



VYUŽITIE SATELITNÝCH SNÍMOK PROJEKTU COPERNICUS-SENTINEL PRE HODNOTENIE DOPADOV SUCHA NA STAV VEGETÁCIE NA ZÁPADNOM SLOVENSKU V ROKU 2022

Marcel Garaj ▪ Viera Rattayová ▪ Gabriela Ivaňáková

Garaj, M., Rattayová, V., Ivaňáková, G.: Application of remote sensing data from the Copernicus-Sentinel project for the drought impact assessment on vegetation in the Western Slovakia in the year 2022. APOL, 2023, vol. 4, no. 1, p. 39–44.

Abstract: Recently, forests in Slovakia have get stressed due to impact of climate change such as meteorological and hydrological drought periods, change in precipitation depths and regime, higher evapotranspiration volume, rising air temperature and increasing amount of bark beetles and pathogens. We have been observing this kind of phenomenon not only in Slovakia but also in the whole Carpathian Mountain Region last decades (Práválie et al. 2022). Therefore, appeared a strong demand on effective tool for assessing forest health, vitality and productivity in large scales. Copernicus is the Earth observation component of the European Union's Space program, looking at our planet and its environment to benefit all European citizens. The Copernicus Global Land Service reliably provides a set of biophysical variables that describe the state and the evolution of the vegetation, the energy budget and the water cycle over the land surface at global scale via remote sensing data (Jiang et al. 2021). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Leaf Area Index (LAI) as an essential bio-eco-climate variables shows a brief overview of vegetation condition over the territory of Slovakia during the warm half year of 2022 from April to September. Together with phenological, meteorological data (Slovak Hydrometeorological Institute) and drought report data (Intersucho) it identifies the most affected forest and agricultural areas with decreasing plant fitness level. Extreme meteorological drought, according to the SPEI index (Vicente-Serrano et al. 2010), started in June and hit the major part of Slovakia in July and August 2022. Subsequently, the soil drought affected 60% of Slovakia in the second half of July. Soil water storage deficit reached its maximum also in June and July, mainly in the central part of Slovakia and varied from –80 mm to –100 mm. Summer yellowing and falling of leaves appeared in August 2022 as the result of these severe conditions in e. i. Poddunajská nížina Lowland, Malé Karpaty, Borská nížina Lowland, Považský Inovec and Tribeč Mountains, etc. NDVI and LAI as an indicators of the greenness of the biomes decreased rapidly from June to August 2022 in all mentioned areas.

Key words: NDVI; LAI; vegetation; drought; Slovakia; 2022

Úvod

Lesy sú považované za zelené pľúca našej planéty, ktoré pri svojich metabolických procesoch vytvárajú kyslík, filtrujú vzduch a zbavujú ho nečistôt. Nenahraditeľnú úlohu má vegetácia najmä v mestách, kde svojimi tieniacimi vlastnosťami a premenou tepla na výpar ochladzuje povrchy a vzduch (Rakoto et al. 2021) a zmieňuje tým prejavy mestského ostrova tepla (Bokwa et al., 2019). Lesné ekosystémy nám poskytujú priestor na rekreáciu a oddych počas vln horúčav v mestách a vytvárajú tzv. ostrovy chladu (Amati and Taylor 2010; Du et al. 2017). Okrem spomenutých bioklimatických a ekostabilizačných vlastností majú lesy a vegetácia nespočetné množstvo ďalších benefitov pre človeka a prírodu.

Vplyvom prebiehajúcej klimatickej zmeny, čoraz častejšieho a intenzívnejšieho výskytu meteorologického, pôdneho a hydrologického sucha (Fendeková et al. 2018) a spolupôsobením mnohých iných biotických

a abiotických faktorov sa zdravotný stav, vitalita a produkčná schopnosť lesov rapídne mení v rámci rokov ale aj v priebehu desaťročí. Tieto zmeny postihujú územia rôznych mierok v rôznych časových horizontoch.

Na Slovensku sú k dispozícii dlhodobé fenologické pozorovania lesných drevín, ktoré sa realizujú metódou vizuálneho pozorovania na monitorovacích plochách v rámci programu Čiastkového monitorovacieho systému Lesy (ČMS) (Pavlena et al. 2010) a v sieti fenologických staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ – agrometeorologické a fenologické informácie).

