

# Využitie fluorescence chlorofylu na hodnotenie aktuálneho stavu vegetácie kukurice na pôde s aplikovaným biouhlím

Lenka Botyanszká, Lucia Toková, Natália Botková

## Abstract

---

Applying biochar to the soil can have a positive, negative, or even no effect on crops. At the level of the photosynthetic apparatus, the influence of environmental factors manifests itself by changing the activity of photosystem two (PSII). PSII activity at the level of photochemical processes is monitored by the rapid kinetics of chlorophyll fluorescence. This study evaluates the effect of biochar application and reapplication on the photosynthetic processes of maize plants. Biochar was applied in the amount of 20 t.ha<sup>-1</sup> and reapplied in the amount of 20 t.ha<sup>-1</sup>. Our observed results confirm that the application of biochar had an effect on PSII activity in both variants compared to the control variant. The results indicate that the measurement of the fast fluorescence kinetics of chlorophyll a can be used for further measurements of changes in the photosynthetic apparatus in plants grown on soils with added biochar.

**Keywords:** biochar, *Zea Mays* L., Chlorophyll fluorescence

## Annotation

The goal was to evaluate and assess the current photosynthetic status of corn in soil with applied and reapplied biochar. Its effect on photosystem II suitability of subsequent use.

## Abstrakt

---

Aplikácia biouhlia do pôdy môže mať pozitívny, negatívny alebo dokonca žiadny vplyv na plodiny. Na úrovni fotosyntetického aparátu sa vplyv enviromentálnych faktorov prejavuje zmenou aktivity fotosystému 2 (PSII). Aktivitu PSII na úrovni fotochemických procesov monitoruje rýchla kinetika fluorescence chlorofylu *a*. Táto štúdia hodnotí vplyv aplikácie a reaplikácie biouhlia na fotosyntetické procesy rastlín kukurice. Biouhlie bolo aplikované v množstve 20 t.ha<sup>-1</sup> a reaplikované v množstve 20 t.ha<sup>-1</sup>. Nami pozorované výsledky potvrdzujú, že aplikácia biouhlia mala vplyv na aktivitu PSII v oboch variantoch v porovnaní s kontrolným variantom. Výsledky naznačujú, že meranie rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* sa môže využiť na ďalšie merania zmien fotosyntetického aparátu v rastlinách pestovaných na pôdach s pridaným biouhlím.

**Kľúčové slová:** biouhlie, *Zea Mays* L, fluorescencia chlorofylu

## Anotácia

Cieľom bolo zhodnotiť a posúdiť aktuálny fotosyntetický stav kukurice v pôde s aplikovaným a reaplikovaným biouhlím. Jeho vplyv na fotosystém II vhodnosť následného použitia.

# 1 Úvod

---

Pôda zohráva kľúčovú úlohu v kolobehu prírody, najmä v kolobehu živín (Manlay, Feller a Swift, 2007). Uhlík sa na Zemi vyskytuje v mnohých formách, nachádza sa v celom životnom prostredí, ako súčasť morskej vody cez atmosféru, horniny (vápenec a uhlie) až po pôdu (Berner, 1989). Uhlík je súčasťou všetkého živého. Je schopný prejsť z jednej ríše do druhej ako súčasť uhlíkového cyklu.

Ako najbežnejší prvok sa nachádza v rastlinnom tele. Rastliny sa prirodzene stávajú zdrojom uhlíka v pôde, ak sa rastlina rozloží alebo spáli. Biouhlie je produkt spaľovania biomasy v neprítomnosti kyslíka (pyrolýza), bohatý na uhlík (C) a má potenciál zlepšiť úrodnosť pôdy (Lehmann a Joseph 2009). Okrem zlepšenia úrodnosti pôdy sa môže použiť aj na rekultiváciu pôdy, čím sa sprístupní viac poľnohospodárskej pôdy, pričom sa zvýšia výnosy plodín a dosiahnu sa bez poškodenia prírodného prostredia (Rawat, Saxena a Sanwal 2019).

