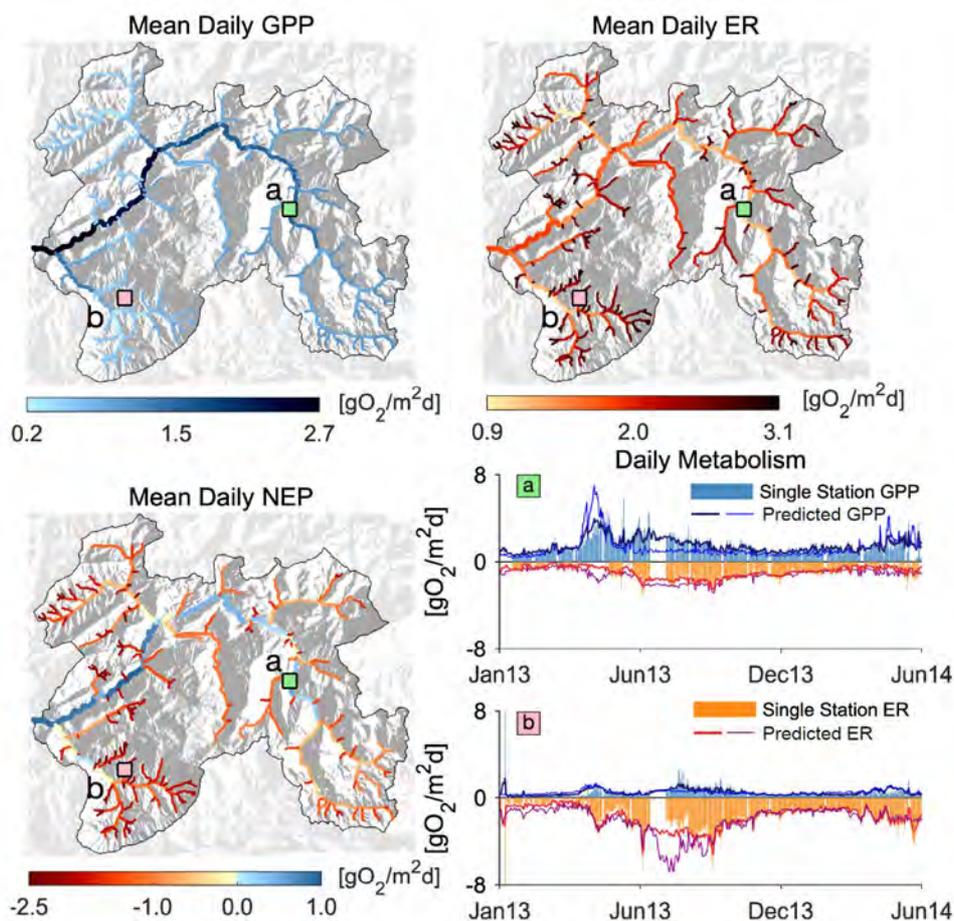


Figura 3 - Esempio di applicazione del framework alla rete del fiume Ybbs (Austria). Mappe: distribuzione spaziale dei valori medi annuali di GPP, ER and Produzione netta $NEP = GPP - ER$. Serie temporale di GPP e ER per i due tratti fluviali a e b indicati nelle mappe.

