

Avventure nella Zona Critica: una vita all'interfaccia

Antonello Provenziale*

SUNTO – La Zona Critica è un sottile strato che va dal fondo dell'acquifero superficiale alla cima della vegetazione. Qui avvengono tutti i processi fisici, chimici, geologici e biologici che sostengono gli ecosistemi terrestri. È uno strato che comprende il suolo, l'acqua, gli organismi viventi, i gas e le rocce, dove la biosfera e la geosfera interagiscono in modo inestricabile e la cui buona salute risulta estremamente importante, critica appunto, per la nostra stessa sopravvivenza. In questo contributo viene descritto come si studia questa componente essenziale del nostro pianeta, per poter sviluppare e valutare le migliori strategie di conservazione e gestione.

PAROLE CHIAVE – Zona Critica; Ecosistema; Pianeta Terra.

ABSTRACT – The Critical Zone is a thin layer going from the bottom of the surface aquifer to the top of vegetation canopy, where all physical, chemical, geological and biological processes sustaining terrestrial ecosystems take place. This layer includes soil, water, living organisms, gases and rocks, which together generate a complex system where geosphere and biosphere dynamics are inextricably linked. The good health of the Critical Zone is related to the integrity of such dynamics and it is essential for our own survival. Here I describe how this essential component of our planet is measured and modelled, with the ultimate goal of supporting the most appropriate conservation and management actions.

KEYWORDS – Critical Zone; Ecosystem; Planet Earth.

* Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (Socio corrispondente non residente). Istituto di Geoscienze e Georisorse, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Torino, Italia. E-mail: antonello.provenzale@cnr.it. Relazione tenuta il 7 novembre 2024.

Rendiconti 158.2/2025, Doi 10.3280/rndoa2025oa-21162

Copyright © FrancoAngeli.

This work is released under Creative Commons Attribution Non-Commercial – No Derivatives License.
For terms and conditions of usage please see: <http://creativecommons.org>.

1. LA ZONA CRITICA

Tutti noi viviamo in un'interfaccia di pochi chilometri, fra il dominio ipogeo della Terra, caratterizzato da temperature e pressioni sempre più alte quanto più scendiamo in profondità, e il mondo rarefatto, freddo e ostile dello spazio cosmico che circonda il nostro pianeta. Tutti gli organismi viventi che conosciamo, e che insieme all'ambiente in cui vivono compongono la biosfera, conducono la loro esistenza entro questo guscio sottile, caratterizzato da forti gradienti di proprietà chimiche, fisiche e termodinamiche. Per quanto sappiamo oggi, soltanto pochi organismi si sono avventurati oltre l'atmosfera del loro pianeta di origine: forse qualche batterio intrappolato involontariamente in una meteorite, e alcuni esploratori terrestri che sono arrivati fino al nostro satellite.

Oggi, la maggior parte della biosfera terrestre ricava energia dalla luce del Sole, mediante i processi della fotosintesi aerobica. I produttori primari, organismi autotrofi come piante o alghe, utilizzano la luce della nostra stella per trasformare acqua e anidride carbonica in materia organica (e ossigeno), sostenendo tutta la rete trofica dei consumatori eterotrofi che su questa si basano. Ma la fotosintesi avviene solamente in uno strato verticale ancora più sottile, di poche centinaia di metri, confinato nelle acque superficiali dei mari e degli oceani (il cosiddetto strato eufotico) e nelle poche decine di metri occupate dalla chioma della vegetazione sulle terre emerse. Qui si trova la sorgente di energia di tutta la biodiversità e della dinamica della maggior parte degli ecosistemi del nostro pianeta – almeno, di quelli che utilizzano la luce solare come sorgente di energia.

