



Doctoral Thesis

## **Modeling terrestrial carbon and water dynamics A critical appraisal and ways forward**

**Author(s):**

Pappas, Christoforos

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010384188> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22152

MODELING TERRESTRIAL CARBON AND WATER  
DYNAMICS: A CRITICAL APPRAISAL AND WAYS  
FORWARD

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

presented by

CHRISTOFOROS PAPPAS

DIPL. CIVIL ENG. NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

born 30 January 1988

citizen of GREECE

accepted on the recommendation of

PROF. DR. PAOLO BURLANDO, EXAMINER

PROF. DR. VALERIY IVANOV, CO-EXAMINER

DR. SIMONE FATICHI, CO-EXAMINER

2014

## ABSTRACT

---

Terrestrial carbon and water balances and their variability under changing climatic conditions and anthropogenic disturbances are topics of great societal and scientific importance. The role of vegetation in shaping carbon and water dynamics is of paramount significance. Many numerical models, reflecting different degrees of complexity and abstraction, have therefore been developed to mimic plant function. The aim of this thesis is to (i) shed light on how vegetation functioning is simulated in state-of-the-art terrestrial ecosystem models, (ii) provide a critical appraisal of model strengths and weaknesses, and (iii) present ways forward to remove some of the identified model limitations.

The first part of the thesis provides a thorough evaluation of a state-of-the-art, process-based, dynamic vegetation model, LPJ-GUESS, by means of a global sensitivity analysis. The rationale is that since process-based models embed physical causalities, the sensitivity of the simulated processes should also reflect measurable and observed sensitivities. Having scrutinized the structural and parameterization issues underlying LPJ-GUESS, reflecting also that of other, structurally similar dynamic vegetation models, the subsequent parts of the thesis are devoted to two major model limitations, namely (1) the lack of spatial representation and simplified soil water hydrology, and (2) the lack of ecological realism due to simplified representation of plant trait variability.

The former limitation is analyzed with a novel ecohydrological scheme, D-LPJ, which is based on an iterative coupling between a spatially explicit, process-based hydrological model (TOPKAPI-ETH) and a well-established dynamic vegetation model (LPJ). The advantages of D-LPJ over the original, aspatial approaches of LPJ and LPJ-GUESS are illustrated for a topographically-complex area located in the central Switzerland. The aggregation-induced biases due to smoothing of spatial heterogeneities through coarse-grained aspatial representations are also explicitly quantified.

The second limitation is investigated with an innovative Monte Carlo approach that is applied to simulate the diversity of plant traits. This approach revises the broad vegetation categories, based on a discrete and static parameterization (named Plant Functional Types), often incorporated in terrestrial ecosystem models. Proxy plant species are generated using observed multivariate distributions of coordinated plant traits. Their performance is assessed with a mechanistic ecohydrological model (T&C) across continuous, naturally occurring, meteorological gradients in the European Alps. The significant importance of trait-induced variability in simulating water and carbon dynamics is quantified and

an alternative, probabilistic approach is presented, enhancing the ecological realism within models.

The last part of the thesis provides a synthesis of the aforementioned findings together with a critique of commonly applied approaches for modeling terrestrial carbon and water dynamics. Directions for future model improvements are highlighted, combining deterministic with probabilistic concepts, aiming towards a predictive framework of terrestrial ecosystem functioning.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Terrestrische Kohlenstoff- und Wasserkreisläufe und ihre Variabilität unter sich ändernden Klimaverhältnissen und unter anthropogener Einwirkung sind von grosser sozialer als auch wissenschaftlicher Bedeutung. Die Vegetation spielt in diesen Kreisläufen eine entscheidende Rolle. Viele numerische Modelle mit unterschiedlicher Abstraktion und Komplexität wurden bis heute entwickelt um Vegetationsfunktionen abzubilden. Die Ziele dieser Arbeit sind, (i) zu untersuchen, wie Vegetationsfunktionen in modernen Modellen terrestrischer Ökosysteme abgebildet sind, (ii) die Schwächen und Stärken der Modelle kritisch zu beleuchten, und (iii) Ansätze zu präsentieren, um Limitationen der Modellanwendung zu lösen.