Bibliografia

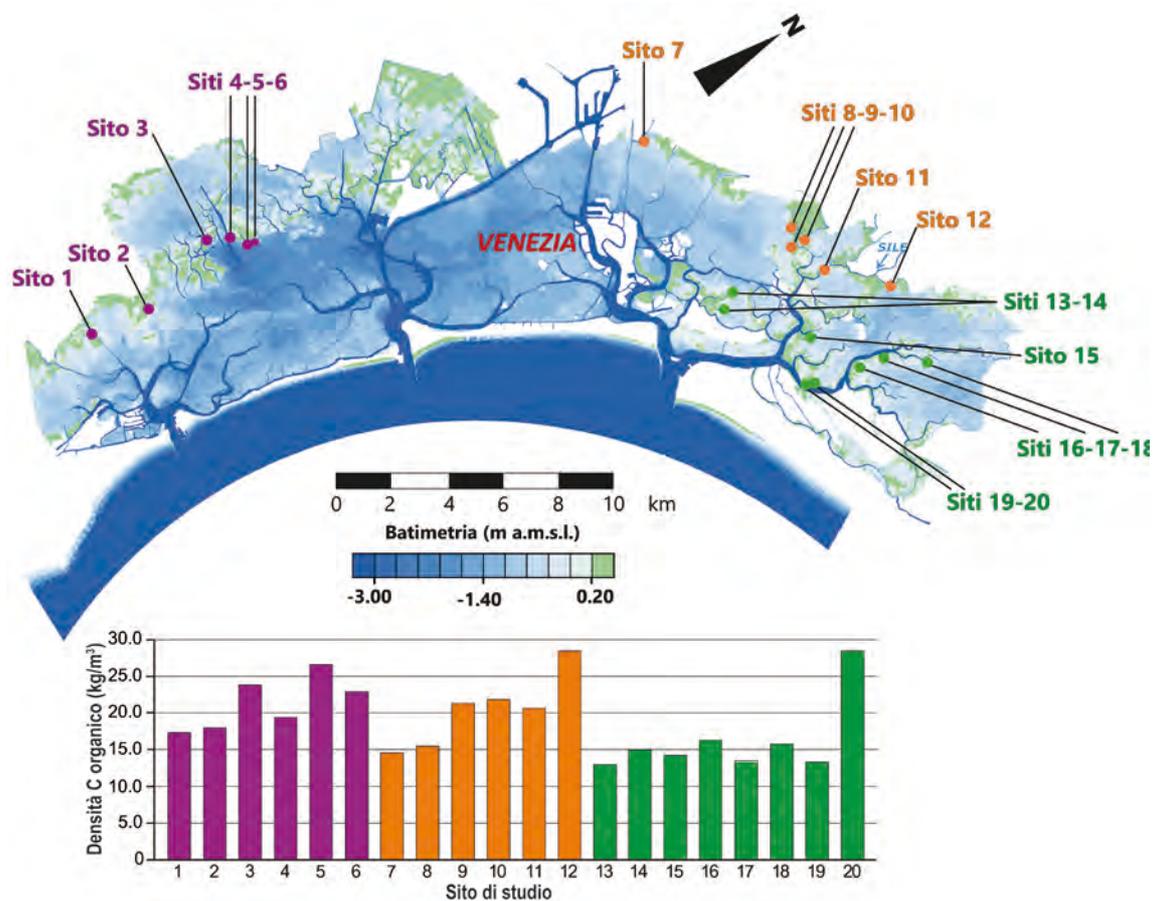
- Segatto, P. L., Battin, T. J., & Bertuzzo, E., The metabolic regimes at the scale of an entire stream network unveiled through sensor data and machine learning, *Ecosystems*. In press 2021, DOI: 10.1007/s10021-021-00618-8.
- Segatto, P. L., Battin, T. J., & Bertuzzo, E., Modeling the coupled dynamics of stream metabolism and microbial biomass, *Limnology and Oceanography*, 65 (7), 1573-1593, 2020.
- Bertuzzo, E., Helton, A. M., Hall, R. O., Battin, T. J., Scaling of Dissolved Organic Carbon Removal in River Networks, *Advances in Water Resources*, 110, 136-146, 2017

Dinamica accoppiata di vegetazione e morfologia: ruolo degli ambienti a marea nella cattura del carbonio

Andrea D'ALPAOS, Marco MARANI (Università di Padova)

Gli ambienti a marea offrono un ottimo esempio di ecomorfodinamica, l'evoluzione spaziale e temporale che emerge dalle mutue interazioni e dagli aggiustamenti tra idrodinamica, morfologia e componente biotica (Viles, 1988; Murray et al., 2008). I diversi processi di natura fisica e biologica che caratterizzano l'evoluzione degli ambienti a marea determinano i pattern bio-geomorfologici osservati (D'Alpaos et al., 2007; Marani et al., 2007; D'Alpaos e Marani, 2016) e permettono a tali ambienti di fornire importanti servizi ecosistemici (Costanza et al., 1997; Barbier et al., 2011). Ecosistemi costieri come barene, mangrovie e praterie di fanerogame trattengono le sostanze nutrienti dalle acque depurandole dagli inquinanti, supportano la biodiversità costituendo un habitat unico per diverse specie animali e vegetali, sostengono la pesca, proteggono le zone costiere moderando l'erosione e gli effetti degli eventi meteorologici intensi e possiedono una straordinaria capacità di sequestrare il carbonio atmosferico e stoccarlo nel suolo, grazie alla loro produttività primaria, associata alla sedimentazione ed all'accrescimento superficiale (Chmura et al., 2003; Macreadie et al., 2019). Barene, mangrovie e praterie di fanerogame, infatti, hanno una straordinaria capacità di catturare e immagazzinare carbonio blu – termine che indica il carbonio fissato dagli ecosistemi oceanici costieri, piuttosto che dai tradizionali ecosistemi terrestri verdi, come le foreste (Macreadie et al., 2019). Gli ecosistemi costieri sono tra i più efficienti per il sequestro della CO₂ atmosferica, aiutano a compensare le emissioni e contribuiscono a combattere i cambiamenti climatici. Essi possono immagazzinare fino al 30% del carbonio contenuto nel suolo terrestre (Trettin e Jurgensen, 2003) e intrappolarlo con tassi fino a 50 volte maggiori rispetto alle foreste verdi (McLeod et al., 2011). Inoltre, a differenza di queste ultime, che immagazzinano la maggior parte del carbonio nella biomassa superficiale dove esso è più vulnerabile al degrado, gli ecosistemi costieri possono immagazzinare l'80% del carbonio nel loro suolo, dove esso è intrappolato per centinaia di migliaia di anni. Ad esempio, le barene nell'area di San Felice (Laguna di Venezia settentrionale) possono sequestrare carbonio organico con tassi di circa 130 tonnellate C/(km² anno) (Roner et al, 2016). Risultati preliminari sul potenziale di stoccaggio del carbonio nelle barene della Laguna di Venezia meridionale, ottenuti sulla base di campionamenti di suoli di barena e analisi in laboratorio suggeriscono che queste possono sequestrare carbonio con tassi circa tre volte superiori a quelli delle barene di San Felice, sottolineando l'enorme potenziale di immagazzinamento di carbonio delle barene Veneziane (Figura 1), assieme alla sua notevole variabilità spaziale. Al giorno d'oggi, le barene della Laguna di Venezia potrebbero immagazzinare più di 6'000 tonnellate C l'anno (risultati preliminari non pubblicati).

