

DISS. ETH NO. 29980

**The mediation of terrestrial vegetation in water-carbon coupling:
from ecophysiology to land-atmosphere interactions**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Francesco Giardina

M. sc. EPF Lausanne

born on 02.04.1993

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, *examiner*
Prof. Dr. Benjamin D. Stocker, *co-examiner*
Prof. Dr. Pierre Gentine, *co-examiner*
Prof. Dr. Dario Papale, *independent examiner*

2024

Abstract

This thesis investigates the relationship between terrestrial vegetation and water availability, exploring how this interaction influences land-atmosphere exchanges. The focus is on understanding the ecophysiological responses of plants to water stress and the broader implications for water-carbon coupling in different ecosystems. This research is particularly pertinent in the context of climate change, where alterations in water availability significantly impact climate feedback mechanisms and human livelihood.

The first study uses deep learning to analyze evapotranspiration responses to water deficit across various biomes. By training neural networks with eddy-covariance measurements, the research defines a water stress factor (fET) and explore its relationship with cumulative water deficits. This approach reveals diverse responses of ecosystems to water stress, ranging from significant declines in evapotranspiration rates in savannahs and grasslands to milder reductions in forests. This variability highlights the role of plant hydraulic resilience and access to groundwater or deep soil moisture, suggesting a complexity in plant responses that is often oversimplified in standard land surface models.

The second paper shifts the focus to the global scale, investigating the role of groundwater in modulating photosynthesis. Using remote sensing data and explainable machine learning, the study demonstrates that groundwater significantly regulate photosynthesis, both spatially and temporally, across different ecosystems. The findings emphasize that the control of groundwater on ecosystem productivity is comparable to that of aridity, highlighting its critical but previously underappreciated role in global vegetation dynamics.

The third study addresses biases in the representation of soil moisture limitation in Earth System Models. By comparing model outputs with observational datasets, the research highlights significant underestimations in soil moisture reductions in these models. These biases illuminate the need for improved soil moisture representations in Earth System Models, which is key for accurately projecting land-atmosphere interactions under changing climatic conditions.

Overall, this thesis leverages and develops novel methods to understand terrestrial vegetation dynamics under water stress, and explores the representation of these dynamics in different types of models. By integrating advanced computational methods with different data types, it offers insights into how vegetation mediates water-carbon coupling. While the primary focus is on hydroclimatology and water-vegetation interactions, the implications of this work extend to broader ecological and climatological contexts, including the carbon cycle. The findings illuminate the complex nature of plant-water interactions in the Earth system and offer potential opportunities for refining climate models and guiding ecosystem management strategies, particularly in the context of global environmental changes.

Résumé

Cette thèse étudie la relation entre la végétation terrestre et la disponibilité en eau, en explorant comment cette interaction influence les échanges terre-atmosphère. L'objectif est de comprendre les réponses écophysiologiques des plantes face au stress hydrique et les implications plus larges pour le couplage eau-carbone dans différents écosystèmes. Cette recherche est particulièrement pertinente dans le contexte du changement climatique, où les modifications de la disponibilité en eau impactent significativement les mécanismes de feedback climatique.

La première étude utilise l'apprentissage profond (deep learning) pour analyser les réponses d'évapotranspiration au déficit en eau à travers divers biomes. En entraînant des réseaux de neurones avec des mesures de flux, cette recherche définit un facteur de stress hydrique (fET) et sa relation avec les déficits cumulatifs en eau. Cette approche révèle des réponses diverses des écosystèmes au stress hydrique, allant de baisses significatives du taux d'évapotranspiration dans les savanes et les prairies à des réductions plus modérées dans les forêts. Cette variabilité met en évidence le rôle de facteurs tels que la résilience hydraulique des plantes et l'accès à l'eau souterraine ou à l'humidité du sol profond, suggérant une complexité dans les réponses des plantes souvent simplifiée dans les modèles standards de surface terrestre.

Le deuxième article se concentre à l'échelle mondiale, en explorant le rôle de l'eau souterraine dans la modulation de la photosynthèse. En utilisant des données de télédétection et de l'apprentissage machine explicable (explainable machine learning), l'étude démontre que l'eau souterraine régule de manière significative la photosynthèse, à la fois spatialement et temporellement, dans différents écosystèmes. Les résultats soulignent que le contrôle de l'eau souterraine sur la productivité des écosystèmes est comparable à celui de l'aridité, mettant en évidence son rôle critique mais précédemment sous-estimé dans la dynamique de la végétation mondiale.

La troisième étude aborde les biais dans la représentation de la limitation de l'humidité du sol dans les Modèles du Système Terrestre. En comparant les résultats des modèles avec des ensembles de données observationnelles, la recherche met en évidence des sous-estimations significatives dans les réductions de l'humidité du sol au sein de ces modèles. Ces biais soulignent la nécessité d'améliorer les représentations de l'humidité du sol dans les Modèles du Système Terrestre, ce qui est vital pour projeter avec précision les interactions terre-atmosphère dans des conditions climatiques changeantes.

