

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
V PRAZE**

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd



Česká
zemědělská
univerzita
v Praze

**Využitelnost dat o struktuře vegetace z laserové
altimetrie pro modelování distribuce ptáků v České
republice**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Autor: Anna Vyhlídalová

2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Anna Vyhlídalová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Využitelnost dat o struktuře vegetace z laserové altimetrie pro modelování distribuce ptáků v České republice

Název anglicky

Applicability of vegetation structure data from laser altimetry for modelling bird distribution in the Czech Republic

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je posoudit využitelnost dat o struktuře vegetace z laserové altimetrie pro modelování distribuce ptáků v České republice. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

Metodika

Druhová diverzita je celosvětově ohrožena neustále rostoucími environmentálními změnami způsobenými člověkem. Abychom mohli druhy účinně chránit, je třeba znát jejich biotopové nároky. Nicméně terénní sběr dat o struktuře biotopů je časově náročný a tudíž omezený svým prostorovým a časovým rozsahem. Současné metody dálkového průzkumu Země umožňují monitoring rozsáhlých oblastí a tím překonání omezení, které má terénní sběr dat. Mezi v poslední době často využívaná data patří data o struktuře vegetace získaná z laserových altimetrů umístěných na letadle nebo satelitu.

Úkolem autorky bude posoudit využitelnost dat o struktuře vegetace ze dvou různých datových zdrojů (globální modely výšky vegetace a výška vegetace z leteckého laserového skenování) pro modelování distribuce ptáků v ČR. Pro modelování využije autorka data z liniového sčítání druhů (LSD), která lze považovat za prezenčně-absenční data. Náplní literární rešerše bude zejména modelování druhové distribuce, laserové altimetrie, a využití struktury vegetace v modelech druhové distribuce.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autorky.

Doporučené zdroje informací

- Assmann, J. J., Moeslund, J. E., Treier, U. A., & Normand, S. (2022). EcoDes-DK15: high-resolution ecological descriptors of vegetation and terrain derived from Denmark's national airborne laser scanning data set. *Earth System Science Data*, 14(2), 823-844.
- Bakx, T. R., Koma, Z., Seijmonsbergen, A. C., & Kissling, W. D. (2019). Use and categorization of light detection and ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Diversity and Distributions*, 25(7), 1045-1059.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1), 19-30.
- Moudrý, V., Cord, A. F., Gábor, L., Laurin, G. V., Barták, V., Gdulová, K., ... & Wild, J. (2023). Vegetation structure derived from airborne laser scanning to assess species distribution and habitat suitability: The way forward. *Diversity and Distributions*, 29(1), 39-50.
- Moudrý, V., Moudrá, L., Barták, V., Bejček, V., Gdulová, K., Hendrychová, M., ... & Šálek, M. (2021). The role of the vegetation structure, primary productivity and senescence derived from airborne LiDAR and hyperspectral data for birds diversity and rarity on a restored site. *Landscape and Urban Planning*, 210, 104064.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

prof. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2024

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Využitelnost dat o struktuře vegetace z laserové altimetrie pro modelování distribuce ptáků v České republice vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 28.3.2024

Podpis:

Poděkování:

Chtěla bych tímto poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D., nejen za poskytnutí odborných rad a námětů, které mi dopomohly k jejímu dokončení, ale také za vstřícný a trpělivý přístup, který během zpracování této práce v rámci konzultací uplatnil. Dále bych chtěla poděkovat rodině za podporu během studia.

Abstrakt

Struktura vegetace je důležitým faktorem ovlivňujícím výskyt ptáků. Poskytuje úkryt před predátory, ovlivňuje dostupnost potravy a je důležitým aspektem při hnízdění. Ke studiu vztahů mezi výskytem či diverzitou ptactva a strukturou vegetace lze využít modelování druhové distribuce. Modely druhové distribuce kombinují data o výskytu nebo početnosti druhů s daty o prostředí. Tato práce analyzuje důležitost charakteru vegetace pro ptáky vyskytující se v České republice, kombinací dat Liniového sčítání druhů (LSD), které jsou dostupné v rozlišení 2,8 x 3 km a výšky vegetace ze dvou zdrojů. V první řadě z dat leteckého laserového skenování v podrobném rozlišení 2 metry, a z dat mise GEDI, které jsou dostupné v rozlišení 1 x 1 km. Dílčím cílem práce, je právě vyhodnocení využitelnosti dat GEDI pro studium vztahů mezi výskytem ptáku a strukturou vegetace. K analýze byla využita BRT (Boosted Regression Trees) technika tvorby modelů, která kombinuje větší počet modelů, čímž může dosáhnout lepší predikce. Dokáže tak ukázat vztahy mezi sledovanými proměnnými prostředí (průměrná výška porostu, její směrodatná odchylka a průměrná teplota) a sledovanými ptačími druhy. Celkem bylo analyzováno 104 druhů. Celková vysvětlená variabilita se pohybovala od 0 % do 40 %. Pro detailnější analýzu a zhodnocení vhodnosti dat GEDI pro modelování, bylo vybráno 20 druhů s vysvětlenou variabilitou vyšší než 20 %. Z toho dílčí variabilita vysvětlená průměrnou výškou vegetace byla 12-78 %, směrodatnou odchylkou výšky vegetace 3-57 %, a průměrnou teplotou 17-78 %. Celková vysvětlená variabilita z dat mise GEDI se pohybovala od 12 % do 24 %. Dílčí vysvětlená variabilita průměrné výšky porostu vysvětlila 7-69 %, směrodatná odchylka 3-39 % a průměrná teplota 23-86 %. Výsledky ukázaly důležitost vlivu struktury vegetace i průměrné teploty na ptačí druhy a poukázaly na vzniklé nesrovnalosti mezi výsledky z dat mise GEDI a dat z leteckého laserového skenování. Tímto poukázala na důležitost volby kvalitních dat pro podobné účely.

Klíčová slova: Struktura vegetace, ekologie ptáků, modelování distribuce druhů, dálkový průzkum Země, diverzita, LiDAR, GEDI

Abstract

The structure of vegetation is an important factor influencing bird occurrence. It provides shelter from predators, affects food availability, and is a crucial aspect during nesting. Species distribution modeling can be utilized to study the relationships between bird occurrence or diversity and vegetation structure. Species distribution models combine data of species occurrence or abundance with environmental data. This study analyses the importance of vegetation characteristics for birds occurring in the Czech Republic, by combining Line Transect Bird Surveys data (LSD), available at a resolution of 2.8 x 3 km, and vegetation height from two sources. Firstly, detailed airborne laser scanning data at a resolution of 2 meters and GEDI data at a resolution of 1 x 1 km. A partial goal of the study is to evaluate the usability of GEDI data for studying the relationships between bird occurrence and vegetation structure. Boosted Regression Trees (BRT) modeling technique was used for analysis, combining a larger number of models to achieve better predictions. This approach can demonstrate relationships between the observed environmental variables (average canopy height, its standard deviation, and average temperature) and monitored bird species. A total of 104 species were analysed. The overall explained variability ranged from 0 % to 40 %. For a more detailed analysis and evaluation of GEDI data suitability for modelling, 20 species with explained variability higher than 20 % were selected. Specifically, the partial variability explained by average vegetation height ranged from 12 % to 78 %, standard deviation of vegetation height from 3 % to 57 %, and average temperature from 17 % to 78 %. The overall explained variability from GEDI data ranged from 12 % to 24 %. The partial variability explained by average canopy height ranged from 7 % to 69 %, standard deviation from 3 % to 39 %, and average temperature from 23 % to 86 %. The results highlighted the importance of vegetation structure and average temperature on bird species and pointed out discrepancies between the results from GEDI mission data and airborne laser scanning data, emphasizing the importance of choosing high-quality data for similar purposes.

Keywords: Vegetation structure, bird ecology, species distribution modeling, remote sensing, diversity, LiDAR, GEDI

Obsah

1	Úvod a cíle.....	10
2	Literární rešerše.....	12
2.1	Stanoviště, struktura vegetace a její vliv na ptačí společenstva	12
2.2	Modelování distribuce druhů	13
2.3	Dálkový průzkum Země.....	15
2.3.1	LiDAR.....	16
2.3.2	Mise GEDI	17
3	Metodika	19
3.1	Charakteristika studovaného území	19
3.2	Liniové sčítání druhů.....	19
3.3	Enviromentální proměnné	20
3.3.1	Data leteckého laserového skenování	20
3.3.2	Satelitní data výšky vegetace	21
3.3.3	Data průměrné teploty	22
3.4	Zpracování a příprava dat.....	23
3.5	Analýzy	24
4	Výsledky	26
4.1	Srovnání dat LLS a GEDI	26
4.2	Vliv struktury vegetace z LLS na výskyt druhů.....	26
4.3	Vliv struktury vegetace z GEDI na výskyt druhů	27
4.4	Srovnání modelů z LLS a GEDI	27
5	Diskuze	33
5.1	Vliv struktury vegetace	33
5.2	Vliv průměrné teploty	34
5.3	Vliv hrubého měřítka	34
6	Závěr	36

7. Seznam použité literatury	37
8. Seznam obrázků a tabulek.....	41
9. Přílohy.....	43

1 Úvod a cíle

Biodiverzita je neoddelitelně spojena s přítomností vegetace a její strukturou, což se projevuje zejména v případě ptáků, jejichž výskyt a početnost na stanovišti silně závisí jak na struktuře, tak i skladbě vegetace (Hanzelka 2016). Složení a struktura vegetace, jsou pro ptáky důležitým faktorem při hledání potravy, úkrytu před predátory nebo i pro hnízdění (Coreau 2007, Dolman a Sutherland 1995). Obecně platí, že diverzita ptačích společenstev reaguje na ztrátu vegetace, například následkem odlesňování, změny využívání půdy a urbanizace (Kontsiotis et al. 2017, Dolman a Sutherland 1995). Nicméně citlivost na změny prostředí se u jednotlivých druhů liší. Například vliv změn prostředí je na generalisty menší než na specialisty kvůli jejich vysoké přizpůsobivosti (Coreau 2007, Howell et al. 2000, Reif et al. 2012).