Der erste Teil dieser Dissertation präsentiert eine gründliche Evaluation des modernen, prozessbasierten dynamischen Vegetationsmodells LPJ-GUESS durch eine globale Sensitivitätsanalyse. Diese Methode wurde gewählt in der Annahme, dass in Methoden welche physikalische Kausalitäten abbilden, die Sensitivitäten der Prozesse denen in der gemessenen und observierten Welt entsprechen sollten. Nach eingehender Prüfung der Struktur und Parameter von LPJ-GUESS, welche auch Schlüsse zu strukturell ähnlichen Modellen erlaubt, werden die weiteren Teile dieser Arbeit zwei Limitationen behandeln: (1) jene bedingt durch grobe räumliche Auflösung und die Vereinfachungen der Bodenwasserhydrologie, und (2) die Limitationen durch den Mangel an Realismus in den simplifizierten Ansätzen zur Abbildung der Variabilität von pflanzlichen Eigenschaften.

Die erste Limitation wird mit Hilfe eines neuen öko-hydrologischen Modells D-LPJ analysiert. Dieses ist eine iterative Koppelung des räumlich expliziten, prozessbasierten hydrologischen Modells TOPKAPI-ETH und des etablierten dynamischen Vegetationsmodells LPJ. Die Vorteile von D-LPJ gegenüber den nicht räumlich expliziten Ansätzen von LPJ und LPJ-GUESS werden anhand eines topografisch sehr heterogenen Einzugsgebietes in der Zentralschweiz demonstriert. Die Abweichungen, welche aus der Homogenisierung der räumlichen Variabilität entstehen, werden quantifiziert.

Die zweite Limitation wird mit einem innovativen Ansatz der Monte-Carlo Methode untersucht, welcher die Pflanzendiversität simuliert. Dieser ermöglicht die Revision der groben Vegetationskategorien, welche durch diskrete und statische Parameter definiert sind und häufig Anwendung in terrestrischen Ökosystemmodellen finden. Mit Hilfe von observierten multivariaten Verteilungen von pflanzlichen Eigenschaften werden Proxy-Pflanzentypen generiert. Das Verhalten dieser Pflanzentypen entlang von kontinuierlichen, meteorologischen

Gradienten typisch für die Europäischen Alpen wird mit dem mechanischen öko-hydrologischen Modell T&C untersucht. Die Signifikanz von pflanzlichen Eigenschaften für die Simulation von Wasser- und Kohlenstoffdynamiken wird quantifiziert. Ein alternativer probabilistischer Ansatz wird präsentiert, welcher den ökologischen Realismus in Modellen verbessert.

Abschliessend werden die Resultate gebündelt und die etablierten Ansätze für Kohlenstoff- und Wasserdynamiken in terrestrischen Modellen kritisch diskutiert. Mögliche Modellverbesserungen werden aufgezeigt, welche deterministische und probabilistische Konzepte vereinen, um ein verbessertes Vorhersagesystem für die Funktionalität von terrestrischen Ökosystemen zu erreichen.

Στα χερσαία οικοσυστήματα, το ισοζύγιο του νερού και του άνθρακα, καθώς επίσης και η διακύμανσή τους λόγω μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών και ανθρωπογενών επεμβάσεων, κεντρίζουν ιδιαίτερο επιστημονικό και κοινωνικό ενδιαφέρον. Η συνεισφορά της βλάστησης στη διαμόρφωση του ισοζυγίου του άνθρακα και του νερού είναι ουσιαστική. Πληθώρα υπολογιστικών μοντέλων έχουν προταθεί με στόχο την προσομοίωση των βασικών της λειτουργιών. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι: (i) να διερευνήσει πως οι βασικές λειτουργίες της βλάστησης προσομοιώνονται στα σύγχρονα μοντέλα χερσαίων οικοσυστημάτων, (ii) να παρέχει μια κριτική ανασκόπηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθόδων προσομοίωσης της δυναμικής της βλάστησης, και (iii) να παρουσιάσει καινοτόμες αριθμητικές μεθόδους μοντελοποίησης οικοσυστημάτων, βελτιώνοντας έτσι μερικά από τα υπάρχοντα μειονεκτήματα.