Agli inizi di questo secolo, il National Research Council statunitense utilizzò il termine “Zona Critica” (*Critical Zone*), per indicare lo strato sulla superficie delle terre emerse che va dal fondo dell'acquifero superficiale alla cima della vegetazione (USNRC, 2001). Questo strato include le rocce, il suolo, gli organismi viventi (dal microbiota alla vegetazione e la macrofauna), l'acqua (superficiale e sotterranea) e l'atmosfera a contatto con il terreno. Nella Zona Critica avvengono tutti i principali processi che sostengono gli ecosistemi terrestri, inclusa l'alterazione delle rocce, la formazione di suolo, i complessi cicli biogeochimici che legano fra loro, in modo inestricabile, l'ambiente inorganico e gli esseri viventi (White e Provenzale, 2024). Un sistema altamente integrato, complesso, caratterizzato da interazioni multiple a tutte le scale di spazio e di tempo, che è stato anche poeticamente

definito come «lo strato dove la roccia incontra la vita». Questo strato è detto “critico” perché costituisce il sostegno a tutti gli ecosistemi e agroecosistemi terrestri, ed è quindi cruciale per la nostra esistenza, ma è critico anche perché è oggi minacciato da impatti antropici negativi quali il cambiamento climatico, l’inquinamento, la perdita di biodiversità, la modifica dei cicli biogeochimici e il degrado del suolo.

Semplificando, la Zona Critica è composta da uno strato superficiale, con un suolo maturo e ricco di sostanza organica e di vita, sopra il quale troviamo la parte fuori terra della vegetazione, dai pochi centimetri delle piante d’alta quota alle decine e decine di metri delle foreste equatoriali. In questo strato, la parte più bassa dell’atmosfera è in contatto diretto con il suolo e con la vegetazione, in una interazione continua che scambia energia, acqua, anidride carbonica, talvolta metano, composti organici volatili e tante altre componenti, con un controllo reciproco fra vegetazione e moti atmosferici. Scendendo più in profondità, il suolo lascia il posto alla regolite, con composizione più minerale, e più giù ancora alla roccia solo parzialmente alterata, fino ad arrivare alla roccia “fresca”, ma spesso frammentata, in cui spesso si insinuano le radici più profonde delle piante.

In molti casi, la parte più superficiale della Zona Critica ha un contenuto d’acqua che non satura i pori e gli interstizi, formando la zona insatura, o vadosa, come è chiamata in idrologia. Sotto una certa profondità, invece, l’acqua in genere satura i pori del sedimento o le fratture della roccia, generando le falde acquifere libere, o freatiche, così importanti per gli usi potabili o irrigui. La separazione fra la zona insatura superficiale e la zona satura è chiamata superficie freatica. Questa superficie di separazione si muove verticalmente in base al bilancio fra precipitazione, infiltrazione dell’acqua meteorica, evapotraspirazione e possibili emungimenti da parte umana. In alcune aree, la superficie freatica arriva alla superficie del suolo o anche più su; si formano allora, ad esempio, le aree umide. Nelle zone desertiche, la superficie freatica può invece essere molto profonda. Nelle aree calcaree, poi, le grotte formate dai processi carsici creano una circolazione di aria e acque sotterranee e fanno parte a pieno titolo della parte profonda della zona insatura e, più in generale, della Zona Critica.

La Zona Critica è dunque un sistema estremamente dinamico in cui geosfera e biosfera interagiscono strettamente, in cui geodiversità e biodiversità si completano l’un l’altra (Beierkuhnlein *et al.*, 2025). Sulle terre emerse,

possiamo studiare la Zona Critica ovunque, dalle aree agricole alle zone umide, nei deserti o sulle montagne più alte. Naturalmente, lo spessore di questo strato varia con il luogo, la latitudine, l'altitudine. È spesso pochi decimetri ad alta quota o in Artico, ma può raggiungere centinaia di metri nelle zone tropicali, su suoli molto sviluppati.

2. AVVENTURE ALL'INTERFACCIA

A partire dal 2017, nell'ambito di diversi progetti nazionali ed europei, il personale dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR ha installato diversi osservatori di Zona Critica in aree remote, per studiare i processi che caratterizzano l'interazione fra geosfera e biosfera in condizioni naturali e, spesso, estreme. A oggi, l'Istituto gestisce un osservatorio all'altopiano del Nivolet nel Parco Nazionale Gran Paradiso (PNGP), un osservatorio nei pressi di Ny Alesund sull'isola di Spitsbergen (Svalbard), un altro nell'area di Piano Bello nel Parco dell'Etna e un osservatorio di zona critica e di idrogeologia sull'isola di Pianosa nel Parco Nazionale Arcipelago Toscano (PNAT). Un altro osservatorio è in via di costruzione a Cimalegna, nel massiccio del Monte Rosa, sopra Alagna Valsesia, in collaborazione con l'Università di Torino, il Geoparco Sesia Val Grande e Monterosa 2000 S.p.A., e nuove misure sono in corso nella Riserva Naturale Bosco della Mesola nel Parco del Delta del Po, alla torbiera di Fociomboli nel Parco naturale regionale delle Alpi Apuane e nelle praterie di Pian Cavallaro a Monte Cimone.