Porozumět vztahu mezi společenstvy a vegetací je důležité pro účely ochrany ptačích druhů a udržení biodiverzity. Pro posouzení vlivu struktury vegetace na distribuci ptáků nabývá klíčový význam sběr kvalitních prostorových dat. Nicméně, sledování struktury vegetace v terénu může být náročné. Moderní metody dálkového průzkumu Země (DPZ) v současné době výrazně usnadňují měření struktury vegetace. Pro měření struktury se typicky využívá letecký LiDAR (Light Detection and Ranging). Odvozené charakteristiky struktury vegetace z LiDARu jsou pak běžně využívány pro modelování distribuce druhů (Bakx et al. 2019, Moudrý et al. 2021). Dále lze pro tyto účely využít data z mise satelitního laserového altimetru GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), který je umístěný na mezinárodní vesmírné stanici. Nicméně se jedná o poměrně nová data, která jsou zatím málo využívána a je třeba otestovat jejich vhodnost pro účely modelování druhové distribuce (Torresani et al. 2023).

Modely vhodnosti stanovišť, známé též jako modely distribuce druhů (SDM z anglického species distribution modelling), se staly užitečným nástrojem pro sledování vztahů mezi organismy a prostředím. Tyto modely odhalují vztahy mezi gradienty prostředí a distribucí rostlin a živočichů. Navíc je možné s jejich pomocí do jisté míry předpovídat další vývoj druhu na daném stanovišti, čímž přispívají k tvorbě ochranných opatření (Elith a Leathwick 2009, Miller 2010).

Před nasazením modelů druhové distribuce je nutné zvážit vhodnost dat pro účely studie, jelikož různé datové sady jsou rozdílné svým rozlišením a přesností.

Výběr vhodného rozlišení je komplexní rozhodnutí, které vyžaduje zohlednění specifických potřeb studie, technických možností a ekologických charakteristik sledovaného druhu (Šimova et al. 2018, Moudrý et al. 2023). Rozlišení enviromentálních dat se odvíjí od technologie sběru dat a jejich zpracování se může pohybovat v rozmezí od několika centimetrů až po stovky kilometrů. Stejně tak přesnost (kvalita) se může mezi různými datovými sadami výrazně lišit. Nedostatečná pozornost vůči kvalitě dat může vést ke špatným rozhodnutím v ochraně biodiverzity. Nekvalitní data mohou významně ovlivnit a zkreslit výsledky studií. Nedostatky dat mohou vést například k nesprávné identifikaci důležitých habitatů. Podobně nesprávné rozhodnutí ohledně použitého rozlišení může vést ke zkreslení výsledků a k nesprávným závěrům týkajících se vztahu mezi distribucí druhů a prostředím. V případě, že data nereflktují skutečné podmínky prostředí, mohou být odhaleny falešné závislosti mezi strukturou vegetace a distribucí ptáků.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat vliv struktury vegetace na distribuci ptáků v České republice v relativně hrubém měřítku (3 x 2,8 km) s využitím dvou rastrových souborů struktury vegetace různého rozlišení, a to data z leteckého laserového skenování s rozlišením 2 metry a data GEDI s rozlišením 1 x 1 km. Dílčím cílem je zhodnocení relativního vlivu struktury vegetace ve srovnání s průměrnou teplotou na distribuci ptačích druhů, a vyhodnotit využitelnost dat o struktuře vegetace z mise GEDI pro účely modelování vztahů mezi distribucí druhů a charakterem prostředí. Tímto může práce poukázat na důležitost kvalitního mapování struktury vegetace.

2 Literární rešerše

2.1 Stanoviště, struktura vegetace a její vliv na ptačí společenstva

Ekologie stanovišť se zabývá studiem interakcí mezi organismy a jejich prostředím v rámci konkrétního typu lokality nebo ekosystému. Stanoviště jsou neustále ovlivňována různými faktory, jako složení půdy, geologické podmínky, klima, srážky, nadmořská výška, reliéf krajiny a organismy, které se na stanovišti vyskytují. Tyto faktory společně neustále formují a ovlivňují výsledný vzhled a stav dané krajiny. Pochopení vztahu mezi biodiverzitou a prostředím začíná být stále více relevantní, protože činnosti lidské společnosti mají hlavně negativní vliv na životní prostředí, jako například znečištění, přispívání k degradaci biotopů a urychlování klimatických změn.

Procesu postupné změny ve složení a struktuře ekosystému na daném stanovišti v průběhu času se říká sukcese. Jedná se o zánik původního společenstva a nahrazení společenstvem novým, kdy konečným stádiem sukcese je tzv. klimax. Při dosažení klimaxu stanoviště dosáhne stabilní a rovnovážné fáze mezi různými druhy organismů a prostředím na určitém místě (Levin 2013). Ztráty přirozených, polopřirozených nebo i umělých stanovišť mohou vést k velkému poklesu biodiverzity, proto je heterogenita krajiny důležitá pro většinu druhů v krajině. Samotná heterogenita se odvíjí od různých enviromentálních vlivů jako například půdní typ, klimatické podmínky nebo obhospodařování (Šálek et al. 2021). Změny a ztráty stanovišť je třeba zkoumat a sledovat pro funkční management a ochranu přírody.

Druhová rozmanitost je měřitelná biologická vlastnost regionu nebo ekosystému, vyjádřena mírou rozmanitosti živých organismů (Zeng et al. 2012). Druhy na stanovištích jsou neustále ovlivňovány okolním prostředím a vnějšími vlivy, kupříkladu predací a konkurencí, na které následně reagují třeba migrací, adaptací nebo poklesem populace. Při zaměření na obratlovce, konkrétně na ptáky, můžeme pozorovat, že se jejich životy kompletně odvíjí od stavu prostředí, ve kterém žijí. Pro ptáky, jako součást ekosystému, je struktura vegetace jeden z největších vlivů ovlivňujících velikost ptačí populace na stanovišti. Mnoho studií dokázalo, že s hustší vegetací narůstá početnost ptačích druhů (Hanzelka 2016, Kontsiotis 2017). Různorodost vegetačních typů poskytuje specifické podmínky pro potřeby konkrétního druhu. Vegetace významně napomáhá ptákům v hledání potravy. Různé

druhy vegetace poskytují ptákům odlišné druhy potravy, od kterých se také odvíjí, jaká místa budou konkrétní druhy ptáků obývat a kde se naopak vyskytovat nebudou. Vegetace hraje důležitou roli jako úkrytu před predátory, slouží pro orientaci a odpočinek při migraci a je důležitá pro hnízdění (Coreau 2007, Dolman a Sutherland 1995). Například lesní ptáci jsou přizpůsobeni hnízdění vysoko na stromech, zatímco stepní druhy využívají nízkou vegetaci polí a trav nebo křoviny (Dolman a Sutherland 1995). Ztráta vegetace má na distribuci ptáků negativní vliv. Přičemž velký podíl na úbytku vegetace má rostoucí lidská aktivita, odlesňování, invazivní druhy, znečišťování, klimatické změny a změny využívání půdy, které vedou ke ztrátě a změně přirozených habitatů. Změnou či ztrátou vegetace zanikají ptákům vhodné podmínky pro rozvoj populace a vzniká nutnost adaptace na nové podmínky. Negativní vliv může mít i na migrující populace, protože různé vegetační útvary mohou sloužit jako orientační body při migraci a jejich změna může ovlivnit úspěšnost migrace (Dolman a Sutherland 1995).

2.2 Modelování distribuce druhů

Modelování distribuce druhů představuje nástroj pro studium vztahů mezi organismy a jejich prostředím. Tato metoda se zaměřuje na analýzu vztahů mezi druhy a enviromentálními charakteristikami prostředí, jako jsou změny dostupnosti zdrojů a struktura vegetace. SDM jsou základními nástroji managementu ochrany biodiverzity (Guisan et al. 2007). Modelování distribuce druhů představuje významný nástroj, který nás nejenom informuje o současném výskytu organismů v krajině, ale také nám umožňuje předpovídat jejich budoucí vývoj na konkrétních lokalitách (Miller 2010). Tato metoda není omezena pouze na distribuci druhů, ale lze ji aplikovat i na jiné taxonomické skupiny a ekosystémy (Svenning et al. 2011). Cílem je porozumět, jak faktory prostředí ovlivňují výskyt druhů a jakým způsobem se tyto druhy adaptují na změny podmínek na stanovišti.

Rozšiřování druhů v krajině je procesem, který není statický, ale spíše dynamický a podléhá stálým proměnám v čase. Důvody těchto proměn mohou být rozmanité. Zahrnují faktory jako klimatické změny, přítomnost nových druhů konkurenčních organismů, změny v dostupnosti potravy, či dokonce antropogenní vlivy, jako jsou zásahy do krajiny, urbanizace nebo zavádění nových druhů invazivních rostlin. Přesné predikce vývoje rozšíření druhů vyžadují nejen aktuální

znalosti o současném stavu prostředí a výskytu druhů, ale také schopnost modelů přizpůsobit se neustále se měnícím podmínkám (Elith a Leathwick 2009).