Biouhlie má potenciál vyrábať obnoviteľnú energiu z poľnohospodárskych zdrojov ekologickým a nákladovo efektívnym spôsobom (Oni, Oziegbe a Olawole 2019). Použitie biouhlia závisí od viacerých premenných faktorov, ako je typ pôdy, kvalita a množstvo biouhlia, surovina syntetizovaná pyrolýzou, pestovaná plodina atď. (Tomczyk, Sokołowska a Boguta, 2020).

Biouhlie obsahuje rôzne organické látky a živiny, jeho pridávanie zvyšuje pH pôdy, ovplyvňuje vodivosť, cyklus organického uhlíka, hladinu celkového dusíka, dostupný fosfor, zadržiavanie živín, kolobeh vody a iné (Ding a kol. 2016). Môže tiež ovplyvniť transport a osud ťažkých kovov v pôde, sorpciu a adsorpciu pesticídov, živín a minerálov a zabrániť pohybu týchto chemikálií do povrchových alebo podzemných vôd a následnej degradácii vody z poľnohospodárstva (Duwiejua a kol. 2020).

Súčasný výskumný zdroj ukazuje, že aplikácia biouhlia do pôdy môže mať pozitívny, negatívny alebo dokonca žiadny vplyv na produkciu plodín. Hoci mnohé štúdie uvádzajú pozitívne účinky biouhlia na vlastnosti pôdy a rast rastlín, v literatúre je len veľmi málo štúdií popisujúcich vplyv biouhlia na fotosyntetický aparát rastlín. Na úrovni fotosyntetického aparátu sa vplyv faktorov prejavuje zmenou aktivity PSII. Meranie rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu je pre svoju jednoduchosť, rýchlosť a nedeštruktivnosť považované pre poľné experimenty za mimoriadne vhodné a perspektívne meranie (Thatcher a kol. 2016).

## 2 Metodika práce

---

### Poľné vegetačné pokusy

Pestovanie rastlín kukurice (*Zea Mays* L.) sa realizovalo v roku 2022, na výskumno – experimentálnej báze SPU Nitra – Dolná Malanta. Nadmorská výška dosahuje 175 – 180 m n. m. Priemerná ročná teplota vzduchu je 9,8 °C a priemerný ročný úhrn zrážok je 540 mm (Šimanský a kol. 2018). Pôda je klasifikovaná ako hnedozem kultizemná (WRB, 2014). Merané varianty poľného experimentu boli variant K (kontrolný), variant B20 (aplikácia biouhlia v roku 2014 v dávke 20 t.ha<sup>-1</sup>), variant B20r (reaplikácia biouhlia v roku 2018 v dávke 20 t.ha<sup>-1</sup>).

Biouhlie pre tento poľný experiment bolo vyrobené z kalov papierového vlákna s obilnými plevami v pomere 1:1 vzhľadom k hmotnosti (firma Sonnenerde, Rakúsko) pyrolýzou pri teplote

550 °C po dobu 30 minút v reaktore Pyreg (pyreg GmbH, Görhe, Nemecko). Biouhlie malo veľkosť frakcií 0 – 5 mm (Šimanský a kol., 2019).

### **Popis použitej analýzy rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a***

Táto metóda umožňuje potenciálne hodnotný prístup k popísaniu vlastností fotochemickej efektívnosti listov na úrovni PSII vo vzťahu k zmenám v podmienkach prostredia alebo funkčným zmenám fotochemického aparátu (Strasser a kol. 2010). Rýchla kinetika fluorescence chlorofylu *a* sa merala prenosným fluorimetrom FluorPen FP 110 (Photon Systems Instruments, spol. s r. o.) s použitím odnímateľných listových spôn. Na rastlinách sa vykonal 1 sekundový impulz merania fluorescence pri intenzite červeného svetla  $3500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  po 15 minútovej adaptácii vzorky na tmu. Fluorescenčné signály sa zaznamenávali v časovom úseku od  $10\mu\text{s}$  do 1s a boli následne premietnuté do logaritmickú časovej mierky charakteristickej krivky OJIP. Hodnoty z OJIP krivky možno využiť pre výpočet veľkého množstva fluorescenčných parametrov, ktoré vypovedajú o aktivite a účinnosti jednotlivých zložiek elektrónového transportného reťazca.

