

LESNÉ HOSPODÁRSTVO V PODMIENKACH ZMENY KLÍMY: OD EMPIRICKÝCH K PROCESNÝM PRÍSTUPOM

Tomáš Hlásny • Katarína Merganičová • Zuzana Sitková • Pavel Pavlenda

Hlásny, T., Merganičová, K., Sitková, Z., Pavlenda, P.: Forest management under climate change: From empirical to process-based approaches. APOL, 2021, vol. 2, no. 1, p. 141–146.

Abstract: Global climate change brings conditions, which have not been experienced by forest management before. These conditions include modified growth and productivity patterns, increased tree mortality, and an overall shift of disturbance regimes. Contemporary forest management relies on planning tools such as yield tables, empirical forest growth models, and hazard rating models. Such tools have been developed based on extensive field data collected in the past and provided valuable support to management decisions. There are, however, indications that such tools may perform poorly in the emerging environmental conditions, and their use should be revised. The possible replacement or extension of traditional planning tools are so-called process-based models (PBM), which rely on the representation of fundamental ecological processes and feedbacks rather than statistical associations between site conditions and forest dynamics. We present here a research concept that aims to explore the suitability of PBM for informing management decisions and to compare the outputs of PBM against yield tables. We exemplify our ideas using the PBM Biome-BGCMuSo to simulate the productivity and carbon cycle of several experimental plots in Slovakia, including ICP Forests Level II plots. Finally, we formulate recommendations for future research in this field.

Key words: model Biome-BGCMuSo; ICP Forests Level II plots; forest production; carbon cycle; management planning; climate change

Úvod

Plánovanie v lesnom hospodárstve sa tradične opiera o rôzne empirické modely (napr. rastové tabuľky), ktoré umožňujú o. i. hodnotiť vývoj produkčných a ďalších ukazovateľov v závislosti od stanovištných podmienok a manažmentu. Tieto prístupy sa opierajú o štatistický opis vzťahov medzi stanovištnými podmienkami, produkčnými ukazovateľmi a hospodárskymi zásahmi. Klimatická zmena však prináša podmienky, ktoré sa líšia od podmienok, z ktorých pochádza väčšina dát, o ktoré sa súčasne plánovacie nástroje opierajú. Štandardne používané postupy preto môžu už v blízkej budúcnosti poskytovať skreslené informácie, napr. v dôsledku meniacej sa rastovej dynamiky a mortality drevín. Zmena klímy prináša tzv. neanalogické (v minulosti sa nevyskytujúce) podmienky, na ktoré súčasné empirické modely nie sú parametrizované. Patria sem napr. opakujúce sa klimatické extrémny, ktorých kumulatívny efekt vyvoláva nové úrovne klimatického stresu vegetácie, alebo obzvlášť nebezpečné „horúce suchá“ (Allen et al. 2015). Tieto vplyvy sú kombinované so zmenenou koncentráciou CO₂ v atmosfére a zmenami nutričného režimu v dôsledku zrýchlenej dekompozície. Rôzne interakcie týchto faktorov vytvárajú kvalitatívne nové prostredie, v ktorom sa vyvíjajú produkčné a ďalšie charakteristiky lesných drevín odlišne ako v minulosti.

Riešenie týchto úloh je doménou takzvaných procesných modelov, ktorých využitie bolo pri tvorbe podkladov pre manažment lesa doposiaľ okrajové. Tieto modely sa neopierajú o štatistické vzťahy odvodené z dát charakterizujúcich konkrétne územie a časové obdobie, ale o základné biogeochemické a ekofyziologické princípy a mechanizmy, ktoré sú v čase a priestore relatívne nemenné. Z toho vyplýva vyššia univerzálnosť tohto konceptu v porovnaní s empirickými prístupmi. Z procesného pohľadu je napríklad produkcia dreva výsledkom súboru fyziologických procesov lesných drevín a vychádza

z látkových a energetických tokov v ekosystémoch, ktoré závisia od klimatických a stanovištných podmienok. Procesné modely majú využitie, napr. pri komplexnom hodnotení ekologických (nutričných a hydrických) limitov produkcie biomasy alebo akumulácie uhlíka, pričom zohľadňujú zmeny klímy a chemizmu atmosféry.