Ako vhodné doplnenie fenologických pozorovaní „*in situ*“ sa v súčasnej dobe javí využívanie dát diaľkového prieskumu Zeme, tzn. družicových snímok, satelitných meraní, lidarových snímok, ale aj využitie dronov, ktoré ponúkajú komplexný pohľad na predmetné územie, kataster, urbár, ktoré jednotliviec nie je schopný obsiahnuť komplexne inou formou. Tieto prístupy sú na území Slovenska pomerne nové a ani zďaleka sa nevyužívajú ich plný potenciál. Priekopnícke v danej problematike sú práce predstavujúce inovatívnu metódu určovania nástupu fenofáz, založenú na využití vegetačného indexu NDVI odvodeného zo satelitného spektrorádiometra MODIS (Priwitzer et al. 2009; Bucha et al. 2011).

V tomto príspevku sa venujeme využitiu vegetačných indexov NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a LAI (Leaf Area Index) v rámci programu Copernicus na hodnotenie dopadov sucha na stav vegetácie na Slovensku v roku 2022. Copernicus je súčasťou vesmírneho programu Európskej únie (ESA) na pozorovanie Zeme, ktorý sa zameriava na našu planétu Zem a jej životné prostredie. Oproti satelitom Terra a Aqua so spektrorádiometrom MODIS pod záštitou NASA je program Copernicus so senzormi Sentinel-3/OLCI menej ovplyvnený oblačnosťou nakoľko vytvára 10-dňový kompozit s redukciou oblačnosti.

Materiály a metodika

Predložený výskum bol realizovaný pre územie celej Slovenskej republiky so špecifickým zreteľom na územia a lokality, ktoré boli vďaka hláseniam od reportérov identifikované ako najviac zasiahnuté suchom spojeným s letným žltnutím, opadom listov, vädnutím asimilačných orgánov a schnutím lesnej vegetácie, najmä buka lesného (*Fagus sylvatica* L.), jedle bielej (*Abies alba* Mill.) a smreku obyčajnom (*Picea abies* [L.] Karst.), rôznych druhov duba (*Quercus* spp.), hrabu obyčajného (*Carpinus betulus* L.), javora (*Acer* spp.) a lipy (*Tilia* spp.), etc. Dopady sucha na lesné porasty sme na základe satelitných snímok sledovali v období od apríla do konca septembra, teda v rámci teplého polroka, resp. vegetačného obdobia.

Uvedené satelitné snímky sme získali v rámci programu Copernicus, ktorý je súčasťou vesmírneho programu Európskej únie (ESA). Uvedené snímky je možné voľne sťahovať zo stránky <https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>, či už vo formáte NetCDF alebo GeoTIFF. Pre účel nášho výskumu sme zvolili formát GeoTIFF nakoľko nešlo o veľké množstvo súborov. Pri NDVI ako aj pri LAI predstavuje každá snímka 10-dňovú syntézu hodnôt s maximálnou možnou redukciou oblačnosti. Výsledné agregované produkty sú poskytované v priestorovom rozlíšení 300 m. Spracované boli pomocou softwaru ArcGIS 10 a programovacieho jazyka Python.