### **Meranie obsahu vody a teploty v pôde.**

Merania sa uskutočnili so senzorom 5TM (Decagon Devices, Pullman, USA). Dva snímače boli inštalované na experimentálnom pozemku v hĺbke 5 až 10 cm. Pôdne údaje o teplote a obsahu vody sa zbierali v polhodinovom intervale. Následne sa vytvoril graf s priebehom dát na konkrétny deň 20.7.2022.

### **Popis štatistickej analýzy**

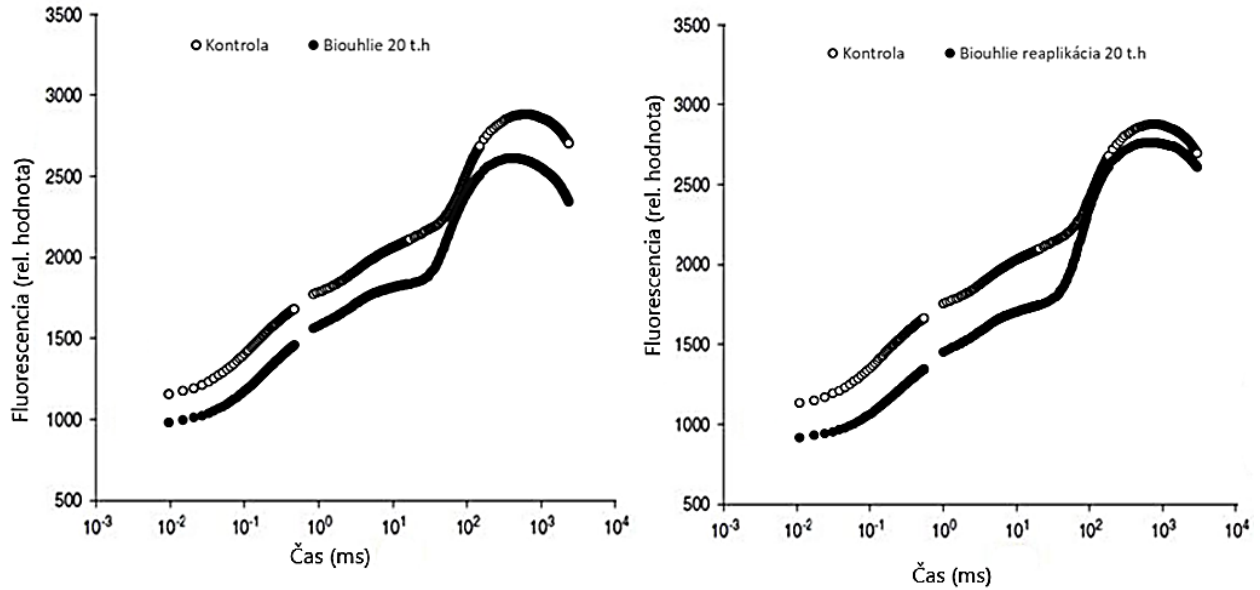
Vplyv aplikácie biouhlia na fotosyntetický výkon kukurice bol vyhodnotený pomocou jednofaktorovej analýzy odchýlok (*One-Way ANOVA*). Štatisticky významné vplyvy pri  $p < 0,05$  boli stanovené testom LSD. ANOVA test sa uskutočňoval v softvéri Statgraphics Centurion XV.I (Statpoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA). Grafické vyhodnotenie sa robilo pomocou programu Microsoft Excel.