S ohľadom na stále sa zlepšujúcu schopnosť procesných modelov spoľahlivo opisovať vývoj lesných ekosystémov je výskum ich širšieho využitia v lesnom hospodárstve nanajvyš aktuálny. S aplikáciou procesných modeloch v lesných ekosystémoch v stredoeurópskych podmienkach sa začalo začiatkom 21. storočia (Pietsch & Hasenauer 2002; Merganičová 2004; Hasenauer et al. 2005; Merganičová et al. 2005). Tieto práce riešili schopnosť procesných modelov simulovať prírodné ako aj človekom obhospodarované lesné ekosystémy. Prvé experimenty s integráciou procesných a empirických prístupov, ktoré sa zároveň snažili sformulovať informácie relevantné pre hospodárenie v lesoch v podmienkach zmeny klímy, boli u nás publikované už takmer pred desaťročím (Hlásny et al. 2011, 2014). Zároveň sa riešili čiastkové metodické otázky modelovania a získavania vstupných údajov potrebných na simulovanie lesných ekosystémov (Fabrika & Merganič 2010; Merganičová et al. 2012, 2013; Fabrika & Macková 2013; Merganičová & Merganič 2014; Macková et al. 2014).

Cieľom výskumu prebiehajúceho v rámci rezortného projektu SLOVLES je vytvoriť ekofyziologickú parametrizáciu procesného modelu Biome-BGCMuSo (Hidy et al. 2016) pre hlavné dreviny SR, ktorá umožní spoľahlivo reprodukovat vývoj lesných porastov na Slovensku. Ďalším cieľom je širšie zhodnotenie možností využitia procesných modelov v lesníckom plánovaní. V tomto príspevku stručne predstavujeme použitý model, dátový materiál a vybrané výsledky. Na záver formulujeme odporúčania pre ďalší výskum.

Použitý dátový materiál a model

Ako podkladový materiál sú použité údaje z plôch intenzívneho monitoringu lesa ICP Forests (9 plôch s prevažujúcim zastúpením smreka, buka a duba), a plochy, ktoré okrem štandardného vybavenia disponujú aj ekosystémovými stanicami na meranie tokov látok v ekosystéme (experimentálne plochy Bieň a Tatry) (tab. 1, obr. 1). Tieto plochy disponujú rôznymi fyziologickými, stanovištnými, klimatickými a pôdnymi údajmi, ktoré tvoria východisko pre odvodenie regionálne adaptovaných parametrov modelu Biome-BGCMuSo.



Obrázok 1. Merania meteorologických a ekofyziologických parametrov v experimentálnom poraste buka lesného na Bieni. Viacročné dáta z tohto porastu boli použité na parametrizáciu modelu Biome-BGCMuSo

Figure 1. Measurement of meteorological and ecophysiological data in the experimental forest plot Bieň dominated by the European beech. Multi-year data from this plot were used to parametrize the model Biome-BGCMuSo.

Tabuľka 1. Prehľad dátových zdrojov použitých na vytvorenie kalibrácie modelu Biome-BGC MuSo pre podmienky Slovenska**Table 1.** Overview of data sources used to calibrate model Biome-BGCMuSo for the conditions of Slovakia.

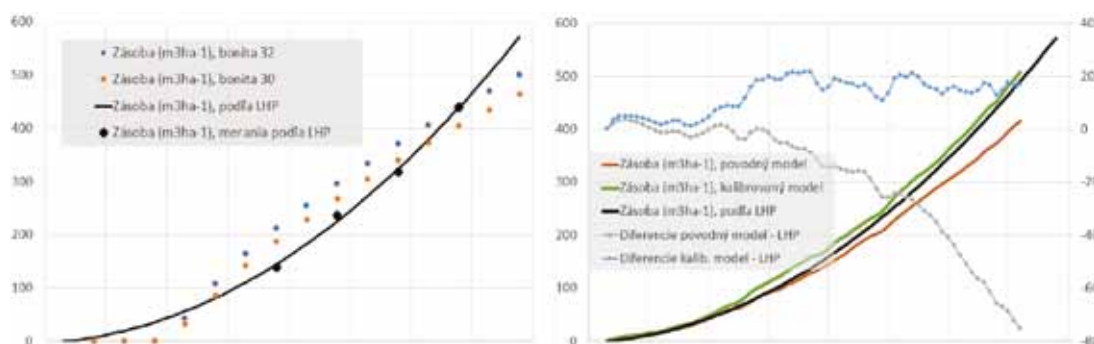
Zdroj dát	Zoznam plôch a ich počet			Dostupné údaje pre simulácie						Počet
	Smrek	Buk	Dub	Zásoba	Stanovište	Popis pôdy	Klimatické údaje	Manažment	Fyziologické merania	
Ekosystémové stanice	V. Tatry	Bieň		×	×	×	×		×	2
Plochy ICP Forests	Jasenie									
	Počana	Počana		×	×	×	×	×		9
	T. Lomnica	Turová	Čifáre							
	Železnô	Svetlice	Žibritov							
Spolu	4	3	2							11