Rozmanitost druhů v ekosystémech a jejich specifické biologické charakteristiky vyžadují od modelů přístupy a metody, které jsou přizpůsobeny konkrétním potřebám a chování sledovaných organismů. Druhy mořské, suchozemské nebo sladkovodní mohou vyžadovat odlišné modely vzhledem k rozdílům v mobilitě druhů a velikosti domovských oblastí (Elith a Leathwick 2009). Selektce vhodné metody modelování distribuce druhů závisí nejen na účelu studie, ale také na konkrétním sledovaném druhu. Přisedlé, nemobilní druhy jsou mnohem lépe pozorovatelné než druhy pohyblivé, jako například ptáci. Ptáci cestují za potřebnými zdroji a jejich výskyt v krajině se neustále mění vlivem různých faktorů jako jsou probíhající změny v krajině, výskyt zdrojů, možnosti přístupu ke zdrojům anebo konkurence. Pro druhy s menšími domovskými okrsky, tedy druhy s menším pohybem napříč krajinou, se využívají stejné technologie jako pro druhy přisedlé a jejich modelování je tudíž jednodušší než pro druhy s většími domovskými okrsky. Pro druhy s vyšší frekvencí pohybu se využívají metody zahrnující pohyb živočichů, dostupnost a využití zdrojů, jako RSF (Resource Selection Function), což je nástroj využívaný k modelování preferencí a výběru zdrojů v prostředí, anebo metody podobné (Elith a Leathwick 2009).

Rozlišení představuje klíčový aspekt výběru metody při modelování distribuce druhů, a to z několika důvodů. Jedná se o jednu z rozhodujících proměnných, která ovlivňuje kvalitu výsledků studie a schopnost modelů zachytit různé aspekty prostředí. Důležitým faktorem při výběru správné úrovně rozlišení je především účel dané studie, dostupnost relevantních dat a velikost domovských okrsků sledovaného druhu. Práce ve špatném měřítku může být neefektivní (Guisan et al. 2007). Pro globální analýzy distribuce druhů, kde je zájem o širší pohled na výskyt po celém světě, se často preferují globální nebo kontinentální měřítko. Ty umožňují zachytit obecné trendy a rozsáhlé geografické vzory (Elith a Leathwick 2009). Nevhodným výběrem rozlišení může docházet chybám, jako chybné geografické zaznamenání výskytu druhu, čímž model ukáže výskyt druhu v nevhodném habitatu a může tak dát nepravdivé informace o potřebách druhu, což může vést k nevhodně zvoleným opatřením k jeho ochraně (Guisan et al. 2007).

Způsob využití modelování silně závisí na zaměření práce. Primární způsob využití byl pro distribuci druhů v krajině a pro vývoj druhů. Zlepšením technologií se ale nyní modelování distribuce druhů využívá i pro sledování budoucího vývoje distribuce druhů. Dalšími způsoby využití je kupříkladu plánování ochrany, ke zkoumání evolučních procesů, k vyhledávání vhodných oblastí pro reintrodukci druhů nebo pro detekci vzácných druhů (Miller 2010). Přesnost predikce a výskytu druhů se zřetelně odvíjí od kvality a množství použitých dat, správném výběru modelů a porozumění biologickým a ekologickým procesům, které ovlivňují rozšíření organismů v daném prostoru. Využití nekvalitních dat nebo nevhodných modelů může vést k nejednoznačným výsledkům a nesprávným závěrům (Elith a Leathwick 2009).

2.3 Dálkový průzkum Země

Sledování změn struktury vegetace v terénu může být poměrně složité a časově náročné. Vhodnou alternativou k terénním průzkumům je dálkový průzkum Země (DPZ). DPZ zahrnuje metody, které měří bez přímého kontaktu s objektem a využívají k měření elektromagnetické záření, absorbované, propouštěné nebo odrážené od objektů na zemském povrchu. Typ použitého světla závisí na konkrétním využití a typu použitého senzoru (Lillesand et al. 2015).

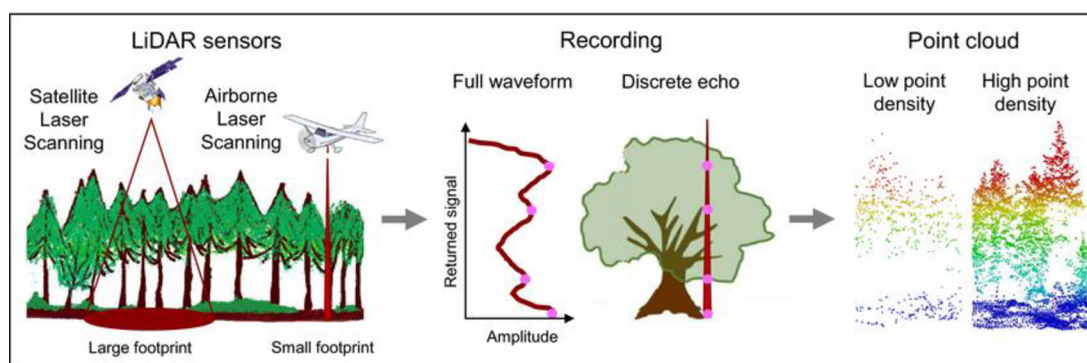
Technologie DPZ zahrnuje spoustu typů metod. Mezi hlavní typy senzorů patří multispektrální, hyperspektrální, radar a LiDAR. Senzory lze umístit na satelity, letadla, drony. Satelitní dálkový průzkum Země zahrnuje použití senzorů na satelitech, které obíhají kolem Země a zachycují snímky v globálních měřítkách. Letecké skenování zahrnuje senzory na letadlech a dronech s vyšším prostorovým rozlišením než satelitní, na druhou stranu zvládne snímat menší lokalitu. Multispektrální a hyperspektrální senzory jsou řazeny mezi pasivní senzory. To znamená, že využívají záření ze slunce, které se odráží od objektů. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v počtu a šířce spektrálních pásem, kdy hyperspektrální data nabízejí mnohem jemnější a komplexnější spektrální rozlišení, což umožňuje přesnější rozlišení mezi různými povrchovými vlastnostmi. Hyperspektrální senzory zachycují data ve stovkách až tisících spektrálních pásmech. Jsou vhodná například pro identifikaci druhů vegetace, monitorování životního prostředí, identifikaci ložisek nerostů a pro potřeby lesnictví. Multispektrální data poskytují širší a méně podrobné spektrální informace. Počty pásem multispektrálních dat se pohybují v jednotkách. Multispektrální data se využívají například pro klasifikaci typu krajinného pokryvu a sledování stavu

vegetace. Radar a LiDAR patří mezi senzory aktivní, které využívají vlastní zdroj elektromagnetických vln. Radarové senzory využívají mikrovlnné záření a lze je využít ke snímání bez ohledu na denní dobu a povětrnostní podmínky. LiDAR je technologie využívající laserového světla (Lillesand et al. 2015).

Technologie dálkového průzkumu Země se stále zdokonalují díky neustálému vývoji nových senzorů. Informace získané z DPZ jako krajinný pokryv, hustota vegetace, teplota nebo obsah vlhkosti, mohou být využity ke studiu a sledování změn životního prostředí v čase a napomocť k tvorbě postupů pro ochranu přírody například ve formě modelování distribuce druhů (He et al. 2015).

2.3.1 LiDAR

Technologie LiDAR představuje aktivní senzor, který využívá laserového světla pro měření vzdálenosti objektů a vertikálního rozložení povrchu. LiDAR vytváří trojrozměrnou strukturu povrchu, která poskytuje detailní pohled na topografii a vertikální vrstvy vegetace. Senzor LiDAR vysílá laserové paprsky, které se odrážejí od objektů a následně se vrací zpět do senzoru. Z časového intervalu, kdy světlo cestuje zpět do senzoru, se vypočítává vzdálenost objektu od senzoru. Kvůli mezerám ve vegetaci, dokáže infračervené světlo LiDARu pronikat zčásti i skrz vegetaci a tím snímat i nižší patro vegetace a terén. Tímto způsobem se vytvářejí bodová mračka a trojrozměrný obraz prostředí (Bakx et al. 2019, Davies a Asner 2014).



Obr. 1: Vznik bodových mraček (Bakx et al. 2019)

Existují různé typy LiDARových systémů, z nichž každý má specifické vlastnosti a výhody. Z hlediska umístění senzoru lze rozlišit tři hlavní typy: Letecký, pozemní a satelitní LiDAR. U leteckého LiDARu je senzor připevněn k letadlu, vysílá paprsky směrem k zemi a umožňuje snímání rozsáhlých oblastí z výšky. Jeho hlavní výhodou je schopnost pokrýt velké plochy s vysokým rozlišením. Nevýhodou je nákladnější a komplexnější realizace snímání. Letecký LiDAR je nejhojněji využívaným, kvůli schopnosti pokrýt velké oblasti, například celé státy (Bakx et al.

2019). Pozemní LiDAR je připevněný k vozidlům nebo stativům a snímá prostor z nižší úrovně, například spodní patro vegetace, lesů nebo je využíván i pro snímání měst. Dokáže snímat specifické oblasti a objekty ve větším detailu. Jeho hlavní nevýhodou je nižší rychlost snímání a omezený dosah ve srovnání s leteckým LiDARem. Satelitní LiDAR je senzor připevněný k satelitu. Dokáže pravidelně monitorovat rozsáhlé oblasti a začíná se uplatňovat pro sledování globálních změn. Hlavní nevýhodou je nízké rozlišení snímků. V některých případech lze LiDARové systémy kombinovat. Například kombinací leteckého a pozemního LiDARu lze získat komplexní obrazu prostředí. Ke kombinacím dochází například z důvodu neúplné propustnosti vegetace, kdy letecký LiDAR nedosáhne na nejnižší patro vegetace, proto se nejnižší patro snímá s využitím pozemního LiDARu (Chasmer 2006). Nicméně kombinované systémy mají omezení ve formě zvýšených nákladů a složitější správy dat.