Το πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζει μια λεπτομερή αξιολόγηση ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου μηχανιστικού μοντέλου δυναμικής της βλάστησης (LPJ-GUESS), διεξάγοντας μια καθολική ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στη διακύμανση των διαφόρων παραμέτρων του. Η λογική αυτής της αξιολόγησης μπορεί να συνοψισθεί ως εξής: καθώς τα μηχανιστικά μοντέλα εμπεριέχουν αιτιατές σχέσεις βασιζόμενες σε φυσικούς νόμους, η ευαισθησία των διεργασιών που προσομοιώνονται πρέπει να αντικατοπτρίζει την ευαισθησία της βλάστησης όπως αυτή παρατηρείται στο φυσικό περιβάλλον. Έχοντας λοιπόν διερευνήσει τα ασθενή σημεία του LPJ-GUESS (που αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα από μια πληθώρα μηχανιστικών μοντέλων δυναμικής της βλάστησης), που σχετίζονται με τη δομή του μοντέλου (δηλ. σχέσεις αιτίου-αιτιατού) αλλά και με την παραμετροποίηση της βλάστησης, τα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας διερευνούν και βελτιώνουν τα εξής μειονεκτήματα: (1) έλλειψη λεπτομερούς χωρικής διακριτοποίησης και απλοποιημένη προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών, και (2) έλλειψη ρεαλιστικής προσομοίωσης της ετερογένειας της βλάστησης και των λειτουργικών χαρακτηριστικών των φυτών.

Προκειμένου να αναλυθεί το πρώτο μειονέκτημα, αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της εργασίας, ένα καινούριο οικο-υδρολογικό μοντέλο (D-LPJ). Το D-LPJ βασίζεται στο συνδυασμό ενός χωρικά διακριτού υδρολογικού μοντέλου (TOPKAPI-ETH) με ένα ευρέως διαδεδομένο μηχανιστικό μοντέλο δυναμικής της βλάστησης (LPJ), μέσω μίας συγκλίνουσας επαναληπτικής διαδικασίας. Τα πλεονεκτήματα του D-LPJ έναντι των χωρικά μη διακριτοποιημένων LPJ και LPJ-GUESS εξετάζονται σε μια λεκάνη απορροής της κεντρικής Ελβετίας με πλούσιο τοπογραφικό ανάγλυφο. Επιπρόσθετα, εξετάζονται και ποσοτικοποιούνται σφάλματα που προκύπτουν στις εκτιμήσεις του ισοζυγίου του άνθρακα και του νερού με μοντέλα χωρίς χωρική διακριτοποίηση.

Το δεύτερο μειονέκτημα διερευνάται εφαρμόζοντας μια πρωτοπόρα μεθοδολογία **Monte-Carlo** για την προσομοίωση της ετερογένειας της βλάστησης και των λειτουργικών της χαρακτηριστικών. Αυτή η μεθοδολογία αναθεωρεί τις μέχρι τώρα παγιωμένες πρακτικές μοντελοποίησης της βλάστησης που βασίζονται σε μια διακριτή και χρονικά αμετάβλητη παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών της (λειτουργικοί τύποι φυτών, PFTs). Υποκατάστατα είδη βλάστησης προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας εμπειρικές πολυμεταβλητές κατανομές των αλληλεξαρτώμενων λειτουργικών της χαρακτηριστικών. Η συμπεριφορά τους εξετάζεται σε διάφορες κλιματικές συνθήκες, αντιπροσωπευτικές εκείνων που επικρατούν στις κεντρικές Άλπεις, χρησιμοποιώντας ένα μηχανιστικό οικο-υδρολογικό μοντέλο (T&C). Με αυτόν τον τρόπο ποσοτικοποιείται ο καθοριστικός ρόλος των λειτουργικών χαρακτηριστικών της βλάστησης και της ετερογένειάς τους για την προσομοίωση των ισοζυγίων του άνθρακα και του νερού. Επίσης, παρουσιάζονται εναλλακτικές, πιθανοτικές μέθοδοι, βελτιώνοντας έτσι τη μοντελοποίηση της ετερογένειας της βλάστησης και του δυναμικού της (χωρικά και χρονικά) χαρακτηριστήρα.

Το τελευταίο μέρος της εργασίας αποτελεί μια σύνθεση των προηγούμενων κεφαλαίων και μια κριτική ανασκόπηση των ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθοδολογιών για την αριθμητική μοντελοποίηση του κύκλου του άνθρακα και του νερού στα χερσαία οικοσυστήματα. Παρουσιάζονται επίσης κατευθυντήριες γραμμές για περεταίρω βελτιώσεις των αριθμητικών μοντέλων δυναμικής της βλάστησης, συνδυάζοντας ντετερμινιστικές με πιθανοτικές προσεγγίσεις, στοχεύοντας έτσι σε ένα καλύτερο μεθοδολογικό πλαίσιο εκτίμησης της δυναμικής των χερσαίων οικοσυστημάτων.