In questi osservatori si misurano molti aspetti della Zona Critica, come le proprietà chimiche e fisiche dell'acqua, sia superficiale sia sotterranea, le caratteristiche del suolo o del sedimento, la distribuzione e diversità della vegetazione, spesso in stretta collaborazione con il personale dei parchi o con i Carabinieri forestali. Specialmente nelle aree montane, buona parte della ricerca è dedicata all'analisi degli scambi di anidride carbonica (e metano per le zone umide) e di vapor d'acqua fra il suolo, la vegetazione e l'atmosfera. A tal fine, sono state installate tre torri di Eddy Covariance, al Nivolet, a Ny Alesund e all'Etna, che stimano i flussi verticali di gas e vapore utilizzando la turbolenza atmosferica, e una quarta torre è in via di installazione a Pianosa. La Fig. 1 mostra, come esempio, la torre al Nivolet (Vivaldo *et al.*, 2023).



Fig. 1 – La torre di Eddy Covariance a circa 2700 metri di altitudine nelle praterie d’alta quota del Nivolet, nel Parco Nazionale Gran Paradiso. Questo strumento misura gli scambi di anidride carbonica e vapor d’acqua fra suolo, vegetazione e atmosfera ed è una stazione associata (sigla IT-Niv) della rete europea ICOS ERIC. Foto dell’autore.

Oltre a queste torri, sono state installate camere a flusso automatiche, che misurano con una tecnica diversa gli stessi flussi di gas e forniscono un’informazione complementare, e sono condotte regolarmente campagne di misure estive con camere a flusso portatili (Parisi *et al.*, 2024).

Ma perché è importante misurare questi flussi? Per quanto riguarda l’anidride carbonica, si tratta di capire il bilancio fra assorbimento di CO₂, determinato dalla fotosintesi, e l’emissione generata dalla respirazione delle piante e dai processi microbici nel suolo. Ovvero, definiamo lo scambio ecosistemico netto (NEE, *Net Ecosystem Exchange*) come la somma della produzione primaria (GPP, *Gross Primary Production*, qui definita negativa perché è un flusso che va dall’atmosfera al suolo) e della respirazione dell’ecosistema (ER, *Ecosystem Respiration*, definita positiva e che comprende sia la respirazione delle piante sia i processi microbici nel suolo): $NEE = GPP + ER$. Questo bilancio ci dice se e quanta CO₂ può essere assorbita dall’ecosistema e immagazzinata nella Zona Critica ($NEE < 0$), un’informazione

rilevante per capire come gli ecosistemi possano contribuire a ridurre la concentrazione atmosferica di anidride carbonica. Se invece $NEE > 0$, allora il sistema diventa un'ulteriore sorgente di anidride carbonica verso l'atmosfera.

Negli ultimi decenni, in media, gli ecosistemi terrestri hanno assorbito circa il 30% dell'anidride carbonica emessa dalle attività antropiche, rallentando la crescita delle temperature rispetto a quanto sarebbe successo senza questa azione calmierante della vegetazione. Questa capacità di assorbimento dipende dal bilancio fra fotosintesi (assorbimento) e respirazione (emissione), che a loro volta dipendono dalle condizioni climatiche (temperatura, precipitazione, irradiazione solare), dai nutrienti e dalla fisiologia della vegetazione presente in una data area. Ecco, quindi, che risulta importante capire come i flussi di carbonio dipendano dalle condizioni ambientali, per poter estrapolare l'informazione alle condizioni climatiche del prossimo futuro e stimare gli effetti delle possibili strategie di gestione della Zona Critica. Si vuole, cioè, massimizzare la capacità di assorbimento della CO_2 senza danneggiare la buona salute e l'integrità dell'ecosistema.