LiDAR nachází široké uplatnění v oblasti ekologie, zejména v lesnictví (3D struktura lesa, ekologické aplikace, aplikace pro ochranu biologické rozmanitosti nebo pro plány ochrany přírody). Pro sledování dalších jevů v oblasti ekologie, jako je sledování diverzity a distribuce druhů, pro informace o přítomnosti druhů v krajině, velikosti populace, bohatosti biodiverzity napříč prostorem a časem a jiné studované hodnoty se využívá Modelování distribuce druhů (Bakx et al. 2019, Davies a Asner 2014, Wang a Glenn 2008). Pro tvorbu modelů druhové distribuce je klíčová kvalita vstupních bodových mračen i odvozených charakteristik. Použitím prediktorů s hrubším rozlišení může dojít k nesprávné interpretaci výsledků. Rozlišení dat se odvíjí od vzdálenosti snímače od objektu. Čím je objekt blíže, tím vzniká větší hustota bodových mračen a vyšší rozlišení dat, ale zároveň je snímána menší plocha. Rozlišení představuje klíčový parametr ovlivňující detail a přesnost prostorových dat. Od kvality snímků se odvíjí, jak dobře bude možné reprezentovat povrch terénu, strukturu vegetace a další prvky. Vyšší rozlišení dokáže detekovat malé objekty, jako jsou jednotlivé stromy, keře nebo další vegetační prvky, které ovlivňují výskyt druhů (Davies a Asner 2014).

2.3.2 Mise GEDI

GEDI je mise využívající aktivní laserový altimetr ke snímání trojrozměrné struktury zemské vegetace. Primárním cílem je zlepšit chápání probíhajících změn ekosystémů zobrazením struktury a hustoty vegetace lesních ekosystémů. Data GEDI

mají široké využití. Využívají se například ke studiu dopadů změny klimatu, mohou být využita například pro sledování změn ekosystémů a změn v životním prostředí, modelování biodiverzity a biotopů, sledování změn v lesích, jako je odlesňování, obnova lesů, hospodaření s lesy (Kumari a Shashi 2023, Gupta a Shrma 2022, Oliveira et al. 2023). Data jsou navíc komplementární k datům pasivního DPZ a dají se s nimi vhodně kombinovat, čímž mohou přispět k lepšímu pochopení dynamiky ekosystémů (Tamiminia et al. 2024).

Mise GEDI vznikla kooperací NASA (The National Aeronautics and Space), Marylandské univerzity, a Německého střediska pro letectví a kosmonautiku. Primárním tvůrcem je agentura NASA, která dohlíží na plánování, vývoj a provoz programu. Marylandská univerzita se podílí na vývoji algoritmů a zpracování dat. Německé středisko pro letectví a kosmonautiku pracuje na rozvoji technologie a aplikací satelitního LiDARu pro výzkum ekosystémů (Dubayah et al. 2020). Technologie využívá vícepaprskový laserový výškoměr k měření vertikální struktury tropických a mírných lesů. Systém se skládá ze tří laserů, které nepřetržitě snímají rychlostí 242 pulsů za sekundu. Velikost stopy je 25 metrů, na poměrně rovných místech, kde není moc hustá vegetace, může dosahovat vertikální přesnosti až 3 cm, a horizontální přesnosti 10 m. Světlo ze senzorů se odráží od vegetace a terénu zpět, díky čemuž je možné vytvořit obraz struktury vegetace. Tímto způsobem dokáže technologie rovnoměrně pokrýt celou Zemi v rozpětí dvou let (Dubayah et al. 2020).

Z projektu vznikají různé úrovně produktů, jako jsou 0B, 1B, 2A, 3A, 4A a 4B. Úroveň 0B jsou nezpracovaná telemetrická data, která nejsou publikovaná. Data 1B obsahují polohově umístěné průběhy odraženého záření. Úroveň 2A obsahuje odvozené metriky o nadmořské výšce terénu a struktuře vegetace pro jednotlivá měření a jsou od ní odvozeny i následující úrovně 3A, 4A a 4B. Produkt 3A obsahuje variabilitu výšky vegetace v mřížce 1x1 km. Úroveň 4A jsou data s odhadem hustoty nadzemní biomasy v jednotlivých měřeních a je od nich odvozena úroveň 4B, která obsahuje odhad biomasy v rozlišení 1x1 km. Data jsou dostupná z různých archivů, jako LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), kde se vyskytují produkty úrovně 1B a 2B, ORNL DAAC (Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center) pro produkty 3A, 4A a 4B a v poslední řadě MOC (Mission Operations Center), kde jsou data úrovně 0B.

3. Metodika

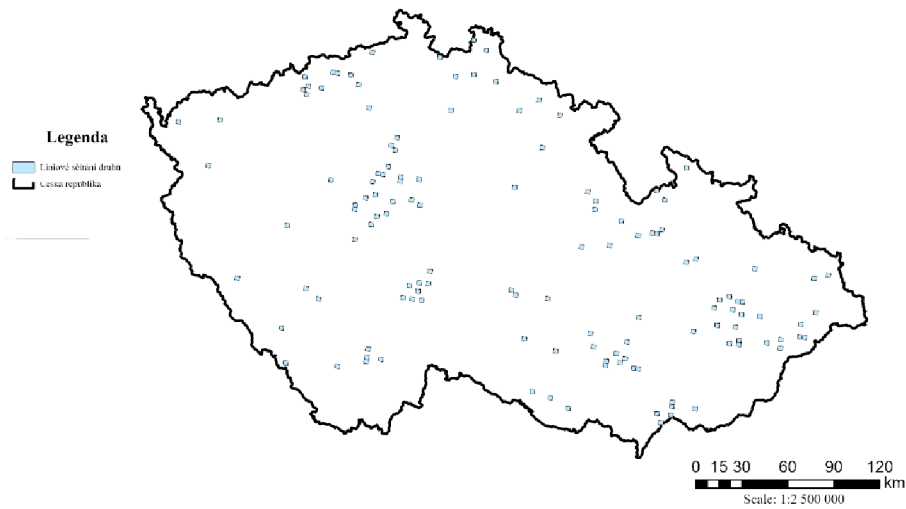
3.1 Charakteristika studovaného území

Studované území obsahuje celou rozlohu České republiky, což znamená, že se tato práce zaměřuje na geograficky pestrý region s bohatou paletou různorodých biotopů. Geografické charakteristiky tohoto území zahrnují pohoří, hory, nížiny nebo říční údolí, vytvářející tak širokou škálu podmínek pro studium vztahu mezi strukturou vegetace a distribucí ptáků. Tato diverzita geografických prvků poskytuje ideální prostředí pro zkoumání, jak se ptáci přizpůsobují různým podmínkám a jaké preference pro různé typy vegetace projevují. Ve vysoce reliéfním prostředí pohoří a hor mohou ptáci reagovat na změny nadmořské výšky a strukturu terénu. Naopak nížiny nabízejí odlišné podmínky pro hnízdění a potravu, zatímco říční údolí slouží jako důležitý prvek pro migraci a hledání potravy.

3.2 Liniové sčítání druhů

Liniové sčítání druhů (LSD) je monitorovací program České společnosti ornitologické ve spolupráci s ornitology, kteří dobrovolně přispívají k sběru terénních dat prostřednictvím zaznamenávání sledovaných ptáků do chytrých zařízení, jako jsou telefony nebo tablety. Cílem LSD je sledovat změny v ptačích společenstvech, odhadovat velikosti populací a zkoumat vztahy mezi ptáky a různými typy prostředí (Česká společnost ornitologická 2018). Sčítání druhů probíhá v zimním a hnízdícím období. V období hnízdění se provádí sčítání dvakrát časovém rozmezí od dubna do června, zatímco v zimním období se sčítá třikrát v období od konce listopadu do začátku března. Sběr dat probíhá na předem určených plochách o velikosti přibližně 3 x 2,8 km a trvá jednu hodinu. V rámci sledované oblasti jsou vytvořeny dvě co nejvíce rovné kilometrové linie, podél kterých jsou pozorovány ptačí druhy a zaznamenávány do databáze. Aby byly zajištěny přesné výsledky a minimalizováno opakované zaznamenání stejných ptáků, linie jsou umístěny ve vzájemné vzdálenosti větší než 500 m a minimálně 250 m od okraje sledovaného čtverce. Ornitologové během hodinového intervalu postupují linií od začátku do konce pomalým tempem, pečlivě zaznamenávají všechny druhy ptáků, které se v daném místě vyskytnou, včetně informací o jejich přesné poloze a chování. Tato metodika umožňuje detailní přístup

k monitorování ptáků a poskytuje cenná data pro výzkum ptačích populací a jejich interakcí s prostředím. Data LSD využitá pro tuto práci byla sbírána v letech 2018-2021 v 4., 5. a 6. měsíci.