## **3 Výsledky práce a diskusia**

---

Na základe široko uvádzaných pozitívnych účinkov úpravy pôdy biouhlia na plodiny (Biederman a Harpole 2013; Jeffery a kol. 2011; Crane-Droesch a kol. 2013, Vitková a kol., 2017) sme predpokladali, že úprava pôdy biouhlím by (A) zlepšila fyziologický výkon rastlín kukurice, (B) odlišila rôzne varianty aplikácie biouhlia do pôdy.

V rámci poľného experimentu sme realizovali meranie na listoch kukurice. Na základe merania bolo odvodených niekoľko parametrov, ktoré sú navrhnuté pre nedeštrukčné hodnotenie aktuálneho stavu porastu rastlín. Analyzovali sme fluorescenčnú krivku, aby sa ukázal celkový vplyv biouhlia v pôde na rastlinu kukurice. V krátkom časovom úseku zachytí zmeny vyplývajúce z prerozdelenia excitačnej energie v dôsledku pôsobenia viacerých faktorov. Rýchla fáza fluorescence chlorofylu si zachováva charakteristický tvar krivky, ale ukázala rozdiely medzi kontrolným variantom (K) a variantom s aplikovaným biouhlím  $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (B20), ako aj medzi K a variantom s reaplikovaným biouhlím (B20r) (Obrázok 1).



Obrázok 1. Priemerný priebeh O(K)JIP kriviek pre K, B20, B20r na základe meraní realizovaných 20.7.2022.