Nel caso delle praterie alpine al Nivolet o della tundra artica di Ny Ålesund, i dati hanno mostrato che gli scambi di anidride carbonica sono regolati essenzialmente dall'irradiazione solare (per la GPP) e dalla temperatura del suolo (per ER), modulati però dall'umidità del suolo, dallo stato fenologico della vegetazione e dalle caratteristiche del suolo. L'analisi statistica dei legami fra flussi e variabili di controllo ha permesso di sviluppare un modello empirico, correlativo, che esplicita la dipendenza dalle variabili ambientali e rappresenta molto bene la variabilità dei dati, come illustrato nella Fig. 2 che confronta i dati misurati con i valori ottenuti dal modello (Magnani *et al.*, 2020). Risulta quindi possibile utilizzare questo approccio semplificato per stimare la risposta della Zona Critica alle modifiche delle variabili ambientali e al cambiamento climatico. In particolare, l'analisi dei dati ottenuti in un'area sperimentale del Gran Paradiso, nel vallone di Levionaz in Valsavarenche, ha mostrato come la produzione primaria (GPP) diventi estremamente sensibile all'umidità del suolo solo quando questa scende sotto una soglia critica minima, confermando la validità della decisione del Parco Nazionale Gran Paradiso di attivare forme di irrigazione naturale nel caso di siccità prolungate come quella del 2022 (Goiran *et al.*, 2025).

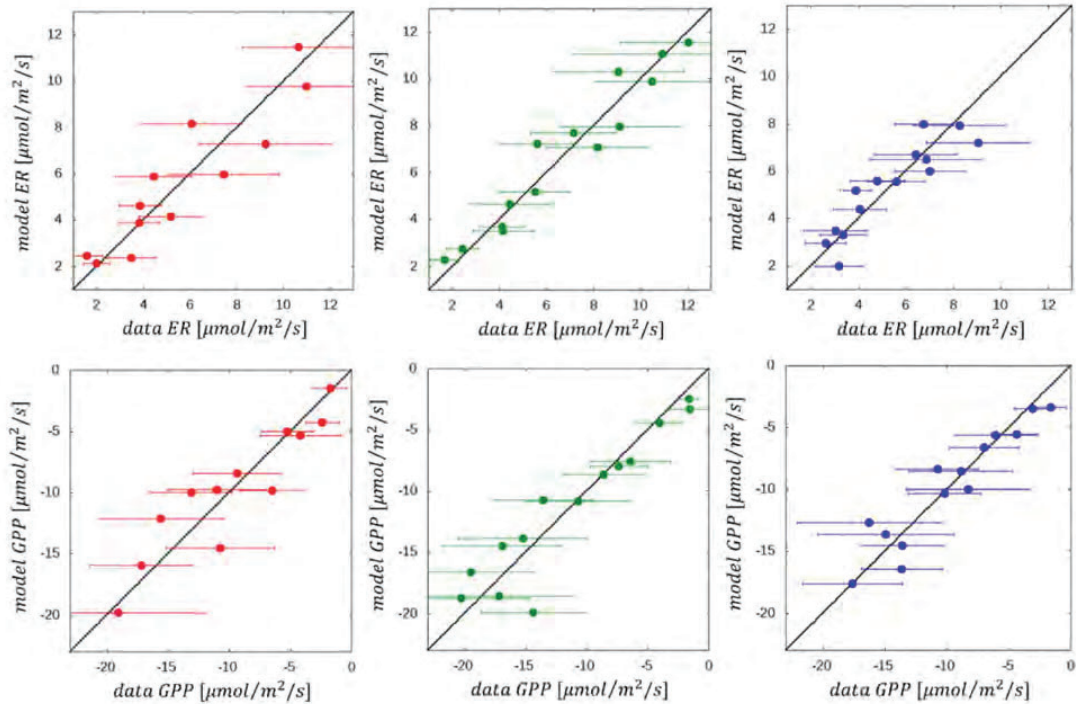


Fig. 2 – Confronto fra le misure dei flussi di anidride carbonica ottenute con le camere portatili (sulle ascisse) e i risultati del modello empirico (sulle ordinate) per la respirazione dell'ecosistema (ER, pannelli in alto) e la produzione primaria (GPP, pannelli in basso) in micromoli di CO_2 per metro quadro per secondo, in tre siti di studio all'altopiano del Nivolet nel Parco Nazionale Gran Paradiso, indicati dai tre colori rosso, verde e blu. Immagine tratta da Magnani *et al.*, 2020.