Purtroppo le barene, come altri ecosistemi costieri, sono poco tutelate e stanno scomparendo con tassi allarmanti in tutto il mondo per effetto dei cambiamenti climatici e delle crescenti pressioni antropiche. Nella laguna di Venezia, ad esempio, l'estensione delle aree di barena si è ridotta dai 180 km² del 1810 agli attuali 43 km² (D'Alpaos, 2010) per effetto dei processi naturali, influenzati dai cambiamenti climatici e fortemente esacerbati dall'azione dell'uomo. La perdita di questo straordinario capitale naturale viene debolmente contrastata perché la conservazione degli ecosistemi di barena è costosa e, per mancanza di risorse finanziarie che si traduce in investimenti limitati, la loro salvaguardia è di solito intrapresa in modo subottimale. Sulla base di un approccio interdisciplinare che coniuga indagini e campionamenti in laguna, analisi in laboratorio, dati telerilevati e modelli di evoluzione biogeomorfologica, le nostre analisi mirano a migliorare le attuali conoscenze sulla capacità dei sistemi di barena di sequestrare carbonio contrastando i cambiamenti climatici, invertendo il paradigma che vede la loro conservazione e il loro ripristino come un costo piuttosto che un'opportunità.



Bibliografia

- Barbier, E.B. et al. (2011), The value of estuarine and coastal ecosystem services, *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.
- Chmura, G.L., S.C. Anisfeld, D.R. Cahoon, J.C. Lynch (2003), Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), doi:10.1029/2002GB001917.
- Costanza, R. et al. (1997), The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260.
- D'Alpaos, A., S. Lanzoni, M. Marani, and A. Rinaldo (2007), Landscape evolution in tidal embayments: modelling the interplay of erosion, sedimentation, and vegetation dynamics, *Journal of Geophysical Research- Earth Surface*, 112, F01008.
- D'Alpaos, A. e M. Marani (2016), Reading the signatures of biologic–geomorphic feedbacks in salt-marsh landscapes, *Advances in Water Resources*, 93, 265-275, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.004>.
- D'Alpaos, L. (2010), *Fatti e misfatti di idraulica lagunare*. Venice, Italy: Ist. Veneto di Sci. Lett. e Arti.
- Macreadie, P. I. et al. (2019), The future of Blue Carbon science, *Nature Communications*, 10(1), 1–13.
- Marani, M., A. D'Alpaos, S. Lanzoni, L. Carniello, and A. Rinaldo (2007), Biologically-controlled multiple equilibria of tidal landforms and the fate of the Venice lagoon, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11402, doi:10.1029/2007GL030178.
- Mcleod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., Lovelock, C.E., Schlesinger, W.H. and Silliman, B.R. (2011), A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9: 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Murray A., M.A.F. Knaapen, M. Tal, M.L. Kirwan (2008), Biomorphodynamics: physical-biological feedbacks that shape landscapes. *Water Resources Res.*44, W11301.
- Roner, M., A. D'Alpaos, M. Ghinassi, M. Marani, S. Silvestri, E. Franceschinis, N. Realdon (2016), Spatial variation of salt-marsh organic and inorganic deposition and organic carbon accumulation: Inferences from the Venice lagoon, Italy, *Advances in Water Resources*, 93, 276-287 <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.11.011>.
- Trettin, C.C.; M.F. Jurgensen (2003), Carbon Cycling in Wetland Forest Soils. In: *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. CRC Press. Boca Raton. 2003. p. 311-331 Edited by: Kimble, J.M.; Heath, Linda S.; Birdsey, Richard A.; Lal, R.
- Viles, H.A. (1988), *Biogeomorphology*, Oxford: Blackwell.