Model BiomeBGC-MuSo (Hidy et al. 2016) je procesne orientovaný model, ktorého vývoj prebieha na Univerzite Loránda Eötvösa v Budapešti. Základom tohto modelu bol model Biome-BGC (Thornton 1998) vyvinutý na Univerzite v Montane, USA. Ide v súčasnosti o jeden z pokročilých nástrojov na modelovanie tokov látok v ekosystémoch. V rámci riešenia prebieha úzka spolupráca s vývojovým tímom a viaceré časti modelu boli upravené podľa našich špecifických požiadaviek.

Biome-BGCMuSo simuluje cykly uhlíka, dusíka, vody a energie v ekosystéme na základe interakcií medzi atmosférou, rastlinnou vegetáciou a pôdou. Model Biome-BGCMuSo má v porovnaní s pôvodným modelom viacero nových alebo modifikovaných častí. Pôda je rozdelená do viacerých vrstiev, čím sa umožnilo detailnejšie modelovanie vodného cyklu a vplyvu sucha, vylepšilo sa modelovanie dusíkového cyklu, fenológie a alokácie uhlíka. Bol zakomponovaný vplyv mortality spôsobenej suchom, rôzne hospodárske zásahy, implementovali sa nové metódy na výpočet fotosyntézy, evapotranspirácie, radiácie, stresu, atď. Hospodárske zásahy, ktoré je možné simulovať, zahŕňajú odoberanie biomas, zmenu charakteru vegetácie a zmenu drevinového zloženia.

Výsledky

V rámci pilotnej štúdie sme realizovali porovnanie (i) meraných zásob vybraných porastov so zásobami odvodenými z rastových tabuliek (teda zhodu reálneho vývoja porastu s výstupom empirického modelu), a (ii) porovnanie meraných zásob s výstupmi kalibrovaného a nekalibrovaného modelu Biome-BGCMuSo. Na obrázku 2 prezentujeme výsledky pre plochu Bieň (buk), pre ktorú disponujeme najkomplexnejšími dátami, vrátane historického vývoja zásob podľa plánov starostlivosti o les (PSL). Prezentujeme porovnanie vývoja zásob podľa PSL (bonity 30 a 32, ktoré sa pre daný porast udávali v rôznych cykloch obnovy PSL) so simuláciami pomocou modelu Biome-BGCMuSo.



Obrázok 2. Vývoj porastovej zásoby na experimentálnej ploche Bieň po roku 1945. a) Porovnanie zásoby podľa PSL a rekonštruovanej zásoby podľa rastových tabuliek pre bonity 30 a 32 udávané v PSL. b) Porovnanie vývoja zásob podľa PSL s výstupmi modelu Biome-BGCMuSo pred a po kalibrácii. Ľavá os: zásoba porastu v $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, Prává os: rozdiely simulovaných zásob a zásob podľa PSL v $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$

Figure 2. Development of standing volume in the experimental plot Bieň after 1945. a) The comparison of standing volume indicated in Forest Management Plans (FMP) and standing volume calculated based in the yield tables for site indices 30 and 32 (as indicated in FMP). b) The comparison of standing volume from FMP with standing volume simulated by Biome-BGCMuSo before and after calibration. Left axis: standing volume in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$; Right axis: differences of simulated and measured (i.e. from FMP) standing volume in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Možno vidieť, že vývoj meraných zásob sa odlišuje od vývoja podľa rastových tabuliek (obr. 2a). Výsledky simulácií modelom Biome-BGCMuSo sa s reálnym priebehom zhodujú lepšie, pričom táto zhoda sa výrazne zlepšila po kalibrácii vybraných parametrov (obr. 2b). Odchýlky simulovaných hodnôt od meraných zásob sú po roku 1975 (vek porastu 30 rokov) do 20 m³ na hektár ročne.