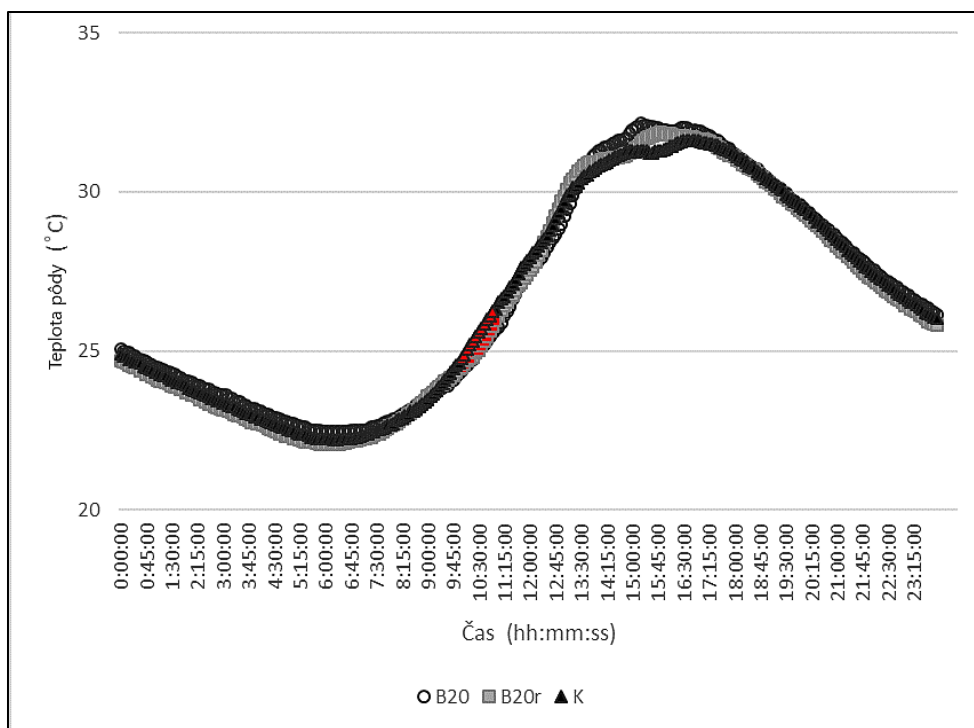
PSII zohráva kľúčovú úlohu v reakcii fotosyntetického aparátu listu na účinky environmentálnych faktorov. Rôzne varianty aplikovaného biouhlia mali za následok rozdiely v nameraných hodnotách fluorescence chlorofylu. Parameter  $V_I$ , predstavujúci relatívnu fluorescenciu chlorofylu na úrovni kroku I, parameter normalizovaná oblasť (Sm) a  $ET_o/RC$  ako transportný tok elektrónov na reakčné centrá, tieto parametre nezachytili zmeny medzi kontrolou a variantami s aplikovaným biouhlím (Tabuľka 1). Parameter  $ABS/RC$  (Absorpčný tok antén chlorofylu na reakčné centrá), sa znížil v oboch variantoch v porovnaní s kontrolou (Tabuľka 1) rovnako reagovali parametre  $\Phi_{Do}$  vyjadrujúci pravdepodobnosť, že energia absorbovaného fotónu sa rozptýli ako teplo, ako aj parameter  $Df_o/RC$  a  $Mo$ . Pozorovali sme, že aplikácia a re aplikácia biouhlia zvýšili maximálny výťažok primárnej fotochémie fotosystému II (PSII) (FV/FM), ako je znázornené v tabuľke 1, čo potvrdzuje zvýšenie potenciálnej fotochemickej účinnosti PSII pridaním biouhlia do pôdy. Výkonnostný index (potenciál) pre úsporu energie od excitácie po redukcii medzysystémových akceptorov elektrónov ( $Pi\_Abs$ ), ktorý sa ukázal ako citlivý parameter na meranie výkonnosti rastlín, odhalili rozdiely v reakciách medzi aplikáciou biouhlia a kontrolnými variantmi. Parameter  $Pi\_Abs$  sa pohyboval medzi 1,16 (K), 2,16 (B20) a 2,81 (B20r) (Tabuľka 1). Maximálny kvantový výťažok primárnej fotochémie, ktorý sa odráža v parametri  $\Phi_{Po}$ , dokázal odhaliť variant s aplikovaným biouhlím ako aj jeho re aplikáciu. Štatisticky preukázateľný vplyv aplikácie biouhlia, bol pre viaceré indexy  $Fm/F_o$ ,  $Fv/F_o$  a  $S_s$  (Tabuľka 1). Tieto údaje silne naznačujú, že tieto parametre sú schopné identifikovať zmeny v rastline spôsobené aplikáciou biouhlia resp. kontrolným variantom. Štatisticky preukázateľný vplyv re aplikácie biouhlia v porovnaní s kontrolou sa preukázal pri parametroch  $V_J$ ,  $\Psi_{i_o}$  a  $\Phi_{E_o}$ , kde sa ale nepreukázal rozdiel medzi aplikáciou biouhlia a kontrolou. Opačný efekt sa ukázal pri parametri  $TR_o/RC$  (Tabuľka 1).

Tabuľka 1. Vplyv aplikácie a reaplikácie biouhlie na parametre rýchlej kinetiky fluorescencie chlorofylu a (priemer  $\pm$  štandardná odchýlka). Rozdielne písmená (a, b) naznačujú štatisticky významnú odlišnosť ( $p < 0,05$ ) v hodnotách podľa LSD testu