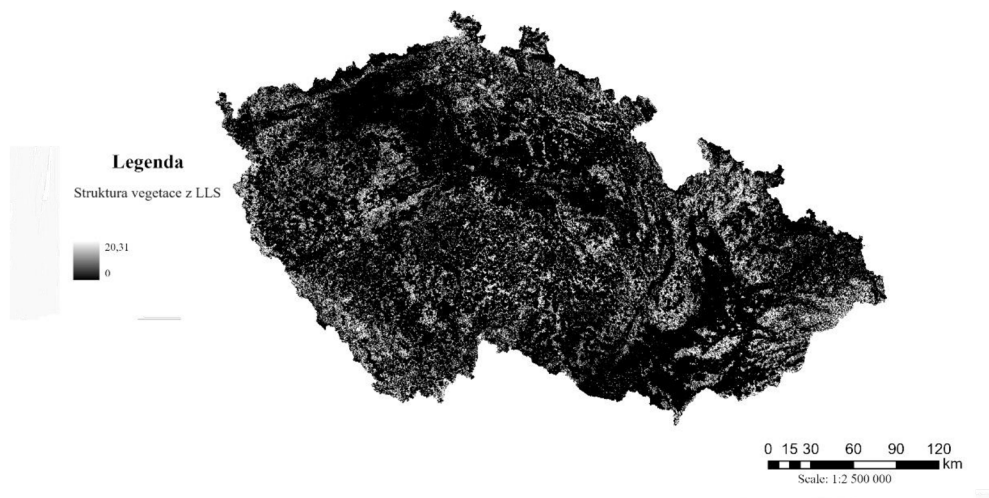


Obr. 2: Sledované plochy LSD

3.3 Enviromentální proměnné

3.3.1 Data leteckého laserového skenování

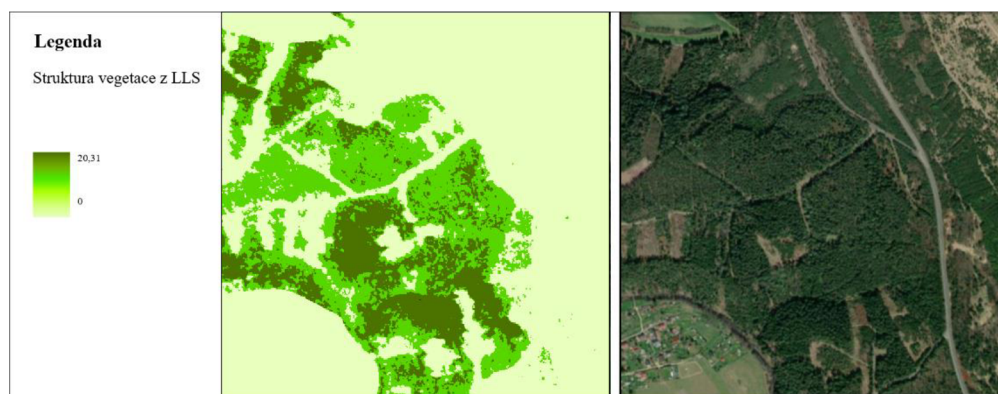
Data výšky lesních porostů ČR byla získána odečtením dvou rastrů, které vznikly leteckým laserovým skenováním v letech 2009-2013, a sice odečtením digitálního modelu reliéfu (DMR5G) od digitálního modelu povrchu (DMP1G). Rastr má rozlišení 2 metry a obsahuje výšky porostů zaznamenané v centimetrech v oblastech, kde se nachází lesy. Celá Česká republika byla postupně ve třech částech pokryta tímto leteckým skenováním od východu k západu, a jednotlivé části byly snímány v průběhu let 2009-2013 (Brázdil et al. 2012).



Obr. 3: Struktura vegetace z leteckého laserového skenování v metrech



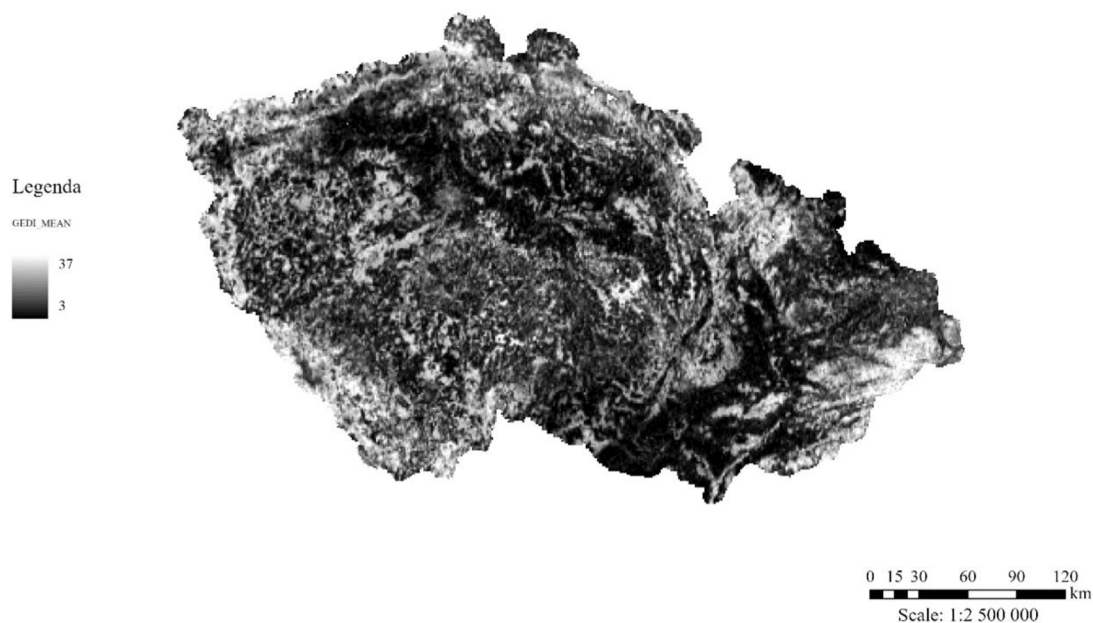
Obr. 4: Rozdělení ČR do jednotlivých pásem (oblastí) dle období sběru dat, ve kterých probíhalo letecké laserové skenování (ČÚZK)



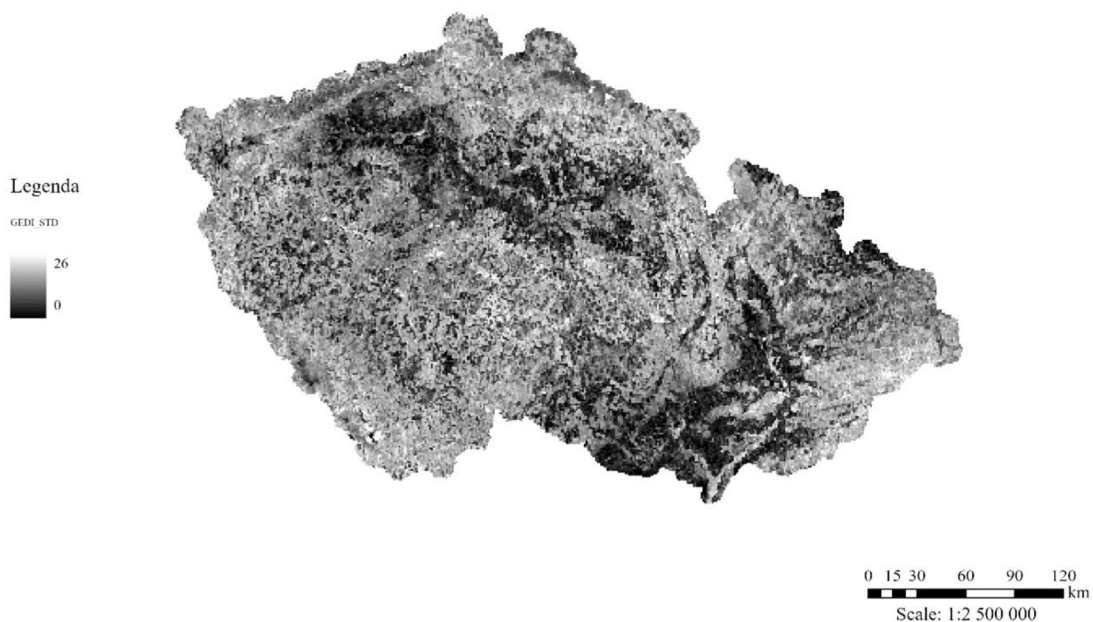
Obr. 5: Zobrazení lesů z dat LLS (vlevo) ve srovnání s ortofoto (vpravo) ve čtverci 1 x 1 km

3.3.2 Satelitní data výšky vegetace

GEDI data výšky vegetace (GEDI L3 Gridded Land Surface Metrics, Version 2) z let 2019 až 2023, pochází ze satelitního snímání s rozlišením buněk 1 x 1 km. Jedná se o produkt projektu GEDI úrovně 3A. Data zahrnují průměrnou výšku a směrodatnou odchylku výšky vegetace mírných a tropických lesů v metrech. Vrstva vznikla měřením mezi -51.6° a 51.6° zeměpisné šířky a byla odvozena od dat úrovně 2A. Pro tuto práci byla využita pouze část rastru, přesněji oblast České republiky a rastr byl převeden z původního souřadnicového systému WGS84 do S-JTSK.



Obr. 6: Průměrná výška vegetace v ČR z dat L3A mise GEDI v metrech



Obr. 7: Směrodatná odchylka průměrné výšky vegetace v ČR z dat L3A mise GEDI v metrech

3.3.3 Data průměrné teploty

Pro výpočet průměrné teploty sledovaných oblastí byla použita data, která jsou volně dostupná z portálu WorldClim Version 2. Jedná se o data, která jsou poskytována pro účely ekologie a geografických informačních systémů. Kromě průměrné teploty (bio1) se na stránkách nachází data minimální teploty, maximální teploty, průměrných srážek, slunečního záření, rychlosti větru a tlaku vodní páry (Fick a Hijmans 2017). Pro tuto práci byla vybrána průměrná teplota, protože silně ovlivňuje životy ptáků, například při hnízdění (Kuile et al. 2023, Tzschentke a Basta 2002).