Odporúčania pre ďalší výskum

Na základe doterajších poznatkov sme sformulovali niekoľko odporúčaní ohľadne smerovania výskumu v ďalšom období tak, aby došlo k postupnej integrácii procesných modelov do rozhodovacích procesov. Napriek tomu, že sme sa v tejto štúdii zamerali na model BiomeBGC-Muso a produkciu lesa, tieto odporúčania platia všeobecne a týkajú sa v podstate všetkých oblastí managementu lesa, pričom je možné zvažovať využitie rôznych typov modelov. Odporúčania sa zameriavajú na štyri oblasti: (i) rozšírenie doterajších prístupov k hodnoteniu produkcie lesa, (ii) hodnotenie dopadov zmeny klímy a tvorba adaptačných opatrení, (iii) hodnotenie uhlíkového cyklu lesov a podpora inventarizácie skleníkových plynov, a (iv) rozšírenie aktivít monitoringu lesa. Konkrétne odporúčania sú nasledovné:

- Vypracovať projekcie vývoja produkcie založené na procesne orientovanom modeli pre jednotlivé dreviny a regióny Slovenska (je potrebné zvoliť, resp. vytvoriť vhodnú stratifikáciu) a podľa týchto výsledkov navrhnúť úpravy vybraných aspektov lesníckeho plánovania, najmä s ohľadom na prvky časovej úpravy lesa a drevinové zloženie
- Pre uvedené priestorové jednotky vyhodnotiť neurčitú (variabilitu) možného budúceho vývoja produkčných a ďalších ukazovateľov v podmienkach klimatickej zmeny a zohľadniť ju ako jedno z rizík dosahovania hospodárskych cieľov
- Spracovať komplexné hodnotenie zmien produkcie jednotlivých drevín, uhlíkového cyklu, medzidruhových vzťahov a ďalších ukazovateľov ako podklad pre aktualizáciu materiálov súvisiacich s adaptáciou lesov na zmeny klímy (vrátane Stratégie adaptácie SR na nepriaznivé dopady zmeny klímy (MŽP 2014) a jej aktualizáciu z roku 2018, Adaptačný akčný plán, a pod.). Týmto by mali byť nahradené staršie východiská, o ktoré sa opierali predošlé strategické materiály, z ktorých mnoho vzniklo v období riešenia rezortného projektu Vplyv klimatickej zmeny na lesy Slovenska (2003 – 2007) alebo v rámci realizačného výstupu rezortného projektu EPOL (Hlásny a kol. 2012).
- Využiť vytvorenú kalibráciu modelu BiomeBGC-MuSo ako prirodzené rozšírenie aktivít monitoringu lesa ICP Forests. Ako výstupy monitoringu by bolo možné v ďalšom období reportovať nielen časové série priamo meraných veličín, ale aj množstvo odvodených ukazovateľov indikujúcich reakcie lesných ekosystémov na meniace sa prírodné podmienky. Dáta monitoringu by tak boli zhodnotenú výrazne nad súčasný rámec a tvorili by dôležité východisko pre tvorbu adaptačných opatrení.

Podakovanie

Príspevok a tvorba výstupu bola podporená z úlohy SLOVLES, Výskum a vývoj na podporu konkurencieschopnosti slovenského lesníctva, riešenej v rokoch 2019 – 2021 a financovanej z rozpočtovej kapitoly MPRV SR (prvok 08V0301), ďalej s podporou projektu APVV-16-0325 a vďaka projektu: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva; (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja v rámci OPVa.