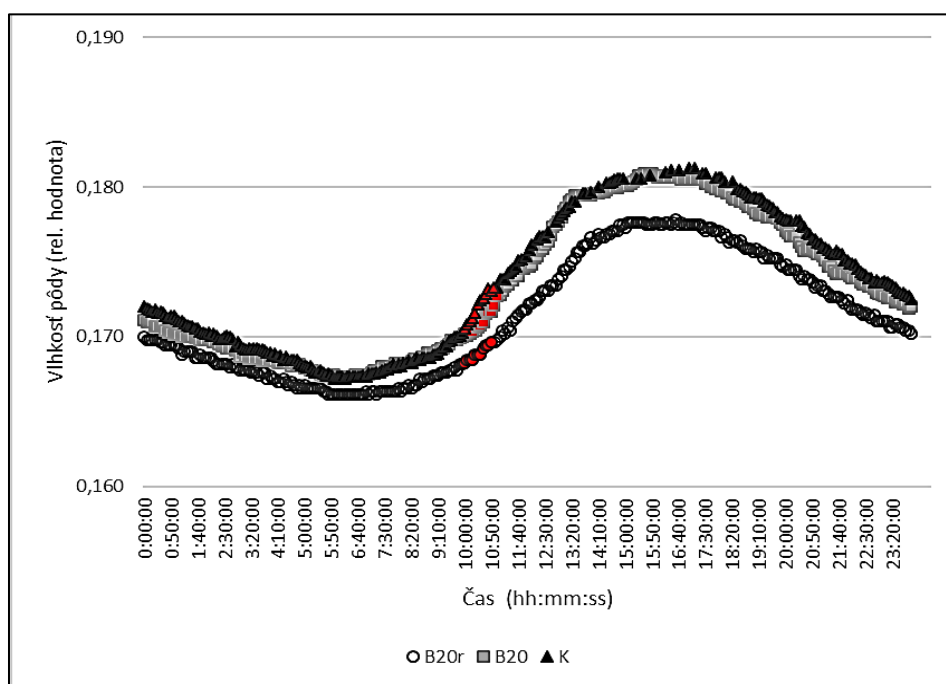
	K	B20	B20r
Fm/Fo	3.13 $\pm$ 0.59 a	3.88 $\pm$ 0.47 b	4.08 $\pm$ 0.43 b
Fv/Fo	2.13 $\pm$ 0.59 a	2.88 $\pm$ 0.47 b	3.08 $\pm$ 0.43 b
Fv/Fm	0.67 $\pm$ 0.07 a	0.74 $\pm$ 0.03 b	0.75 $\pm$ 0.03 b
Ss	0.47 $\pm$ 0.10 a	0.58 $\pm$ 0.10 b	0.56 $\pm$ 0.07 b
Phi_Po	0.67 $\pm$ 0.07 a	0.74 $\pm$ 0.03 b	0.75 $\pm$ 0.03 b
Pi_Abs	1.16 $\pm$ 0.57 a	2.16 $\pm$ 0.93 b	2.81 $\pm$ 0.75 b
ABS/RC	3.50 $\pm$ 1.43 b	2.39 $\pm$ 0.38 a	2.42 $\pm$ 0.42 a
Phi_Do	0.33 $\pm$ 0.07 b	0.26 $\pm$ 0.03 a	0.25 $\pm$ 0.03 a
DIo/RC	1.22 $\pm$ 0.73 b	0.63 $\pm$ 0.16 a	0.61 $\pm$ 0.16 a
Mo	0.86 $\pm$ 0.21 b	0.67 $\pm$ 0.16 a	0.58 $\pm$ 0.10 a
Psi_o	0.61 $\pm$ 0.08 a	0.62 $\pm$ 0.05 ab	0.68 $\pm$ 0.03 b
Phi_Eo	0.41 $\pm$ 0.07 a	0.46 $\pm$ 0.04 ab	0.51 $\pm$ 0.02 b
TRo/RC	2.28 $\pm$ 0.73 b	1.76 $\pm$ 0.24 a	1.81 $\pm$ 0.27 ab
Vj	0.39 $\pm$ 0.08 b	0.38 $\pm$ 0.05 ab	0.32 $\pm$ 0.03 a
ETo/RC	1.43 $\pm$ 0.67 a	1.09 $\pm$ 0.12 a	1.23 $\pm$ 0.20 a
Vi	0.58 $\pm$ 0.14 a	0.63 $\pm$ 0.14 a	0.53 $\pm$ 0.07 a
Sm	400.63 $\pm$ 61.55 a	407.20 $\pm$ 268.56 a	428.85 $\pm$ 176.97 a

Za dostatočných vodných podmienok biouhlie aplikované do pôdy zvyšujú fotosyntézu, priechodnosť vodivosti a relatívny obsah vody v listoch, ako aj nutričný stav rastlín a vývoj rastlín. Čo potvrdzujú viaceré štúdie rastlín kukurice (*Zea mays* L.), (Zhang a kol. 2016); (Tanure, a kol. 2019); (Zahra, 2021); *Phragmites karka*, (Zainul a kol. 2017), pistácia (Wu a kol. 2015); v ciroku a hrozna (Akhtar a kol. 2014 ; Baronti a kol. 2022 ) atď.

