



Doctoral Thesis

Modelling long-term phosphorus dynamics in Swiss agricultural soils using EPIC

Author(s):

Della Peruta, Raniero

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010106094> →

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. 21490

Modelling long-term phosphorus dynamics in Swiss agricultural soils using EPIC

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

Presented by

Raniero Della Peruta

Laurea in Scienze Ambientali, Università degli Studi di Milano Bicocca
Born on 5 September 1974
Citizen of Italy

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner
Prof. Dr. Emmanuel Frossard, co-examiner
Dr. Armin Keller, co-examiner

2013

Summary

Proper management of soil phosphorus (P) in agriculture is essential to ensure sustainability in crop production and environmental quality. Phosphorus is one of the macronutrients that crops require in large amounts in order to grow. Agricultural soils gain P mainly through the application of mineral and organic fertilizers. When P inputs exceed plant uptake, the surplus leads to P buildup in soil, which increases the risk of export by runoff, erosion and leaching and creates environmental problems through the contamination and eutrophication of water bodies. In Switzerland, this problem is particularly evident in regions of intensive animal farming, where great amounts of manure are applied to soils. Moreover, it must be considered that P is a limited resource. Mineral P fertilizers are produced from phosphate rocks, and a large fraction of their known reserves has already been consumed in the past few decades. Thus, wastage of P fertilizers should be avoided.

In order to support an efficient, sustainable and risk-minimizing P management of agricultural soils, a methodology to predict long-term impacts of management on the dynamics of soil P pools and associated P fluxes from soils into waters is required, that takes account of site characteristics. Numerical simulation models are useful tools for achieving this objective. The model EPIC is particularly well suited to assess the above mentioned impacts and thereby to help optimize soil P management. However, its calibration and validation is often limited by the availability of adequate real-world data sets.

In this study we tested the capability of EPIC to predict temporal soil P changes on typical Swiss arable and grassland sites, using unique and comprehensive data sets of the Swiss Soil Monitoring Network NABO, representing all major cropping systems, soil and climate conditions of Swiss agro-ecosystems, including a continuous record of farm and field management relating to the monitoring sites. As a first step, archived topsoil samples from five surveys (1985 – 2009) were analyzed for P concentrations. This data revealed substantial temporal changes. Considerable differences were found between the measured concentrations and predictions based on simple P surface balances, calculated by subtracting the P outputs via harvesting from the inputs via fertilization. This indicates that not all P fluxes were adequately covered in the balances and confirmed the need of a bio-physical model to account for soil processes such as runoff, percolation, sorption, erosion or bioturbation.

After performing a sensitivity analysis to identify the most influential model parameters requiring calibration, we used Generalized Likelihood Uncertainty

Estimation (GLUE) to calibrate these parameters based on time series (1985-2009) of topsoil P measurements for 4 selected monitoring sites. Then we tested the calibrated model by comparison of predictions with data from a second set of 14 sites. The Willmott index of agreement ranged between 0.62 and 0.86 and the percent bias was below 2% for the calibration set, indicating a fairly good performance, although the Nash-Sutcliffe Efficiency was negative for two of the sites. Predictions were in reasonable agreement with measured data for some of the validation sites, but not satisfactory for the others. In order to identify the reasons of this poor performance, we applied the GLUE method separately to each individual site, and found that the model performance improved significantly when site-specific estimates of bioturbation depth were used.

In order to further investigate the influence of bioturbation on soil P dynamics, we compared EPIC predictions for nine grassland monitoring sites to retrospective predictions based on surface balances of agricultural P inputs and outputs. Soil mixing due to bioturbation could indeed explain a large part of the discrepancies between measured P concentrations and the surface balance predictions. Bioturbation rates obtained by fitting EPIC to measured topsoil P concentrations of these sites were in good agreement with the results obtained in other studies for comparable grassland sites. The estimates of the maximum bioturbation depths resulting from the calibration showed a close relationship to independently assessed subsoil hydromorphy, although this information was not used in the model. This provides further support to the plausibility of the parameterization and the underlying conceptual model employed by EPIC to simulate bioturbation. These results suggest that soil monitoring programs aiming at the early detection of changes in chemical soil properties should not be limited to topsoil sampling, but also include analyses of subsoil samples in conjunction with process-based modeling of transport and turnover processes.