Eco-geomorfologia delle torbiere

Sonia SILVESTRI (Università di Bologna - Duke University, Durham, USA) - Neal Flanagan, Curtis RICHARDSON (Duke University, Durham, USA) - Helgard ANSCHÜTZ, Asgeir O. K. LYSDAHL (Norwegian Geotechnical Institute, Oslo) - Gusti Z. ANSHARI (Tanjungpura University, Pontianac, Indonesia) - Craig W. CHRISTENSEN, Andreas A. PFAFFHUBER (EMerald Geomodelling AS, Norway) - Xavier COMAS (Florida Atlantic University, Boca Raton, USA) - Noah DEWAR, Rosemary KNIGHT (Stanford University, USA) - Neal FLANAGAN, (Duke University, Durham, USA) - Andrea VIEZZOLI (Aarhus Geophysics, Risskov/Cascina)

La vegetazione delle torbiere nasce, cresce e muore modificando nel tempo il profilo della torbiera stessa ed accumulando nel suolo umido enormi quantità di sostanza organica non decomposta. Come in un qualsiasi altro ecosistema, le piante delle torbiere utilizzano l'energia solare per trasformare l'anidride carbonica in sostanza organica che permette loro di crescere. Durante il loro ciclo di vita le piante perdono foglie e altri tessuti e infine muoiono, accumulando sostanza organica nei suoli. In ambienti ricchi di ossigeno questa sostanza organica viene presto degradata dai microrganismi decompositori, rilasciando anidride carbonica che rientra nel ciclo globale. Quando però il suolo è saturo d'acqua, come accade nelle torbiere attive, la sostanza organica stenta a decomporsi, accumulandosi per migliaia d'anni e dando vita alla torbiera. Questo processo permette agli ambienti umidi di immagazzinare un'enorme quantità di carbonio organico che, protetto dalla presenza dell'acqua, non torna più in atmosfera. Si stima che nei suoli delle torbiere del mondo sia accumulato più carbonio organico di quello contenuto nella biomassa vegetale di tutte le terre emerse.

Così come l'abbondanza d'acqua è fonte di vita per questi ecosistemi, la sua mancanza innesca processi di degrado che portano all'ossidazione della sostanza organica con conseguente rilascio di anidride carbonica in atmosfera e con evidenti conseguenze legate al riscaldamento globale. Purtroppo sono numerose le cause di degradazione delle torbiere: drenaggio e bonifica dei suoli torbosi per scopi agricoli, incendi di origine antropica e naturale, aumento della frequenza di periodi siccitosi dovuto ai cambiamenti climatici. Si stima che, a livello globale, le torbiere degradate rilascino in media più di 2 Gt di carbonio ogni anno.

Malgrado il ruolo fondamentale che questi ambienti giocano per la mitigazione dei cambiamenti climatici, le nostre conoscenze sulle reali dimensioni di questi ambienti umidi sono limitate. È necessario un cambio di prospettiva, e di scala, per affrontare in modo efficace il problema di quantificare e caratterizzare con precisione le torbe a scala regionale e, in prospettiva, a scala globale. Per fare questo è impensabile affidarsi alle campagne di misura tradizionali, che si basano su osservazioni puntuali. L'unico approccio ragionevole deve includere il telerilevamento, cioè l'osservazione del territorio tramite strumenti montati su piattaforme satellitari o aeree. Questo tipo di rilievo necessita naturalmente di un'apposita calibrazione con dati a terra, ma permette poi di estendere le osservazioni su vasta scala, con costi limitati e risultati affidabili se opportunamente validati.

In questo lavoro descriviamo un approccio multi-sensore da remoto che permette di estrarre il modello tridimensionale delle torbiere, che esse si trovino in zone tropicali o subpolari, svelandone la variabilità morfologica superficiale e profonda. Questo approccio supera le tradizionali tecniche di telerilevamento, che permettono di esplorare solo ciò che si trova al di sopra della superficie del suolo, registrando un segnale che proviene dal sottosuolo. Ciò è possibile grazie all'uso di uno strumento geofisico trasportato da elicottero, che produce un campo magnetico in grado di penetrare nel sottosuolo e indurre una

corrente elettrica che, fluendo nel mezzo, genera un campo magnetico secondario captato dallo strumento stesso. Il decadimento nel tempo del campo magnetico secondario permette di inferire la natura dei materiali, individuando anche le torbe. Le applicazioni in due siti di studio, uno in Norvegia e uno in Indonesia (Silvestri et al. 2019a; Silvestri et al. 2019b), hanno dimostrato come l'accuratezza nell'individuazione della base delle torbiere sia di circa 1 m, valore molto buono se consideriamo che in entrambi i siti di studio la profondità della torba è in media più di 3 m, con picchi che superano i 7 m in vaste aree.