Zníženie dostupnosti vody v zmesiach pôda-biouhlie môže byť spôsobené aj retenčnou kapacitou samotnej úpravy pôdy, ktorá by za určitých podmienok mohla vystaviť rastliny vodnému stresu (Abel a kol. 2013 ), čo by znížilo fotosyntézu. V našom experimente bola teplota pôdy vyrovnaná (Obrázok 2.) a pôdna vlhkosť vyššia pri kontrolnom variante v porovnaní s variantom B20 a B20r (Obrázok 3.), čo ale nespôsobilo pokles maximálny výt'azok primárnej fotochémie PS II. Paneque a kol. (2016) preukázali pokles fotosyntetických procesov v rastlinách slnečnice po aplikácii biouhlie v pôde a pri vodnom strese. Avšak Liu a kol. (2016) pozorovali, že biouhlie zvýšilo dostupnosť vody pre rastliny na poli počas najsuchších mesiacov leta, čím sa zlepšil vzťah medzi rastlinami a vodou.



Obrázok 2. Priebeh hodnôt teploty pôdy namerané dňa 20.7.2022. červenou farbou je vyznačená doba merania.



Obrázok 3. Priebeh hodnôt vlhkosti pôdy namerané dňa 20.7.2022. červenou farbou je vyznačená doba merania.

Napríklad Spokas a kol. (2012) uvádzajú, že v 44 vybraných publikovaných článkoch pridanie biouhľia nemalo žiadny alebo negatívny vplyv na výnosy plodín u polovice z nich. Pridávanie

biouhlia do pôdy môže byť veľmi škodlivé pre mnohé rastliny a ekosystémy. Počas procesu karbonizácie pyrolýzy sa môžu vytvárať kontaminanty vrátane polycyklických aromatických uhl'ovodíkov a polychlórovaných dioxínov a furánov, niektoré ťažké kovy a iné toxíny (Lyu, a kol. 2016; Hussain a kol. 2017). Biouhlie využívané v experimente malo certifikát a rastliny by s tohto hľadiska nemali byť ovplyvnené.

## 4 Záver

---

Naše zistenia potvrdzujú, že fluorescencia chlorofylu a skúmanej kukurice bola ovplyvnená pridaním biouhlia do pôdy. A niektoré parametre dokázali oddeliť varianty s biouhlím od kontroly a aj medzi sebou. Výsledky teda naznačujú, že meranie fluorescencie môže slúžiť na odhad aktuálneho stavu porastu kukurice. A metóda poukazuje na jej potenciálnu využiteľnosť pri ďalších výskumoch pôsobenia biouhlia v pôde na rastliny.

## 5 Pod'akovanie

---

Tento príspevok bol vytvorený s finančnou podporou z projektu VEGA 2/0155/21, APVV-21-0089.

## 6 Použitá literatúra

---

Baronti, S., Magno, R., Maienza, A., Montagnoli, A., Ungaro, F., Vaccari, F. P. 2022. Long term effect of biochar on soil plant water relation and fine roots: Results after 10 years of vineyard experiment. *Science of The Total Environment*, 851, 158225.

Berner, R. A. 1989. Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Global and Planetary Change*, 1(1-2), 97-122.

Biederman, L. A., Harpole, W. S. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5(2), 202-214.

Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., Torn, M. S. 2013. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044049.

Ding, D., Lawson, K. D., Kolbe-Alexander, T. L., Finkelstein, E. A., Katzmarzyk, P. T., Van Mechelen, W., ... Lancet Physical Activity Series 2 Executive Committee. 2016. The economic burden of physical inactivity: a global analysis of major non-communicable diseases. *The Lancet*, 388(10051), 1311-1324.