3.4 Zpracování a příprava dat

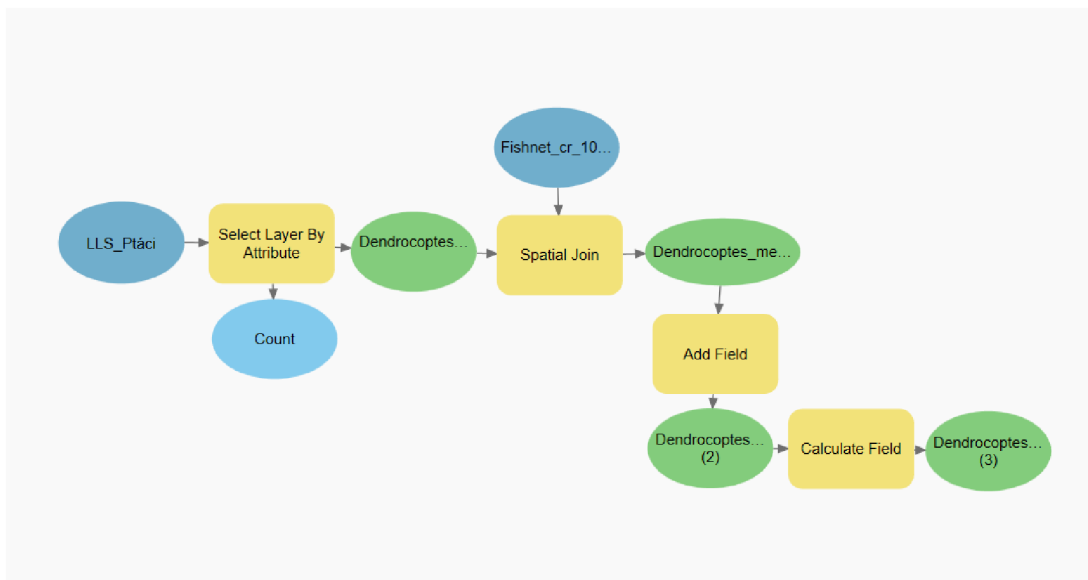
Výpočet průměrné výšky a směrodatné odchylky pro oba rastry a následné propojení rastrů s LSD byl využit ArcGIS Pro 3.1.3, úprava tabulek byla provedena v programu Microsoft Excel. Před začátkem analýz bylo třeba rastry upravit. V prvním kroku úpravy byl rastr GEDI oříznut na rozsah České republiky pomocí nástroje Clip Raster. Dalším krokem úpravy bylo sjednocení souřadnicových systémů rastrů do Systému jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK). Data výšky a směrodatné odchylky vegetace z mise GEDI jsou dostupná v souřadnicovém systému WGS84, zatímco výška vegetace z LLS je v souřadnicovém systému S-JTSK. Projekce z WGS84 do S-JTSK byla provedena v ArcGIS Pro pomocí nástroje Project Raster.

V průběhu práce s leteckými daty výšky lesů České republiky byly objeveny oblasti s chybějícími hodnotami. Chybějící data byla reprezentována číslem 65535 (NoData) a aby bylo možné s rastrem dále pracovat, bylo nutné provést opravu těchto oblastí. Oprava proběhla s využitím nástroje Reclassify. Nástroj umožnil přeorganizovat hodnoty rastru, přičemž byla chybějící data (65535) nastavena na hodnotu -9999, což je hodnota obvyklá například pro ArcGIS. Upravený rastr mohl být následně použit k dalším krokům.

Propojení databáze ptáků a obou rastrů proběhlo pomocí sítě vytvořené nástrojem Create Fishnet. Síť byla vytvořena v rozsahu ČR, s velikostí buněk 3 x 2,8 km. V jednotlivých buňkách sítě byly vypočítány hodnoty průměrné výšky vegetace (dále v textu označováno jako LLS_Mean), její směrodatné odchylky (dále v textu označováno jako LLS_STD) a průměrné teploty pomocí (bio1) Zonal Statistics as Table pro výšku vegetace z dat leteckého laserového skenování. Stejným způsobem bylo postupováno v případě charakteristik vegetace z dat GEDI, s tím rozdílem, že pro výšku vegetace (dále v textu označováno jako GEDI_Mean) byl využit rastr průměrné výšky vegetace a pro směrodatnou odchylku (dále v textu označováno jako GEDI_STD) rastr směrodatné odchylky vegetace.

Databáze Liniového sčítání druhů a síť byla propojena pomocí zaznamenání výskytu ptáků v jednotlivých čtvercích 3 x 2,8 km. Byly vybrány pouze ty čtverce, kde probíhalo LSD. V attributech vzniklé vrstvy byla uvedena informace, zda se v buňce jednotlivý druh vyskytuje (1) nebo nevyskytuje (0). Toho bylo dosaženo tvorbou modelu v nástroji ModelBuilder, který slouží pro automatické použití funkcí, operací,

podle vytvořeného modelu. Uživatel tedy nemusí větší počet akcí provádět ručně, ale stačí je jednou využít při tvorbě modelu a po vytvoření modelu se budou kroky opakovat pouhým spuštěním modelu. V ModelBuilderu byl postup zopakován pro každý druh ptáka (Obr. 8). V prvním kroku v nástroji ModelBuilder se z databáze pomocí Select Layer By Attribute vybral daný druh ptáka, následně se vrstva spojila se sítí pomocí Spatial Join. Ve vzešlé vrstvě byl vytvořen nový sloupec atributové tabulky s názvem druhu ptáka a v každém řádku nově vytvořeného sloupce bylo zapsáno, zda se vybraný pták v buňce vyskytuje anebo nevyskytuje, pomocí Calculate Field. Vytvořené tabulky byly propojeny s příslušnou sítí, pomocí nástroje Add Join. Tabulky a síť byly propojeny přes individuální ID. Ze vzešlých vrstev byly exportovány tabulky ve formátu .csv, které byly upraveny v programu Microsoft Excel, aby mohly být dále využity pro tvorbu modelů.



Obr. 8: Model vytvořený pomocí funkce ModelBuilder v ArcGIS Pro

3.5 Analýzy

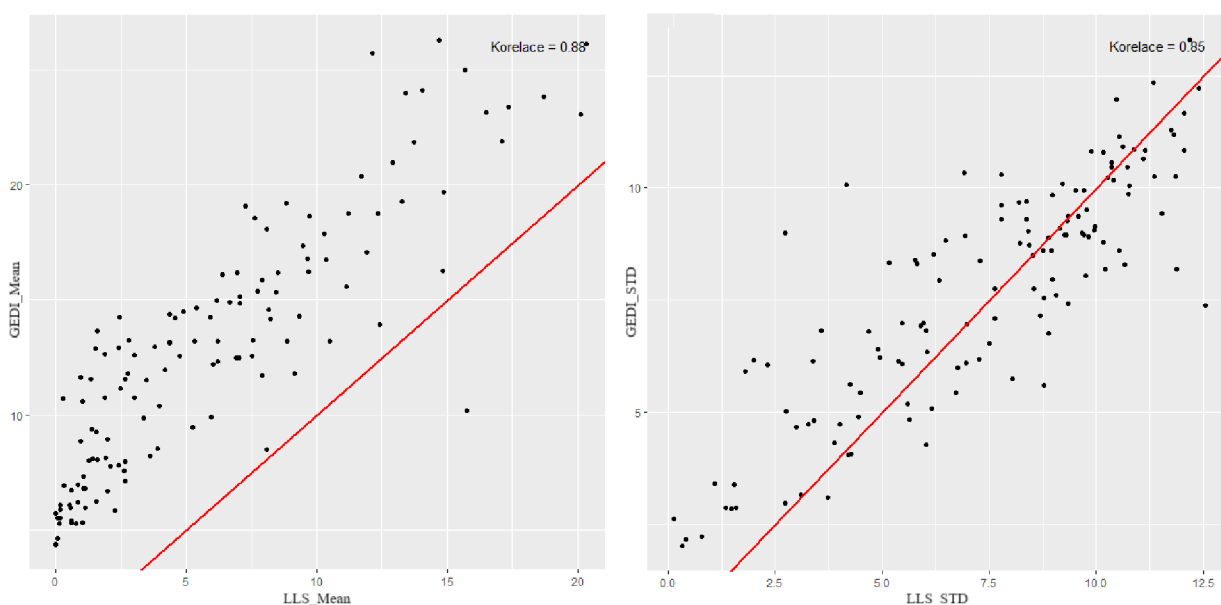
Dalším krokem bylo otestování shody mezi daty LLS a GEDI v prostředí R, pomocí korelačních koeficientů mezi GEDI_Mean s LLS_Mean a GEDI_STD s LLS_STD (Tab.1). Vzešlá data byla zpracována s využitím BRT (Boosted Regression Trees). BRT jsou technikou tvorby modelů, která se odlišuje od ostatních technik tím, že místo využití jednoho nejlepšího modelu, kombinuje větší počet jednoduchých modelů, což vede k větší prediktivní schopnosti a poskytuje detailnější pohled na vztahy mezi proměnnými. BRT využívá regresní a rozhodovací stromy k rozdělení prostor na obdélníky podle odezvy na proměnné (Elith et. al 2008).