Come possiamo vedere in Figura 1, l'accoppiamento di misure geofisiche da elicottero con dati da laser scanner (LiDAR) permette di descrivere sia la vegetazione che cresce sopra la superficie del terreno, sia lo strato di torba che si trova nel sottosuolo. Questo consente di stimare in modo complessivo il contenuto di carbonio organico dell'ecosistema di torbiera, con evidenti vantaggi non solo per lo studio di questi ambienti ma anche e soprattutto per attribuire loro il valore che meritano e la protezione che necessitano.

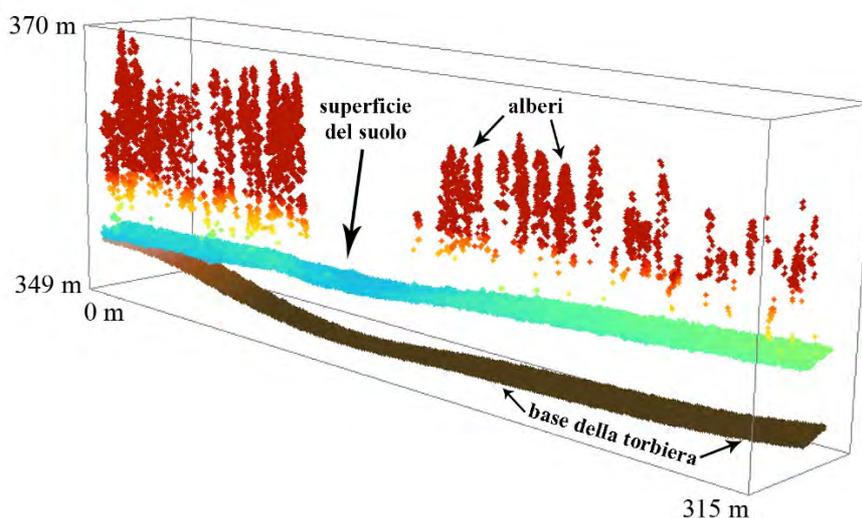


Fig. 1 - Sezione di una torbiera norvegese (nei pressi di Brøttum). Quote estratte da una combinazione di dati acquisiti con laser scanner (LiDAR) e con sensore geofisico da elicottero SkyTEM.

Bibliografia

Silvestri, S.; Christensen, C.W.; Lysdahl, A.O.; Anshütz, H.; Pfaffhuber, A.A.; Viezzoli, A. Peatland Volume Mapping Over Resistive Substrates With Airborne Electromagnetic Technology. *Geophys. Res. Lett.* 2019a, 46, 6459–6468.

Silvestri, S.; Knight, R.; Viezzoli, A.; Richardson, C.J.; Anshari, G.Z.; Dewar, N.; Flanagan, N.; Comas, X. Quantification of Peat Thickness and Stored Carbon at the Landscape Scale in Tropical Peatlands: A Comparison of Airborne Geophysics and an Empirical Topographic Method. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2019b, 124, 3107–3123.

PhD Session

Il ruolo del regime idrologico nella crescita di vegetazione sulle barre fluviali

Matteo B. BERTAGNI (Princeton University)

Il bioma ripario è un habitat di transizione tra l'ambiente acquatico e quello terrestre, caratterizzato da un'enorme biodiversità e da una dinamica complessa in cui acqua, sedimento e vegetazione si influenzano mutualmente (*ecomorfodinamica*). Uno dei problemi chiave dell'ecomorfodinamica fluviale è comprendere in quali condizioni -idrologiche e morfologiche - la vegetazione riesca a crescere sulle isole di sedimento chiamate barre.

In questo intervento, illustro due possibili approcci modellistici al problema:

1. Una modellazione analitica che origina dalle equazioni fondamentali dell'ecomorfodinamica
2. Una metodologia integrata che unisce modellazione teorica a simulazioni numeriche e analisi di campo

1. Transizione parametrica tra barre vegetate e spoglie (modellazione analitica, Bertagni et al., 2018)

La domanda che ha dato origine a questo lavoro è: *come mai in alcuni fiumi le barre sono coperte da una fitta vegetazione e in altri invece le barre sono spoglie?* (Figura 1)

Per provare a rispondere, abbiamo sviluppato una teoria analitica che unisce i tre processi fondamentali dell'ecomorfodinamica: una portata variabile, il trasporto di sedimento con la conseguente formazione delle barre alternate e la crescita di vegetazione. In particolare, la formazione delle barre è studiata tramite un'analisi di stabilità -- lineare e nonlineare -- che definisce le caratteristiche geometriche delle barre in funzione di una certa portata formativa. La crescita di vegetazione è modellata come un'instabilità secondaria - risolta tramite teoria di Floquet - che definisce in quali aree delle barre la vegetazione riesce a proliferare in funzione della portata variabile. I risultati mostrano che la variabilità della portata gioca un ruolo chiave nella crescita della vegetazione e che un'eccessiva variabilità può essere d'impedimento per la crescita di vegetazione.