Duwiejuah, A. B., Abubakari, A. H., Quainoo, A. K., Amadu, Y. 2020. Review of biochar properties and remediation of metal pollution of water and soil. *Journal of Health and Pollution*, 10(27).

- Hussien Ibrahim, M. E., Adam Ali, A. Y., Zhou, G., Ibrahim Elsiddig, A. M., Zhu, G., Ahmed Nimir, N. E., Ahmad, I. 2020. Biochar application affects forage sorghum under salinity stress. *Chilean journal of agricultural research*, 80(3), 317-325.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., Bastos, A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems environment*, 144(1), 175-187.
- Lehmann J, Joseph S. 2009 Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J, Joseph S (eds) Biochar for environmental management, science and technology. Earthscan, London
- Manlay, R. J., Feller, C., Swift, M. J. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 119(3-4), 217-233.
- Oni, B. A., Oziegbe, O., Olawole, O. O. 2019. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222-236.
- Rawat, J., Saxena, J., Sanwal, P. 2019. Biochar: a sustainable approach for improving plant growth and soil properties. *Biochar-an imperative amendment for soil and the environment*, 1-17.
- Tanure, M. M. C., da Costa, L. M., Huiz, H. A., Fernandes, R. B. A., Cecon, P. R., Junior, J. D. P., da Luz, J. M. R. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
- Thatcher, J. E., Squiers, J. J., Kanick, S. C., King, D. R., Lu, Y., Wang, Y., DiMaio, J. M.: Imaging Techniques for Clinical Burn Assessment with a Focus on Multispectral Imaging. *Advances in Wound Care*, 5, 2016: 360 – 378.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P. 2020. Biomass type effect on biochar surface characteristic and adsorption capacity relative to silver and copper. *Fuel*, 278, 118168.
- Strasser, P., Koh, S., Anniyev, T., Greeley, J., More, K., Yu, C., Nilsson, A. 2010. Lattice-strain control of the activity in dealloyed core-shell fuel cell catalysts. *Nature chemistry*, 2(6), 454-460.
- Šimanský, V. Horák, J. Polláková, N. Juriga, M. Jonczak, J. 2019. Will the nutrient content in biochar be reflected by their higher content of corn 131 organs? In *Journal of Elementology*, vol. 24, pp. 525-537.
- Šimanský, V. Horák, J. Igaz, D. Balashov, E. Jonczak, J. 2018. Biochar and biochar with N fertilizer as a potential tool for improving soil sorption of nutrients. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, pp. 1432-1440. ISSN 1439-0108.



Vitkova J., Kondrlova E., Rodny M., Surda P., Horak J. 2017. Analysis of soil water content and crop yield after biochar application in field conditions. *Plant, Soil and Environ*, 63, 569-573.

Walters, R.D. – White, J. G. 2018. Biochar in situ decreased bulk density and improved soil–water relations and indicators in Southeastern US Coastal Plain Ultisols. *Soil Science*, 2018, roč. 183, s 1–13.

WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Wu, Z., Wang, D., Li, Y., Du, X., Shao, Q., Liu, S. 2015. Effects of biochar fertilizer application on growth properties and photosynthetic and physiological characteristics of *Pistacia chinensis* Bunge. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(6), 992-997.

Zahra, M. B., Aftab, Z. E. H., Haider, M. S. 2021. Water productivity, yield and agronomic attributes of maize crop in response to varied irrigation levels and biochar–compost application. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(11), 4591-4604.

Zainul, A., Koyro, H. W., Huchzermeyer, B., Gul, B., Khan, M. A. 2017. Impact of a biochar or a compost-biochar mixture on water relation, nutrient uptake and photosynthesis of *Phragmites karka*. *Pedosphere*, 160, 1-22.

Zhang, J., Qun, C. H. E. N., Changfu, Y. O. U. 2016. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. *Pedosphere*, 26(2), 265-272.