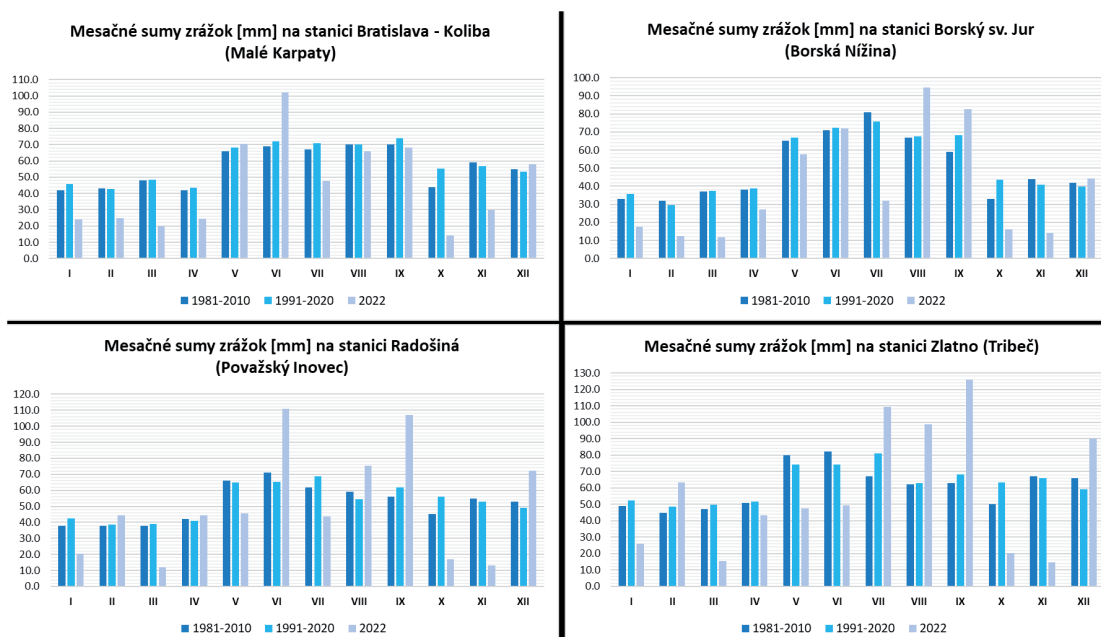
Vegetačný index (NDVI) je indikátorom zeleného stavu biómov. Vyjadruje hustotou zelene a obsah chlorofylu v listoch na zemskom povrchu na základe odrazivosti rôznych vlnových dĺžok. Môžeme ho vypočítať na základe rozdielu a pomeru vlnových dĺžok medzi červeným viditeľným svetlom a blízkym infračerveným svetlom. NDVI definujú hodnoty od $-1,0$ do $1,0$, kde záporné hodnoty tvoria hlavne mraky, voda a sneh, a hodnoty blízke nule sú primárne tvorené skalami a holou pôdou. Veľmi malé hodnoty ($0,1$ alebo menej) zodpovedajú prázdny oblastiam skál, piesku alebo snehu. Stredné hodnoty (od $0,2$ do $0,3$) predstavujú kríky a lúky, zatiaľ čo veľké hodnoty (od $0,6$ do $0,8$) označujú lesy.

Index listovej plochy (LAI) kvantifikuje množstvo polovičnej listovej plochy v pomere k jednotke horizontálnej plochy terénu. Hodnota odvodená zo satelitu zodpovedá celkovému zelenému LAI všetkých vegetačných etáží, vrátane podrastu, čo môže predstavovať skreslenie najmä v lesných porastoch. Prakticky LAI kvantifikuje hrúbku vegetačného krytu, biomasy. Napríklad ak hodnota LAI = 3 tak potom na 1 m^2 terénu pripadajú 3 m^2 polovičnej listovej plochy.

Meteorologické dáta sme získali zo siete klimatologických a zrážkomerných staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Pre každé študované územie sme vybrali dve stanice. Jedna reprezentovala úpätie alebo svahy a jedna vrcholové polohy daných celkov.

Výsledky a diskusia

V roku 2022 sa sucho prejavilo v rozsiahlych oblastiach Európy, Slovensko nevynímajúc, mimoriadne neobvyklým spôsobom. Sucho je fenomén, ktorý je výsledkom komplexných vplyvov. Atmosférické zrážky popri teplote vzduchu a ďalších meteorologických prvkoch, zásadne prispeli k zvýrazneniu sucha. Veľmi neštandardné až extrémne boli ich niektoré hodnoty na Slovensku v období od septembra 2021 do augusta 2022 (Faško et al. 2022). Od jesene 2021 do leta 2022 bola z hľadiska priestorového úhrnu zrážok pre celé územie Slovenska najchudobnejšia na zrážky jar v roku 2022, kedy je dostatočná zásoba vody potrebná hlavne pre vegetáciu, jej vitalitu, nástup jarných fenologických fáz a dostatočnú úrodu. Najvýraznejšie zrážkové deficity sme zo sledovaných lokalít zaznamenali v okolí Bratislavy, na hlavnom hrebeni Malých Karpát a na Borskej nížine (obr. 1). Na stanici Bratislava-Koliba (283 m n. m.) spadlo v marci len 41 % a v apríli 57 % dlhodobého priemeru zrážok 1991 – 2020. Na stanici Malý Javorník (575 m n. m.) to bolo dokonca len 37 % v marci a 70 % v apríli. Ročný deficit zrážok sa tu vyšplhal na takmer –230 mm, a teda 230 l/m² chýbalo na tomto území v roku 2022. Na stanici Bratislava-Koliba bol ročný deficit 150 mm. Tento výrazný zrážkový deficit zaznamenali aj pozorovatelia, ktorí zaznamenali vädnutie jarnej výsadby, ale aj hydrológovia vďaka zníženým vodným stavom a prietokom. Na Záhorí sa vyskytol rovnaký problém. V zimných a jarných mesiacoch výrazný zrážkový deficit (obr. 1) prechodne zmiernili zrážky v máji a júni 2022, ale následne prišiel zrážkovo chudobný júl, kedy na stanici Kuchyňa spadlo 54 % a na stanici Borský Svätý Jur len 42 % normálu 1991 – 2020. V poslednej júlovej dekáde roku 2022 sa navyše vyskytla veľmi výrazná vlna horúčav, kedy maximálne denné teploty vzduchu kulminovali od 35 do 37 °C. Po krátkej pauze situácia pokračovala aj v prvej augustovej dekáde 2022. Situácia v Považskom Inovci a v pohorí Tribeč mala podobný vývoj. Avšak stanica Piešťany na úpätí Inovca mala zrážkovo podpriemerné všetky mesiace až do augusta 2022 ako jediná zo sledovaných. Na stanici Radošina (217 m n. m.) v Inovci spadlo v marci 2022 len 30 % zrážok z dlhodobého normálu 1991 – 2020, rovnako ako v Zlatne (330 m n. m.) a Horných Lefantovciach (185 m n. m.) v pohorí Tribeč.