BRT bylo využito k zobrazení vztahů mezi proměnnými prostředí a výskytem ptačích druhů na sledovaných lokalitách. Metoda je dostupná v programu R v balíku gbm. Model byl vytvořen pro vypočítání závislosti druhu na sledovaných proměnných a grafické zobrazení tohoto vztahu. Jako nezávislé proměnné, které byly použity pro predikci, byly použity průměrná výška vegetace, její směrodatná odchylka a průměrná teplota. Jako závislá proměnná byla nastavena prezence, respektive absence, konkrétního druhu ptáka. Pro parametr „family“ byl zvolen typ „Bernoulli“, maximální počet stromů byl nastaven na 10 000, parametr „tree.complexity“ na 1, „learning.rate“ na 0,005 a „bag.fraction“ na 0,5. Následně se ze všech výsledků vypočítala vysvětlená variabilita, pomocí „mean residual deviance“, což je hodnota, která měří míru nepřesnosti modelu, čím je hodnota nižší, tím lépe model přizpůsobuje data, a „estimated cv deviance“, což je hodnota, která poskytuje odhad chyby modelu. Vysvětlené variability se dosáhlo tímto způsobem: $(\text{mean total deviance} - \text{estimated cv deviance}) / \text{mean total deviance}$. Z původních sto čtyři druhů ptáků bylo vybráno dvacet druhů, pro které byla vysvětlená variabilita BRT modelů nejvyšší. Byly to druhy, pro které vycházela na dvacet procent a více (Tab. 2). Pro tyto vybrané druhy byly vytvořeny grafy závislosti druhů na průměrné výšce vegetace, její směrodatné odchylce a průměrné teplotě na zkoumaných lokalitách. Dále byla otestována multikolinearita mezi proměnnými testována, a to pomocí funkce VIF, která je dostupná v prostředí R v balíčku „car“. Multikolinearita byla testována pro dvacet vybraných druhů se zahrnutím proměnných z LLS (LLS_Mean a LLS_STD) a GEDI (GEDI_Mean a GEDI_STD). Pokud se VIF rovná 1, proměnné nejsou korelované a lze je do modelu použít. Pokud se pohybují od 1-5, proměnné jsou lehce korelované, pokud jsou nad 5, jedná se o silnou korelaci a takové proměnné by měly být z modelu odstraněny.

4. Výsledky

4.1 Srovnání dat LLS a GEDI

Při srovnání proměnných z LLS a dat GEDI (LLS_Mean s GEDI_Mean a LLS_STD s GEDI_STD) zjistíme, že mezi proměnnými dochází k silné pozitivní korelaci (Tab. 1). Vysoká korelace mezi LLS_Mean a GEDI_Mean (0,88), a také mezi LLS_STD a GEDI_STD (0,85) (Obr. 9), naznačuje, že výsledky jednotlivých proměnných mají podobné vzory ve výšce vegetace a její variabilitě. Nicméně, korelace samotná neříká nic o přesnosti měření. Měření mohou být vzájemně korelována, ale mohou být přesto nepřesná vzhledem k referenčním hodnotám. Podle Obr. 9 je patrné, že data GEDI nadhodnocují výšku vegetace.



Obr. 9: Korelace mezi proměnnými LLS a dat GEDI, a to průměrnými výškami vegetace (mezi LLS_Mean a GEDI_Mean) a směrodatnými odchylkami vegetace (mezi LLS_STD a GEDI_STD). Červená linie zobrazuje funkci $y=x$

	GEDI_Mean	GEDI_STD
LLS_Mean	0,88	0,68
LLS_STD	0,76	0,85

Tab. 1: Korelační koeficienty struktury vegetace leteckého laserového skenování (LLS_Mean, LLS_STD) a struktury vegetace dat GEDI (GEDI_Mean, GEDI_STD)

4.2 Vliv struktury vegetace z LLS na výskyt druhů

Celkem bylo analyzováno sto čtyři druhů, z toho dvacet druhů mělo vysvětlenou variabilitu alespoň 20 %. Podíl struktury vegetace na vysvětlené variabilitě těchto druhů se pohyboval 10-78 % v případě výšky vegetace, 7-78 % v případě průměrné teploty. Oproti tomu směrodatná odchylka vysvětlila jen 3-57 %

(Tab. 2). Například pravděpodobnost výskytu straky obecné (*Pica pica*) klesá s rostoucí průměrnou výškou vegetace (Obr. 10). Stejně je na tom například i hrdlička zahradní (*Streptopelia decaocto*) (Obr. 11). V obou případech dochází k poklesu pravděpodobnosti výskytu pro průměrnou výšku vegetace v rozsahu 5-12 m. Křivka obecná (*Loxia curvirostra*) a Sýkora úhelniček (*Periparus ater*) jsou naopak nejvíce ovlivněni vyšší směrodatnou odchylkou výšky porostu. Pravděpodobnost jejich výskytu tedy roste s vyšší variabilitou výšky porostu (Obr. 12, obr. 13). Multikolinearita pomocí funkce VIF u devatenácti druhů vyšla mezi 2,1-4,2. Pouze u jednoho druhu (strakapoud jižní) byly hodnoty lehce nad 5, ale i tak byly obě proměnné v modelu ponechány.

4.3 Vliv struktury vegetace z GEDI na výskyt druhů

Pro data z mise GEDI byla analyzována stejná skupina dvaceti druhů ptáků, jako pro LLS. Pět druhů nesplňovalo vysvětlenou variabilitu 20 %, a to kachna divoká (*Anas platyrhynchos*), straka obecná, žluna zelená (*Picus viridis*), hrdlička zahradní a drozd brávník (*Turdus viscivorus*). Drozd brávník a žluna zelená se hranici dvaceti procent blížili, ale ostatní zmíněné druhy se pohybovaly od 12-15 %. Vysvětlená variabilita výšky vegetace se pohybovala 7-69 %, průměrná teplota v rozmezí 23-86 % a směrodatná odchylka jen 3-39 % (Tab. 3).

4.4 Srovnání modelů z LLS a GEDI

U pár druhů ptáků došlo ke změně důležitosti proměnných. V případě strakapouda jižního (*Dendrocopos syriacus*) výsledky z LLS ukazovaly minimální důležitost variability výšky porostu, lehce vyšší důležitost dílčí variability průměrné výšky vegetace a nejvyšší důležitost variability průměrné teploty. Podle dat GEDI se důležitost variability průměrné výšky vegetace se směrodatnou odchylkou liší (Obr. 14). Obě sledované veličiny ukazují podobnou důležitost okolo 20 %. U strakapouda prostředního (*Dendrocoptes martius*) došlo opět ke změně důležitosti variability průměrné výšky porostu a variability výšky porostu na pravděpodobnost výskytu druhu (Obr. 15). U LLS výsledky ukazovaly podobnou důležitost variability kolem dvaceti procent. V případě dat GEDI výsledky ukazují mnohem vyšší důležitost variability průměrné výšky vegetace (34 %) a minimální důležitost variability směrodatné odchylky vegetace (6 %). K podobné změně došlo i u králíčka obecného (*Regulus regulus*). U LLS je důležitost variability výšky vegetace i směrodatné

odchyly podobná (30 % a 29 %), ale u dat GEDI je mezi důležitostí variability výrazný rozdíl, a to 39 % v případě průměrné výšky a 16 % v případě směrodatné odchyly (Obr. 16). V několika případech došlo i k celkové změně důležitosti variability proměnných. Například u křivky obecné původní výsledky ukazovaly jednoznačně nejvyšší důležitost dílčí variability směrodatné odchyly vegetace, oproti průměrné teplotě a průměrné výšce vegetace. Výsledky dat GEDI ukazují téměř stejnou důležitost variability u všech tří proměnných (Obr. 17). Ke stejné změně došlo i u sýkory uhelníčka (Obr. 18). V případě žluny zelené u LLS byla důležitost variability průměrné výšky vegetace a průměrné teplotě stejná, ale v případě dat GEDI byla nejvíce důležitá variabilita průměrné teploty (63 %) a v případě průměrné výšky porostu byla jen 23 % (Obr. 19). K podobné změně došlo i u drozda brávníka (Obr. 20), kdy byla původně nejvíce důležitá variabilita směrodatné odchyly porostu, nyní je nejvíce důležitá průměrná teplota.

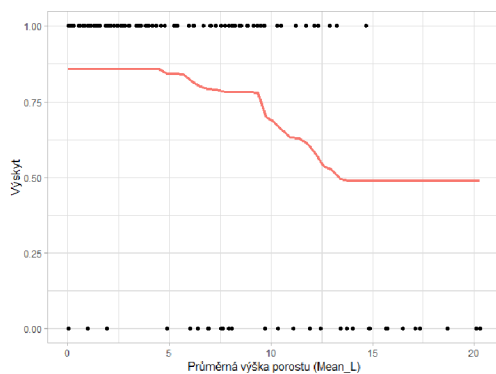
Na sledované druhy měly u LLS i GEDI největší vliv průměrná výška vegetace a průměrná teplota. Nejmenší vliv na druhy měla směrodatná odchyly výšky vegetace. V případě LLS měla průměrná výška vegetace průměrnou vysvětlenou variabilitu 39 %, průměrná teplota 37 % a směrodatná odchyly jen 24 % (Tab. 2). V případě GEDI měla průměrná výška vegetace 38 %, průměrná teplota 42 % a směrodatná odchyly 20 % (Tab. 3).