In generale, misurando come i flussi dipendano da queste variabili, abbiamo verificato che le differenze nei parametri del modello empirico nelle diverse aree di prateria analizzate sono meno intense rispetto alle fluttuazioni interannuali di questi stessi parametri (Lenzi *et al.*, 2023). Questo vuol dire sia che possiamo probabilmente estrapolare lo stesso tipo di modello empirico ad aree montane diverse, sia che è comunque necessario un monitoraggio di lungo periodo per cogliere correttamente la variabilità nella risposta della Zona Critica fra un anno e l'altro.

Un secondo aspetto affrontato è stato, poi, lo studio dei processi di evapotraspirazione, di nuovo misurati mediante l'uso delle torri di Eddy Covariance e delle camere a flusso, sia automatiche (fisse) sia portatili. La stima dell'evapotraspirazione (somma dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione dalla vegetazione) è un tassello cruciale per definire correttamente il

bilancio idrico del suolo. Se assumiamo che il suolo sia insaturo e trascuriamo per semplicità i movimenti orizzontali d'acqua nel suolo, il bilancio idrico locale è determinato dalla differenza fra gli apporti di acqua (dovuti all'infiltrazione della precipitazione, dell'acqua corrente superficiale e della fusione della neve) e le perdite, legate all'evapotraspirazione e all'infiltrazione dell'acqua verso gli strati più profondi. Se chiamiamo I la somma degli apporti legati all'infiltrazione ed E le perdite per evapotraspirazione, la differenza $I-E$ fornisce una stima dell'acqua che scende in profondità e può ricaricare le falde acquifere (Brussolo *et al.*, 2022). Anche in questo caso, l'analisi statistica dei dati raccolti al PNGP ha permesso di identificare le variabili di controllo principali dei flussi di evapotraspirazione e sviluppare un modello empirico semplificato del bilancio idrico nella parte superficiale della Zona Critica alpina.

3. PROSPETTIVE

Qualche anno fa, il filosofo Bruno Latour ha scritto che «lo studio della Zona Critica è la scienza dell'Antropocene» (Latour e Weibel, 2020). Il motivo è che questo strato sostiene tutti gli ecosistemi delle terre emerse, ed è alla base della produttività agricola. La buona salute della Zona Critica significa la disponibilità di servizi ecosistemici – o meglio di servizi della Zona Critica – quali aria e acqua pulita, stabilità dei versanti, cibo, materie prime, biodiversità. Mentre il degrado della Zona Critica implica l'annullamento di molti di questi benefici, inclusa la perdita di suolo fertile e il possibile collasso di alcuni ecosistemi.

Fra i benefici di una Zona Critica in buona salute vi è senza dubbio la capacità di immagazzinare carbonio, in particolare anidride carbonica, e immagazzinarlo nel suolo e nella vegetazione. Il degrado di questo sottile strato superficiale potrebbe diminuire drasticamente la possibilità di assorbimento del carbonio, o addirittura trasformare gli ecosistemi da pozzi a sorgenti di anidride carbonica in atmosfera, aggravando la già delicata situazione legata alla crescita delle concentrazioni di gas serra e conseguentemente delle temperature. Anche per il bilancio idrologico, la Zona Critica gioca un ruolo essenziale, come cerniera fra le precipitazioni e le acque sotterranee e come regolatrice dei processi di evapotraspirazione.

Per rimanere in ambito montano, un tema particolarmente interessante riguarda il cambiamento che sta avvenendo nelle zone proglaciali, lasciate

libere dal veloce ritiro dei ghiacciai alpini (Marta *et al.*, 2023). Qui si sviluppano nuovi ecosistemi che, in processi di successione assai complessi, portano alla formazione di suolo organico e alla crescita della vegetazione. Sono, queste, aree di grande interesse scientifico, ma di non facile monitoraggio, che possono fornire informazioni importanti sui cicli biogeochimici e sugli scambi di materia ed energia che avvengono nelle aree sempre più vaste liberate dai ghiacci.

Un altro tema rilevante riguarda l'effetto delle siccità, purtroppo previste in significativo aumento nella regione mediterranea (Baronetti *et al.*, 2022), sui processi della Zona Critica e sui cicli dell'acqua e del carbonio (UNCCD, 2024). Legata alle siccità, l'intera problematica degli incendi mediterranei (Trucchia *et al.*, 2023) apre la questione dell'interazione fra suolo, vegetazione e incendi, e diversi progetti di ricerca stanno proprio affrontando questi temi.