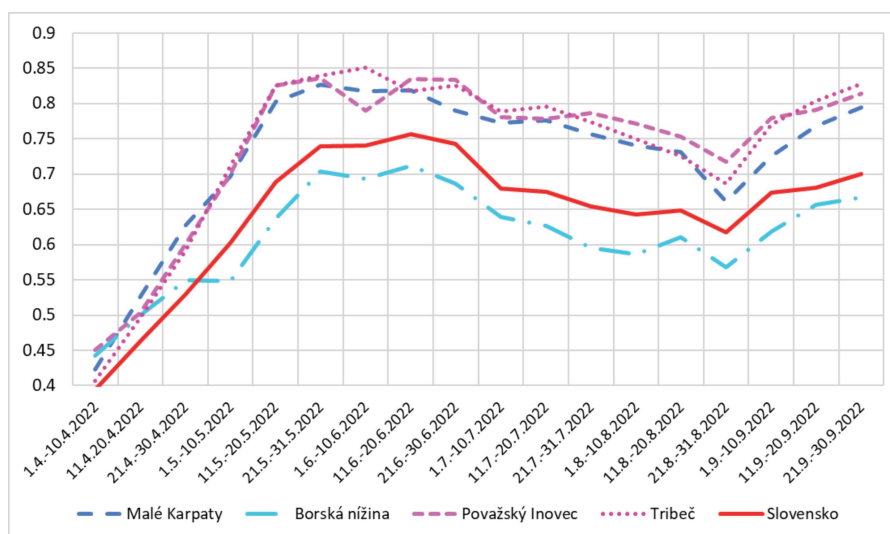


Obrázok 1. Porovnanie mesačných úhrnov zrážok na vybraných staniách počas normálového obdobia 1981 – 2010, 1991 – 2020 a v roku 2022

Figure 1. Comparison of monthly precipitation depths on the selected gauges for long-term averages 1981–2010, 1991–2020 and in the year 2022

Uvedenej suchej jari 2022 navyše predchádzali roky 2015 až 2021 kedy sa v rámci Slovenska vyskytlo viacero kratších alebo dlhších epizód sucha rôzneho typu. Ako uvádza Rozkošný et al. (2022), najväčší deficit pôdnej vlhky bol v regióne Orava v auguste až septembri 2015, s najväčšou zápornou hodnotou -69mm (2. 9. 2015). Významne vysoké hodnoty deficitu pôdnej vlhky boli aj v júli 2019 (-62mm), v júli 2021 (-48mm) a v máji 2018 (-40mm). Reportéri lesníckeho dotazníka vo svojich reportoch hlásili v obdobiach epizód sucha v rokoch 2018 – 2021 zníženú hladinu vodných tokov v lesoch, stratu vlhkosti vrchnej vrstvy pôdy, presychanie hrabanky, riziko lesných požiarov a extrémne vysušenú pôdu do hĺbky viac ako 20 cm, najmä na otvorených plochách a holinách. Toto kumulatívne, opakujúce sa sucho, teda výrazne negatívne ovplyvnilo stav lesnej vegetácie v lete roku 2022.