Another important result of the sensitivity analysis performed in this study was the indication that correct estimates of the initial concentration of soil labile P and of the P sorption parameter (PSP) are crucial for the quality of EPIC simulations. If not specified by the user, labile P and PSP are determined in EPIC from other soil properties through in-built pedotransfer functions (PTF) originally developed for North American conditions. Based on sorption and desorption experiments with soil samples from Swiss agricultural sites, a new PTF for PSP was derived for moderately weathered soils. In combination with site-specific initialization of labile and stable mineral soil P pool sizes, this new PTF increased the accuracy of EPIC predictions of long-term soil P dynamics in a Swiss benchmark pasture site as compared to predictions based on the default equations of EPIC.

This study shows how monitoring, experimentation and modelling can be combined to identify relevant processes and predict temporal trends of P concentrations in agricultural soils. Validating EPIC for other elements (carbon, nitrogen and phosphorus), soil types and management systems remains a task for the future.

Riassunto

Un'adeguata gestione del fosforo (P) nei suoli agricoli è essenziale per assicurare una produzione sostenibile e preservare la qualità dell'ambiente. Il fosforo è uno dei macronutrienti che le colture necessitano in elevate quantità per crescere. La dotazione in P dei suoli agricoli viene incrementata mediante l'applicazione di fertilizzanti minerali e organici. Laddove le aggiunte di P eccedono l'assorbimento da parte delle piante, l'eccesso porta all'accumulo di P nel suolo. Questo aumenta il rischio di trasporto via ruscellamento superficiale, erosione e lisciviazione e crea problemi ambientali attraverso la contaminazione e all'eutrofizzazione di ecosistemi acquatici. In Svizzera questo problema è particolarmente evidente in regioni caratterizzate da allevamento animale intensivo, dove i suoli ricevono grandi quantità di reflui zootecnici. Inoltre bisogna considerare che il fosforo è una risorsa limitata. I fertilizzanti fosfatici minerali sono ottenuti da depositi rocciosi, e una gran parte delle riserve conosciute sono già state consumate nei decenni scorsi. Lo spreco di fertilizzanti fosfatici dovrebbe quindi essere evitato.

Allo scopo di supportare una gestione dei suoli agricoli che sia efficiente, sostenibile e che minimizzi i rischi ambientali, è necessaria una metodologia per predire gli impatti a lungo termine di tale gestione sulle dinamiche delle riserve di P nel suolo e sui relativi flussi di P dal suolo verso i corpi acquatici, che tenga conto delle caratteristiche del sito in esame. I modelli numerici di simulazione sono strumenti utili per raggiungere questo obiettivo. Il modello EPIC è particolarmente adatto a valutare gli impatti sopra menzionati e quindi ad aiutare l'ottimizzazione della gestione di P nei suoli. Tuttavia la sua calibrazione e validazione è spesso limitata dalla disponibilità di dati adeguati.

In questo studio abbiamo testato la capacità di EPIC di predire variazioni temporali di P nei suoli di tipici terreni arabili e prati permanenti in Svizzera, usando l'esauritiva banca dati dell'osservatorio nazionale dei suoli (NABO) che rappresenta tutti i principali sistemi colturali, suoli e condizioni climatiche degli agro-ecosistemi svizzeri, e include una documentazione continua della gestione delle aziende agricole e dei terreni che ospitano i siti di monitoraggio. Come primo passo, campioni archiviati di suolo provenienti da cinque rilevamenti (1985-2009) sono stati analizzati per misurarne la concentrazione in P. Questi dati hanno rivelato sostanziali variazioni temporali. Sono state trovate differenze considerevoli tra le concentrazioni misurate e previsioni basate su semplici bilanci di massa superficiali, calcolati sottraendo le quantità di P asportate con il raccolto dalle quantità di P immesse con la fertilizzazione. Ciò indica che non tutti i flussi

di P sono stati coperti adeguatamente dai bilanci, e conferma la necessità di un modello bio-fisico che tenga conto dei processi del suolo quali ruscellamento, percolazione, adsorbimento, desorbimento, erosione o bioturbazione.