Oltre al monitoraggio, per formulare previsioni su quanto potrà accadere alla Zona Critica e valutare gli effetti delle possibili strategie di gestione e conservazione servono modelli numerici, dai più semplici modelli empirici, basati sulle correlazioni fra le diverse variabili come descritto prima, ai modelli di *machine learning*, versione sofisticata dei modelli correlativi, ai veri e propri *digital twin*, i gemelli digitali che cercano di riprodurre fedelmente, con più o meno successo, il sistema in esame. Un modello di questo genere sarebbe di grande interesse come condizione al bordo inferiore dei modelli atmosferici e climatici, perché i flussi di energia, acqua e gas sono controllati proprio dalla sottile interfaccia della Zona Critica. In tutti questi approcci modellistici, la difficoltà sta nel combinare scale di spazio e di tempo molto diverse, dai microaggregati del suolo a un intero bacino idrologico, dai velocissimi processi fotosintetici e biochimici al lento evolversi di un paesaggio per erosione, sedimentazione, formazione del suolo. Le difficoltà stanno anche nel gran numero di componenti interagenti, fisiche, chimiche, geologiche e biologiche, nei processi interconnessi, nello stretto legame fra geodiversità e biodiversità, fra geosfera e biosfera. Tutto questo è la Zona Critica, un sistema essenziale per la nostra vita e una sorgente inesauribile di meraviglia e di informazioni scientifiche fondamentali sul funzionamento del nostro pianeta.

BIBLIOGRAFIA

- Baronetti A. *et al.* (2022). *Future droughts in northern Italy: high-resolution projections using EURO-CORDEX and MED-CORDEX ensembles*. In: «Climatic Change», 172: 22.
- Beierkuhnlein C. *et al.* (2025). *Towards a comprehensive geodiversity-biodiversity nexus in terrestrial ecosystems*. In: «Earth-Sciences Review», 264: 105075.
- Brussolo E. *et al.* (2022). *Aquifer recharge in the Piedmont Alpine zone: historical trends and future scenarios*. In: «Hydrology and Earth System Sciences», 26: 407-427.
- Goiran S. *et al.* (2025). *Drought stress on CO₂ fluxes in mountain grasslands: the Levionaz case study, Gran Paradiso National Park*. Articolo in preparazione.
- Latour B. and Weibel P. (2020). *Critical Zones. The science and politics of landing on Earth*. Cambridge: MIT Press.
- Lenzi S. *et al.* (2023). *Spatial and temporal variability of carbon dioxide fluxes in the Alpine Critical Zone: the case of the Nivolet Plain, Gran Paradiso National Park, Italy*. In: «PLoS ONE», 18: e0286268.
- Magnani M. *et al.* (2020). *Drivers of carbon fluxes in Alpine tundra: a comparison of three empirical model approaches*. In: «Science of the Total Environment», 732: 139139.
- Marta S. *et al.* (2023). *Heterogeneous changes of soil microclimate in high mountains and glacier forelands*. In : «Nature Communications», 14: 5306.
- Parisi A. *et al.* (2024). *Carbon dioxide fluxes in Alpine grasslands at the Nivolet Plain, Gran Paradiso National Park, Italy 2017-2023*, In: «Scientific Data», 11: 652.
- Trucchia A. *et al.*, *Wildfire hazard mapping in the eastern Mediterranean landscape*. In: «Int. J. Wildland Fires». Doi:10.1071/WF22138.
- UNCCD (2024). *World Drought Atlas*. Testo disponibile all'url: <https://www.unccd.int/resources/publications/world-drought-atlas> [consultato il 18 settembre 2025].
- USNRC (2001). *Basic research opportunities in the Earth sciences*. Washington D.C.: U.S. National Research Council-National Academy Press, 35-38.
- Vivaldo G. *et al.* (2023). *Carbon dioxide exchanges in an alpine tundra ecosystem (Gran Paradiso National Park, Italy): a comparison of results from different measurement and modelling approaches*. In: «Atmospheric Environment», 305: 119758.
- White T.S. and Provenziale A. (2024). *Critical zone and ecosystem dynamics*. Berlin: Springer.