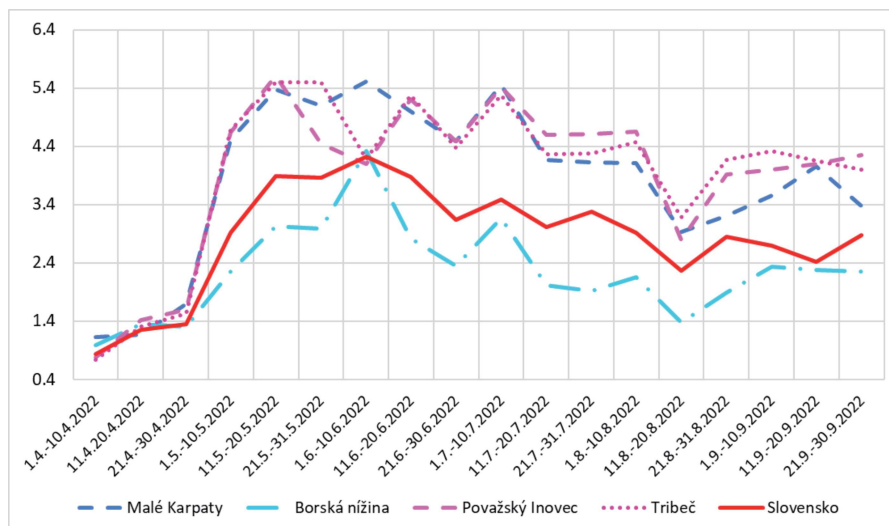
Hodnoty vegetačného indexu dosahovali minimum na začiatku sledovaného obdobia v apríli 2022, kedy väčšina drevín na západnom Slovensku začína s pučaním a zalistovaním. V porovnaní s priemerom pre celé Slovensko si môžeme všimnúť určitý posun (obr. 2). Najvyššie hodnoty NDVI boli dosiahnuté v období od 11. – 20. 5. 2022 do 21. – 30. 6. 2022, kedy boli dreviny zalistené, niektoré vo fáze kvitnutia, resp. s májovými výhonkami. Na snímkach je možné po dôkladnej analýze priestorovo odlíšiť lokality, kde sa tieto fenomény vyskytli. Uvedené maximum však rýchlo pokleslo, a to najmä kvôli kumulovanému stresu, ktorému boli porasty vystavené ako na jar 2022, tak aj roky predtým (Faško et al. 2022; Rozkošný et al. 2022). Najvýraznejší pokles indexu NDVI sme zaznamenali na začiatku júla 2022, a to vo všetkých sledovaných územiach (obr. 2), ale najviac v celoslovenskom priemere o $-0,064$ na hodnotu 0,68, čo predstavuje hraničnú hodnotu medzi zdravou a stredne zdravou vegetáciou. Pri detailnejšom pohľade dochádzalo ku kontinuálnemu poklesu vegetačného indexu vplyvom výrazného zrážkového deficitu a dlhotrvajúcich, intenzívnych vln horúčav, ktorý vyvrcholil minimálnou hodnotou NDVI v poslednej dekáde augusta 2022.



Obrázok 2. Vývoj NDVI na Slovensku a v študovaných územiach v teplom polroku (IV–IX) 2022
Figure 2. Development of NDVI in the Slovakia and in selected areas in warm half year (IV–IX) 2022

Vo viacerých lokalitách Malých Karpát bolo zaznamenané výrazné a skoré letné žltnutie listov, ktoré môžeme do značnej miery pripísať vyššie spomenutým, zhoršeným stanovištným podmienkam. Išlo najmä o lokality v 1. a 2. lesnom vegetačnom stupni v katastri obcí Svätý Jur, Modra a Pezinok, ale tiež Dobrá Voda a Buková. Letné žltnutie dobre dokumentuje aj obrázok 3, kde pozorujeme výrazný pokles listovej plochy na jednotku horizontálnej plochy zeme vo všetkých územiach od začiatku júla do približne polky augusta 2022. V Malých Karpatoch boli najviac zasiahnuté suchom porasty buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) a na rôznych druhoch duba (*Quercus* spp.). Na Borskej nížine bolo možné identifikovať porasty borovice lesnej (*Pinus sylvestris* L.) vo vojenskom obvode Záhorie, ktoré na konci leta trpeli suchom aj napriek jej širokej ekologickej valencii. Postihnuté boli aj lužné lesy na nivách a terasách v okolí riek Morava, kde sme zaznamenali opad listov na

porastoch javora (*Acer* spp.), lipy (*Tilia* spp.), hrabu obyčajného (*Carpinus betulus* L) a brestu (*Ulmus glabra* Huds.). V povážskom Inovci boli najviac postihnuté lokality okolo Novej a Starej Lehoty, Kálnice a Selca. V pohorí Tribeč sa zhoršenie stavu vegetácie najviac prejavilo katastroch obcí Mankovce, Lovce, Zlatno, Krnča a Drahovce.