Figura 4 - Barre vegetate sul fiume Isère in Francia (a) e barre spoglie sul Reno Alpino (Svizzera).

2. Applicazione di un modello stocastico a un ambiente ripariale (metodologia integrata, Latella et al., 2020)

Questo lavoro ha lo scopo di combinare diversi approcci scientifici (analisi di campo, simulazioni numeriche e modellazione analitica) in un'unica metodologia che ha come obiettivo la calibrazione di un modello stocastico di crescita di vegetazione ripariale a un caso reale. In questo modo si ha poi uno strumento - relativamente semplice - per fare previsioni sulla risposta dell'ambiente ripariale, per esempio, a variazioni nella forzante idrologica.

Le prime fasi richiedono una raccolta dati di sedimento, topografia, andamento storico delle portate e vegetazione (dati Lidar e analisi di campo). La seconda fase consiste in simulazioni numeriche (Delft 3D) per definire le statistiche idrologiche (e.g., la pdf dei livelli) in ogni punto dell'ambiente ripariale. Nella

terza fase si procede alla calibrazione dei parametri biologici del modello stocastico sulla base dei dati raccolti. Una volta calibrato, il modello può essere usato per fare previsioni future sulla risposta della vegetazione ripariale a variazioni del regime idrologico indotte, per esempio, dal cambiamento climatico.

La Figura 2 mostra un esempio dell'applicazione di tale metodologia a due barre del Rio Cinca, in Spagna.

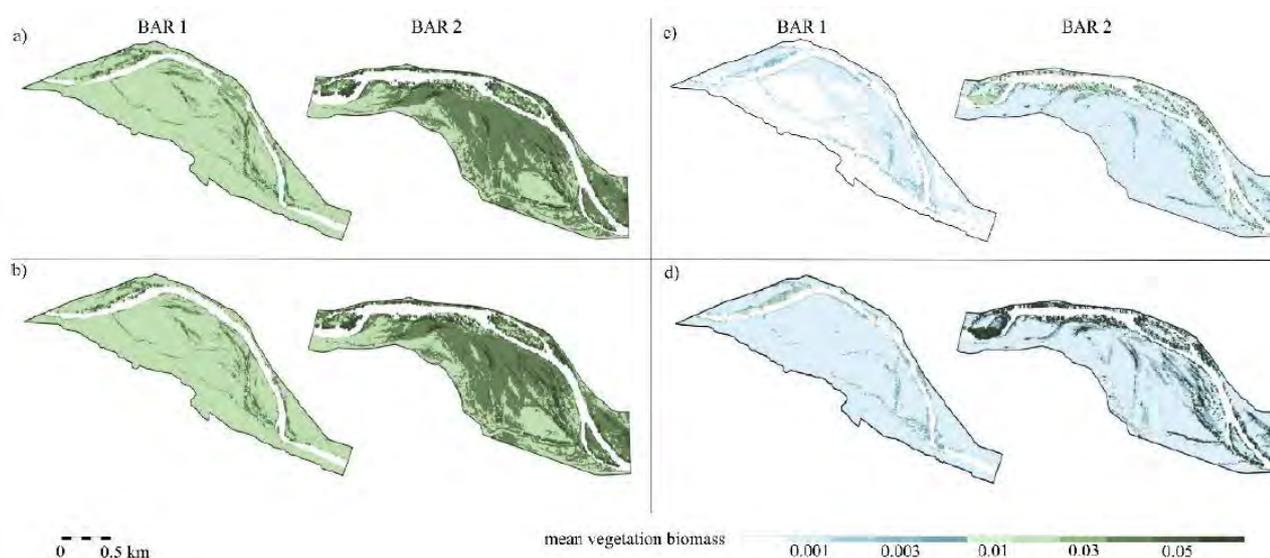


Figura 2 - Biomassa reale (a) e modellata (b) su due barre fluviali del Rio Cinca, Spagna. (c-d) Biomassa in due possibili scenari futuri in cui la portata si riduce del 40% (Alfieri et al., 2015). (c) La vegetazione non adotta meccanismi adattivi. (d) La vegetazione risponde con meccanismi adattivi alla riduzione del livello dell'acqua.