Dans l'ensemble, cette thèse utilise et développe des nouvelles méthodes pour comprendre la dynamique de la végétation terrestre sous stress hydrique, et explore la représentation de ces dynamiques dans différents types de modèles. En intégrant des méthodes informatiques avancées avec différents types de données, elle offre des aperçus sur la

manière dont la végétation médie le couplage eau-carbone. Bien que l'accent principal soit mis sur l'hydroclimatologie et les interactions eau-végétation, les implications de ce travail s'étendent à des contextes écologiques et climatologiques plus larges, y compris le cycle du carbone. Les résultats soulignent la nature complexe et variable des interactions plante-eau dans le système terrestre et offrent des perspectives potentielles pour affiner les modèles climatiques et guider les stratégies de gestion des écosystèmes, en particulier dans le contexte des changements environnementaux mondiaux.

Riassunto

Questa tesi si concentra sullo studio delle relazioni tra la vegetazione terrestre e la disponibilità idrica, esplorando come questa interazione possa influenzare i feedback tra gli ecosistemi terrestri e l'atmosfera. L'obiettivo è comprendere le risposte ecofisiologiche delle piante allo stress idrico e le relative conseguenze per la relazione tra il ciclo dell'acqua e del carbonio in diversi ecosistemi. Questa ricerca è particolarmente pertinente nel contesto dei cambiamenti climatici, dove le variazioni nella disponibilità idrica influenzano significativamente i meccanismi di risposta degli ecosistemi verso sistema climatico.

Il primo studio utilizza tecniche di *deep learning* per analizzare le risposte dell'evapotraspirazione (ET) al deficit idrico in vari biomi. Attraverso la calibrazione di reti neurali con dati relativi ai flussi di ET, questa ricerca definisce un fattore di stress idrico (fET) e la sua relazione con deficit idrici prolungati nel tempo. Questo approccio rivela diverse risposte degli ecosistemi allo stress idrico, che vanno da significative riduzioni nei tassi di evapotraspirazione nelle savane e nelle praterie, a riduzioni più lievi nelle foreste. Questa variabilità evidenzia il ruolo di importanti fattori come la resilienza idraulica delle piante e l'accesso all'acqua di falda o alle riserve idriche situate negli strati più profondi del suolo. Tali risultati suggeriscono una complessità nelle risposte delle piante spesso semplificata nei modelli tradizionali.

Il secondo articolo sposta l'attenzione alla scala globale, studiando il ruolo dell'acqua di falda nella modulazione della fotosintesi. Utilizzando dati di telerilevamento e tecniche di *explainable machine learning*, lo studio dimostra che l'acqua di falda regola significativamente la fotosintesi, sia spazialmente che temporalmente, in diversi ecosistemi. I risultati enfatizzano che l'influenza dell'acqua di falda sulla produttività degli ecosistemi è paragonabile a quella dell'aridità, ovvero sottolineano il suo ruolo cruciale ma precedentemente sottovalutato nelle dinamiche globali della vegetazione.

Il terzo studio affronta l'incertezza sistematica nella rappresentazione dell'umidità del suolo come fattore limitante nei Modelli del Sistema Terrestre (Earth System Models). Confrontando i risultati dei modelli con set di dati osservazionali, la ricerca evidenzia sottostime significative per quel che riguarda la riduzione dell'umidità del suolo all'interno di questi modelli. Questi errori evidenziano la necessità di migliorare la rappresentazione dell'umidità del suolo nei Modelli del Sistema Terrestre, fondamentale per proiettare con maggior precisione le interazioni tra la superficie terrestre e l'atmosfera in condizioni climatiche in evoluzione.

Nel complesso, questa tesi sfrutta e sviluppa metodi innovativi per comprendere il comportamento della vegetazione terrestre sotto stress idrico e la rappresentazione di queste dinamiche in diversi tipi di modelli. Integrando metodi computazionali avanzati con diversi tipi di dati, offre una maggior comprensione di come la vegetazione sia un fattore

di regolazione della relazione tra il ciclo dell'acqua e del carbonio. Sebbene l'attenzione principale sia sull'idroclimatologia e le interazioni tra vegetazione e disponibilità idrica, le implicazioni di questo lavoro si estendono a contesti ecologici e climatologici più ampi, inclusi il ciclo del carbonio. I risultati evidenziano la natura complessa e variabile delle interazioni tra vegetazione e disponibilità idrica nel sistema terrestre e suggeriscono potenziali direzioni per affinare i modelli climatici e guidare le strategie di gestione degli ecosistemi, in particolare nel contesto dei cambiamenti ambientali globali.