Obrázok 3. Vývoj LAI na Slovensku a v študovaných územiach v teplom polroku (IV–IX) 2022
Figure 3. Development of LAI in the Slovakia and in selected areas in warm half year (IV–IX) 2022

Družicové merania a satelitné snímkovanie poskytujú užitočné informácie potrebné pre hodnotenie vplyvu zmeny klímy na lesné porasty ako aj pre celkový manažment našich lesov. Dokážu identifikovať postihnuté územia a po zvážení všetkých súvislostí napovedať kde je potrebné vykonať opatrenia na zabezpečenie zdravia porastu. V súčasnej dobe sú satelitné snímky voľne prístupné a môže ich využiť každý, kto má záujem. Preto je potrebné využívať aktuálne dostupné produkty vesmírnych agentúr ESA a NASA, zefektívniť svoju prácu, maximalizovať svoj výkon a držať krok smerom k novým technológiám a prístupom.

Literatúra

- Amati, M., Taylor, L., 2010: From green belts to green infrastructure. *Planning Practice & Research*. 25:143–155. Dostupné na <https://doi.org/10.1080/02697451003740122>.
- Bokwa, A., Geletič, J., Lehnert, M., Žuvela-Aloise, M., Hollósi, B., Gál, T., Skarbit, N., Dobrovolný, P., Hajto, M. J., Kielar, R., Walawender, J. P., Šťastný, P., Holec, J., Ostapowicz, K., Burianová, J., Garaj, M., 2019: Heat load assessment in Central European cities using an urban climate model and observational monitoring data. *Energy and Buildings*, 201:53–69. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.023>.
- Bucha T., Priwitzer, T., Koreň, M., 2011: Modelovanie fenologického vývoja lesných porastov pomocou vegetačného indexu NDVI odvodeného zo satelitných snímok MODIS. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 57:197–196.
- Du, H., Cai, W., Xu, Y., Wang, Z., Wang, Y., Cai, Y., 2017: Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27:24–31. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.008>.
- Faško, P., Markovič L., Ivaňáková, G., Kajaba, P.: Extraordinary to extremely low precipitation totals in Slovakia in the years 2021 and 2022 in the historical context since 1881. *APOL*, 3:87–93.

- Fendeková, M., Gauster, T., Labudová, L., Vrablíková, D., Danáčová, Z., Fendek, M., Pekárová, P., 2018: Analysing 21st century meteorological and hydrological drought events in Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66:393–403. Dostupné na <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0026>.
- Jiang, L., Liu, Y., Wu, S., Yang, C., 2021: Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data. *Ecological Indicators*, 129: 107933. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107933>.
- Pavlanda, P., Pajtík, J. et al., 2010: Monitoring lesov Slovenska. Správa za ČMS Lesy a projekt FutMon za rok 2009: NLC – LVÚ Zvolen, 139 p.
- Práválie, R., Sirodoev, I., Nita, I. A., Patriche, C., Dumitraşcu, M., Roşca, B., Tişcovschi, A., Bandoc, G., Săvulescu, I., Mănoiu, V., Birsan, M. V., 2022: NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*, 136:108629. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>.
- Privitzer, T., Bucha, T., Koreň, M., 2009: Využitie vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu pri fenologických pozorovaniach lesných drevín. In: Bucha, T., Pavlendová, H. (eds.): Zborník vedeckých prác zo seminára „Dialkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach“. Zvolen, NLC, p. 51–64.
- Rakoto, P. Y., Deilami, K., Hurley, J., Amati, M., Sun, Q. (Chayn), 2021: Revisiting the cooling effects of urban greening: Planning implications of vegetation types and spatial configuration. *Urban Forestry and Urban Greening*, 64:127266. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127266>.
- Rozkošný, J., Ivaňáková, G., Mrekaj, I., Turňa, M., Labudová, L., Krčová, I., Špilda, I., Ridzoň, J., Mikulová, K., 2022: Analysis of drought impact on forest stands in Orava region during the period 2015–2021. *APOL*, 3:75–86.
- Vincente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., 2010: A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23:1696–1718.

ADRESA

Mgr. Marcel Garaj, PhD., RNDr. Gabriela Ivaňáková
Slovenský hydrometeorologický ústav
Odbor klimatologická služba
Jeseniová 17
SK–833 15 Bratislava
e-mail: marcel.garaj@shmu.sk

Ing. Viera Rattayová
Stavebná fakulta
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Radlinského 11
SK–810 05 Bratislava