Bibliografia

Alfieri L, Burek P, Feyen L, Forzieri G (2015) Global warming increases the frequency of river floods in Europe, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2247-2260

Bertagni, M. B., Perona, P., & Camporeale, C. (2018). Parametric transitions between bare and vegetated states in water-driven patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(32), 8125-8130.

Latella, M., Bertagni, M. B., Vezza, P., & Camporeale, C. (2020). An integrated methodology to study riparian vegetation dynamics: From field data to impact modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(8), e2020MS002094.

Influenza delle caratteristiche morfologiche delle piante sulla sopravvivenza della vegetazione riparia al passaggio delle piene

Francesco CAPONI (ETH, Zürich - Università di Trento)

La vegetazione riparia riveste un ruolo fondamentale nell'ecosistema fluviale grazie alla sua capacità di interagire con i processi idromorfodinamici. Le piante infatti sono in grado di modificare il campo di moto dell'acqua e il trasporto dei sedimenti in modo da favorire la formazione di specifiche morfologie fluviali. Tuttavia, la presenza di vegetazione nelle zone alluvionali dipende da questi stessi processi, i quali regolano i tassi di crescita e mortalità delle piante. La destabilizzazione dell'equilibrio tra vegetazione e processi idromorfodinamici può causare una serie di effetti a livello di ecomorfodinamica fluviale tuttora difficili da prevedere, soprattutto alla luce del graduale cambiamento del regime idrologico e climatico a livello globale.

Le piante influenzano i processi idromorfodinamici, quali erosione e deposito di sedimenti, grazie a specifiche caratteristiche morfologiche. La densità della parte aerea (sopra terra) delle piante è responsabile della modifica del campo di moto e del trasporto dei sedimenti, mentre l'altezza (e flessibilità) della pianta determina la sua resistenza a fenomeni di interrimento. La parte sotterranea della pianta, costituita dalle radici, è invece fondamentale per l'estrazione di acqua dalla falda e l'ancoraggio della pianta al suolo. Le differenze nella morfologia delle piante hanno quindi un ruolo importante per capire i processi ecomorfodinamici. Tuttavia, l'assenza di dati non permette ancora una chiara comprensione del fenomeno e dei potenziali effetti sia sulla morfologia del fiume sia sulla sopravvivenza delle piante stesse.

Per capire tali fenomeni abbiamo sviluppato un modello numerico bidimensionale su acqua bassa che permette di descrivere i processi di morfodinamica fluviale, evoluzione della vegetazione, e di interazione tra piante e trasporto di sedimenti (Caponi et al., 2020). Il modello include le caratteristiche morfologiche più importanti delle piante dal punto di vista ecomorfodinamico, tra cui la densità della parte aerea di vegetazione e la profondità delle radici (Figura 1a). Tramite l'utilizzo di parametri che descrivono l'oscillazione del livello di falda, fondamentale per i processi di crescita vegetale, il modello è in grado di simulare l'evoluzione di diversi tipi di piante a seconda della capacità di queste di sviluppare più rapidamente biomassa sotterranea o aerea. L'obiettivo è quello di capire l'influenza di tali caratteristiche sulla sopravvivenza delle piante al passaggio delle piene. In questo studio il modello è stato applicato ad una morfologia a barre alternate migranti e stazionarie, le quali presentano risposte morfodinamiche diverse al passaggio delle piene, nelle quali si è simulato un processo di colonizzazione della vegetazione. Si sono quindi testati diversi tipi di vegetazione e si è utilizzato un regime idrologico caratterizzato da eventi di piena di diversa intensità, durata, e frequenza.

I risultati dello studio mostrano che il tipo di vegetazione può avere un effetto significativo sulla mortalità delle piante sulle barre fluviali. Questo effetto dipende per lo più dalla risposta morfodinamica della barra al passaggio della piena e dalla resistenza della vegetazione maturata durante periodi di portate morfologicamente non attive. Le barre migranti, che sono soggette a processi di erosione rilevanti anche durante piene di minore intensità, limitano lo sviluppo della vegetazione indipendentemente dalle loro caratteristiche morfologiche, mentre sulle barre stazionarie, la vegetazione mostra tassi di mortalità inferiori (Figura 1b), che dipendono dalla velocità di approfondimento delle radici e dalla densità della parte aerea della vegetazione, nonché dalle caratteristiche della piena. Lo sviluppo di radici in profondità infatti permette alla pianta di raggiungere il livello di falda e resistere

allo sradicamento, mentre la maggiore densità aerea limita lo scavo e permette di contrastare fenomeni di interrimento, che si sono dimostrati dominanti durante piene di lunga durata e modesta intensità (Figura 1c).

Questo studio mette in evidenza come le caratteristiche della vegetazione riparia siano importanti per predire la co-evoluzione di vegetazione and morfologia fluviale. Quantificare la resilienza delle piante al passaggio delle piene è ad esempio cruciale per la progettazione di interventi di riqualificazione e gestione fluviale.