Použitá a odporúčaná literatúra

- Allen, C. D., Breshears, D. D., McDowell, N. G. 2015: On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6, 8:1–55.
- Fabrika, M., Merganič, J., 2010: Modelling solar radiation in forest canopy for the purposes of forest growth modelling. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2010, 17.–19. 5. 2010, Körbecke am Möhnesee, p. 27–35.
- Fabrika, M., Macková, L., 2013: Process-based downscale of simulations by empirical model SIBYLA to increase time and space resolution. In Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten: Sektion Ertragskunde: Jahrestagung 13.–15.05.2013 Rychnov nad Knežnou in Tschechien / hrsg. Ulrich Kohnle, Joachim Klädtke. -Freiburg im Breisgau: Joachim Klädtke, p. 134–145.
- Hasenauer, H., Merganičová, K., Pietsch, S. A., 2005: Modeling biogeochemical cycles within old-growth forest ecosystems. *Forest Science and Landscape Research*, 79(1/2):81–90.
- Hidy, D., Barcza, Z., Marjanovic, H., Ostrogovic Sever, M. Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., & Nagy, Z., 2016: Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9:4405–4437.
- Hlásny, T., Barcza, Z., Fabrika, M., Balázs, B., Churkina, G., Pajtík, J., Sedmák, R., Turčáni, M., 2011: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, 47:219–236.
- Hlásny, T., Turčáni, M., Fabrika, M., Baláž, P., Sedmák, R., 2011: Očakávané dopady zmeny klímy na bukové porasty Slovenska. In: Barna, M., Kulfan, J., Bublinec, E. (eds.): *Buk a bukové ekosystémy Slovenska*, s. 630–632.
- Hlásny, T., Sitková, Z., Bošela, M., Zúbrik, M., Trombik, J., Barka, I., Longauer, R., Dobor, L., Barcza, Z., Fabrika, M., Sedmák, R., 2012: Zmena klímy a lesy Slovenska: Možné dopady, adaptácia a odporúčania pre prax, Zvolen, NLC – LVÚ Zvolen, 75 s.
- Hlásny, T., Barcza, Z., Barka, I., Merganičová, K., Sedmák, R., Kern, A., Pajtík, J., Balázs, B., Fabrika, M., Churkina, G., 2014: Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management*, 328:55–68
- Hlásny, T., Mátyás, C., Seidl, R., Kulla, L., Merganičová, K., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Konôpka, B., 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Forestry Journal*, 60:5–18.
- Macková, L., Merganičová, K., Nalevanková, P., Fabrika, M., Štrelcová, K., Sitková, Z., 2014: Analysis of the impact of meteorological characteristics on the transpiration simulated in SIBYLA growth simulator. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): *Mendel a bioklimatologie*. Brno, 3.–5.9.2014, ISBN 978-80-210-6983-1.
- Merganičová, K., 2004: Modelling forest dynamics in virgin and managed forest stands. Dissertation thesis. BOKU Vienna, 155 p. Accessed online 18.06.2021: www.forim.sk
- Merganičová, K., Pietsch, S. A., Hasenauer, H., 2005: Testing mechanistic modeling to assess impacts of biomass removal. *Forest Ecology and Management*, 207(1–2):37–57.
- Merganičová, K., Merganič, J., Hasenauer, H., 2012: Assessing the Carbon Flux Dynamics within Virgin Forests: The Case Study ‘Babia hora’ in Slovakia. *Austrian Journal of Forest Science*, 129(1):1–21.

- Merganičová, K., Sitko, R., Merganič, J., 2013: Využitie GIS pre procesne orientované modelovanie vývoja lesa. In: Konferencie Praktické využití GIS v lesníctví a zemědělství 21. – 22. 2. 2013, Novotného lávka v Praze, Mendelova univerzita v Brně, 11 s.
- Merganičová, K., Merganič, J., 2014: The Effect of Dynamic Mortality Incorporated in BIOME-BGC on Modelling the Development of Natural Forests. *Journal of Environmental Informatics*, 24(1):24–31.
- Pietsch, S. A., Hasenauer, H., 2002: Using mechanistic modeling within forest ecosystem restoration. *Forest Ecology and Management*, 159:111–131.
- Thornton, P. E., Running, S. W., Hunt, E. R., 2005: Biome-BGC: Terrestrial Ecosystem Process Model, Version 4.1.1. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.
-

Adresa:

prof. RNDr. Tomáš Hlásny, PhD., Dr. Ing. Katarína Merganičová, PhD., Ing. Zuzana Sitková, PhD.,
Ing. Pavel Pavlenda, PhD.
Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen, T. G. Masaryka 2175/22, SK – 960 01 Zvolen
e-mail: hlasny@nlcsk.org
Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Kamýcka 129, CZ – 165 21 Praha 6