Dopo aver eseguito un'analisi di sensitività per identificare i parametri del modello più influenti che richiedevano una calibrazione, abbiamo usato il metodo GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) per calibrare tali parametri sulla base di serie temporali (1985-2009) di misurazioni della concentrazione di P nell'orizzonte superficiale di 4 siti di monitoraggio, scelti appositamente a questo scopo.

Successivamente abbiamo testato il modello così calibrato attraverso il confronto delle sue previsioni con dati relativi a un secondo gruppo di 14 siti. L'indice di Willmott compreso tra 0.62 e 0.86 e lo scostamento percentuale inferiore al 2% indicano una prestazione abbastanza buona, nonostante l'indice di Nash-Sutcliffe fosse negativo per due siti. Le previsioni del modello erano in ragionevole accordo con i dati misurati per alcuni dei siti di validazione, ma non erano soddisfacenti per altri. Allo scopo di individuare le ragioni di tale prestazione mediocre, abbiamo applicato GLUE separatamente ad ogni sito, trovando che la prestazione del modello migliorava significativamente quando venivano usate stime della profondità di bioturbazione specifiche per ogni singolo sito.

Per studiare ulteriormente l'influenza della bioturbazione sulle dinamiche di P nel suolo, abbiamo confrontato le previsioni di EPIC per 9 siti di monitoraggio a prato permanente con previsioni retrospettive basate su bilanci superficiali. In effetti il rimescolamento del suolo dovuto alla bioturbazione può in gran parte spiegare la discrepanza tra le concentrazioni di P misurate e le previsioni basate sui bilanci. I tassi di bioturbazione ottenuti mediante la calibrazione di EPIC basata sulle concentrazioni di P nei siti studiati sono in buon accordo con risultati ottenuti in altri studi per siti simili. Le stime delle profondità massime di bioturbazione risultanti dalla calibrazione presentano una stretta correlazione a caratteri idromorfici riscontrati indipendentemente negli orizzonti profondi dei suoli indagati, nonostante tale informazione non sia stata inserita nel modello. Questo fornisce ulteriore supporto alla plausibilità della parametrizzazione e del sottostante modello concettuale usato da EPIC per simulare la bioturbazione. Questi risultati suggeriscono che i programmi di monitoraggio del suolo mirati alla rilevazione precoce di cambiamenti nelle proprietà chimiche del suolo non dovrebbero limitarsi a campionare gli orizzonti superficiali, ma dovrebbero includere analisi degli orizzonti profondi congiuntamente all'uso di modelli dei processi di trasporto.

Un'altro importante risultato dell'analisi di sensitività eseguita in questo studio è l'indicazione che stime corrette della concentrazione iniziale di P disponibile nel suolo e

del parametro di adsorbimento del fosforo (PSP) sono cruciali per la qualità delle simulazioni con EPIC. Se non specificati dall'utente, P disponibile e PSP sono determinati in EPIC da altre proprietà del suolo attraverso funzioni di pedotrasferimento (PTF) originariamente sviluppate per l'America del nord. Sulla base di esperimenti di adsorbimento e desorbimento su campioni di suoli provenienti da siti agricoli svizzeri, abbiamo derivato una nuova PTF per stimare PSP in suoli moderatamente alterati. In combinazione con inizializzazioni sito-specifiche delle riserve di fosforo minerale disponibile e stabile, questa nuova PTF ha aumentato l'accuratezza delle previsioni delle dinamiche a lungo termine di P nel suolo di in un sito di riferimento a prato permanente, in confronto a previsioni basate sulle equazioni predefinite di EPIC.

Questo studio dimostra come monitoraggio, sperimentazione e modellizzazione possono essere combinati per identificare processi rilevanti e predire le variazioni temporali della concentrazione di P nei suoli agricoli. La validazione di EPIC per altri elementi (carbonio, azoto e fosforo), tipi di suolo e sistemi di gestione rimane un compito per il futuro.