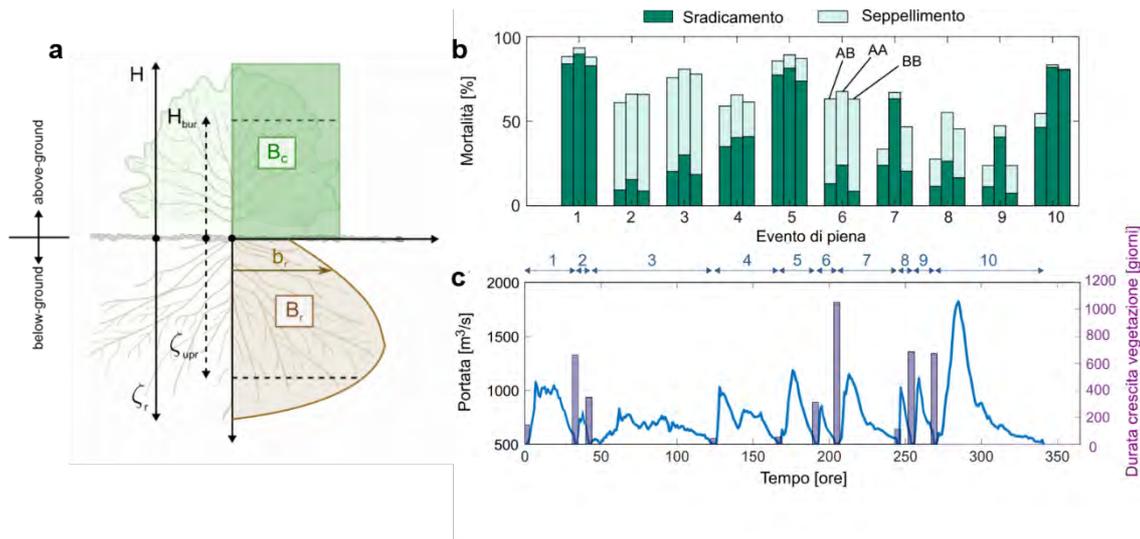


Figure 1 - a) Caratteristiche morfologiche della pianta modellate, b) tasso di mortalità per sradicamento e seppellimento a seguito di ogni piena per tre diversi tipi di vegetazione simulata (AA, BB, AB) su barre stazionarie, c) eventi di piena simulati e relativi periodi di crescita della vegetazione. Modificato da Caponi et al. 2020.

Bibliografia

Caponi, F., Vetsch, D. F., & Siviglia, A. (2020). A model study of the combined effect of above and below ground plant traits on the ecomorphodynamics of gravel bars. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74106-9>

***La diffusione di una malattia letale per i salmonidi:
ruoli connessi di acqua, clima e vegetazione***

Luca CARRARO (University of Zurich - EAWAG, Dübendorf)

La malattia renale proliferativa (*proliferative kidney disease* - PKD) rappresenta una delle minacce più incombenti per la salute delle popolazioni di salmonidi che risiedono nei fiumi temperati di Europa e Nord America. La proliferazione del suo agente patogeno (il mixozoo *Tetracapsuloides bryosalmonae*) all'interno del rene del pesce infetto e la conseguente mortalità legata alla malattia sono strettamente collegate all'incremento di temperatura dell'acqua. Pertanto, la PKD costituisce un pericolo ancora più grave per i salmonidi (oltre che per l'intero ecosistema fluviale, considerando il ruolo chiave da essi esercitato) negli anni a venire, a causa del cambiamento climatico.

In questo lavoro, l'impatto della PKD è stato valutato mediante un approccio modellistico che combina processi epidemiologici locali, dinamiche spaziali della metapopolazione di pesci, ruolo dei controlli idrologici e climatici e studi sulla presenza dell'ospite intermedio (il briozoo sessile *Fredericella sultana*) nei bacini fluviali. Mediante simulazioni, si è rilevato come un incremento di temperatura di 4 °C (come previsto dallo scenario RCP8.5 proposto dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change*) potrebbe portare ad un aumento della mortalità legata alla PKD del 25%, nonché a un sensibile incremento della velocità di invasione della malattia in corsi d'acqua non contaminati. Un caso di studio in un bacino fluviale svizzero, in cui sono stati integrati dati sulla presenza di trote e loro livello di infezione, temperature dell'acqua e tracce di DNA ambientale rilasciato dai briozoi, ha evidenziato come la distribuzione spaziale di questi ultimi sia un fattore cruciale nel determinare il rischio di infezione a livello di bacino. Si propone pertanto l'eradicazione selettiva di briozoi come possibile strategia di mitigazione dell'impatto della PKD.