Druh	Celková vysvětlená variabilita	Dílčí vysvětlená variabilita		
		Průměrná výška	Směrodatná odchyly	Průměrná teplota
<i>Anas platyrhynchos</i> (kachna divoká)	22 %	50 %	33 %	17 %
<i>Carduelis carduelis</i> (stehlík obecný)	22 %	67 %	3 %	30 %
<i>Certhia familiaris</i> (šoupálek dlouhoprstý)	28 %	50 %	26 %	24 %
<i>Dendrocopos syriacus</i> (strakapoud jižní)	21 %	35 %	7 %	58 %
<i>Dendrocoptes medius</i> (strakapoud prostřední)	30 %	17 %	20 %	63 %
<i>Dryocopus martius</i> (datel černý)	27 %	42 %	38 %	20 %
<i>Falco tinnunculus</i> (poštolka obecná)	28 %	52 %	18 %	30 %
<i>Ficedula albicollis</i> (lejsek bělokrký)	25 %	29 %	16 %	55 %
<i>Chroicocephalus ridibundus</i> (racek chechtavý)	20 %	12 %	10 %	78 %
<i>Lophophanes cristatus</i> (sýkora parukářka)	27 %	26 %	36 %	38 %
<i>Loxia curvirostra</i> (křivka obecná)	31 %	15 %	57 %	28 %
<i>Luscinia megarhynchos</i> (slavík obecný)	29 %	18 %	29 %	53 %
<i>Passer montanus</i> (vrabec polní)	23 %	54 %	6 %	40 %
<i>Periparus ater</i> (sýkora uhelníček)	40 %	23 %	51 %	26 %
<i>Pica pica</i> (straka obecná)	30 %	73 %	10 %	17 %
<i>Picus viridis</i> (žluna zelená)	20 %	43 %	14 %	43 %
<i>Regulus ignicapilla</i> (králíček ohnivý)	38 %	28 %	33 %	39 %
<i>Regulus regulus</i> (králíček obecný)	32 %	30 %	29 %	41 %
<i>Streptopelia decaocto</i> (hrdlička zahradní)	21 %	78 %	4 %	18 %
<i>Turdus viscivorus</i> (drozd brávník)	27 %	36 %	42 %	22 %
Průměrná vysvětlená variabilita		39 %	24 %	37 %

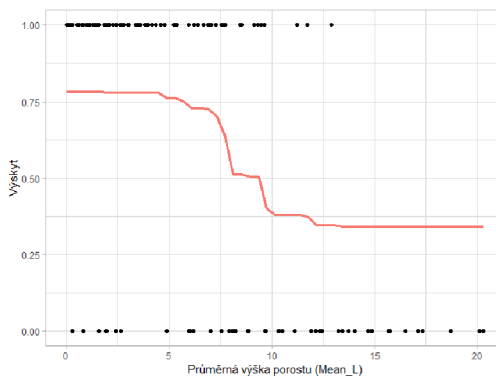
Tab. 2: Vztahy mezi proměnnými vegetace z leteckého laserového skenování a vybranými ptáčími druhy

Druh	Celková vysvětlená variabilita	Dílčí vysvětlená variabilita		
		Průměrná výška	Směrodatná odchylka	Průměrná teplota
<i>Anas platyrhynchos</i> (kachna divoká)	12 %	50 %	24 %	26 %
<i>Carduelis carduelis</i> (stehlík obecný)	22 %	62 %	4 %	34 %
<i>Certhia familiaris</i> (šoupálek dlouhoprstý)	26 %	52 %	20 %	28 %
<i>Dendrocopos syriacus</i> (strakapoud jižní)	22 %	19 %	21 %	60 %
<i>Dendrocoptes medius</i> (strakapoud prostřední)	28 %	34 %	6 %	60 %
<i>Dryocopus martius</i> (datel černý)	21 %	41 %	36 %	23 %
<i>Falco tinnunculus</i> (poštolka obecná)	23 %	56 %	12 %	32 %
<i>Ficedula albicollis</i> (lejssek bělokrký)	21 %	30 %	12 %	58 %
<i>Chroicocephalus ridibundus</i> (racek chechtavý)	21 %	7 %	7 %	86 %
<i>Lophophanes cristatus</i> (sýkora parukářka)	22 %	23 %	39 %	38 %
<i>Loxia curvirostra</i> (křivka obecná)	27 %	32 %	35 %	33 %
<i>Luscinia megarhynchos</i> (slavík obecný)	33 %	29 %	27 %	44 %
<i>Passer montanus</i> (vrabec polní)	20 %	48 %	8 %	44 %
<i>Periparus ater</i> (sýkora uhelníček)	33 %	27 %	39 %	34 %
<i>Pica pica</i> (straka obecná)	13 %	62 %	15 %	23 %
<i>Picus viridis</i> (žluna zelená)	19 %	23 %	14 %	63 %
<i>Regulus ignicapilla</i> (králíček ohnivý)	34 %	28 %	30 %	42 %
<i>Regulus regulus</i> (králíček obecný)	29 %	39 %	16 %	45 %
<i>Streptopelia decaocto</i> (hrdlička zahradní)	15 %	69 %	3 %	28 %
<i>Turdus viscivorus</i> (drozd brávník)	19 %	34 %	28 %	38 %
Průměrná vysvětlená variabilita		38 %	20 %	42 %

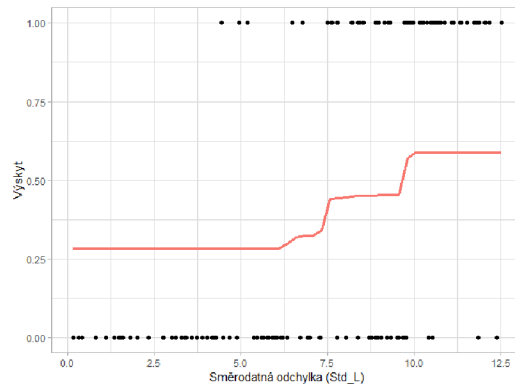
Tab. 3: Vztahy mezi proměnnými vegetace dat GEDI a vybranými ptačími druhy



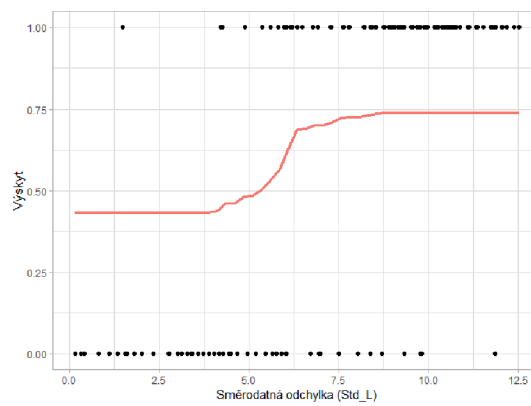
Obr. 10: Vliv průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu straky obecné



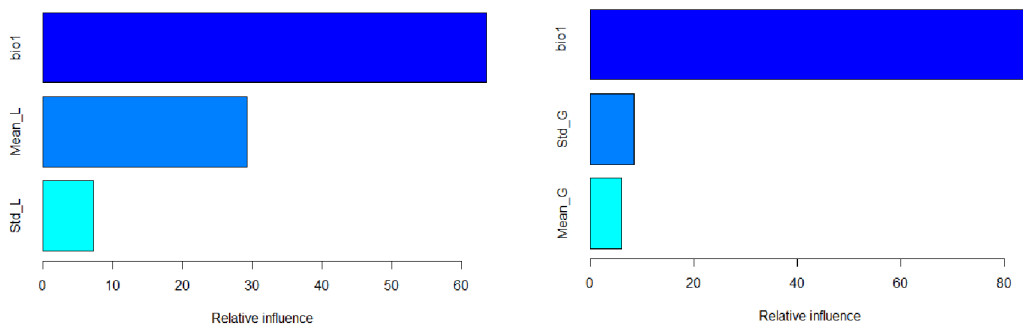
Obr. 11: Vliv průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu hrdličky zahradní



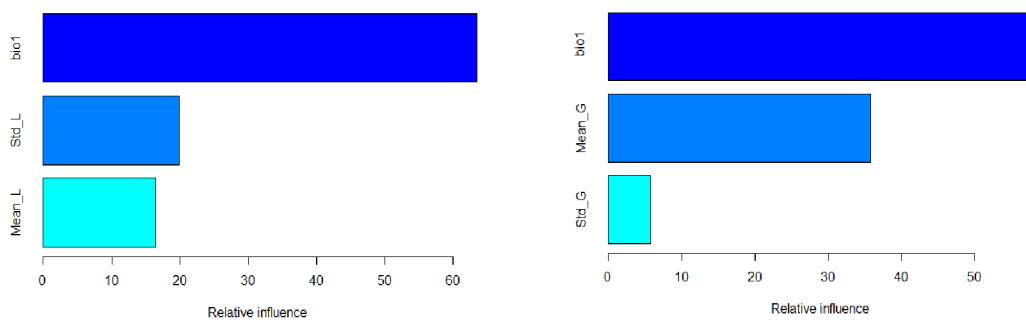
Obr. 12: Vliv směrodatné odchylky průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu křivky obecné



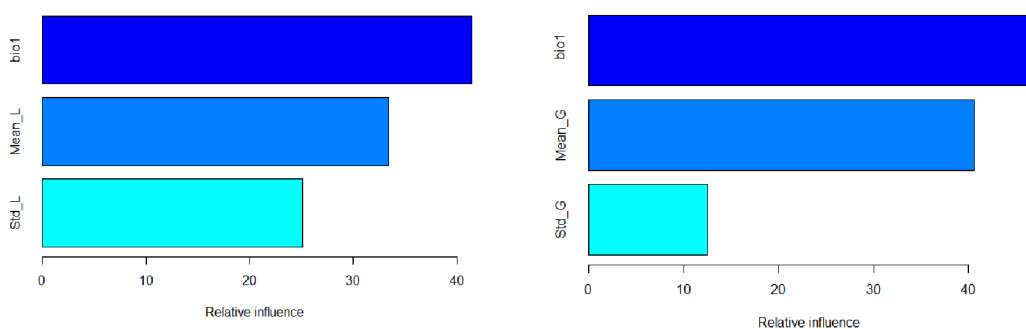
Obr. 13: Vliv směrodatné odchylky průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu sýkory uhlíčka



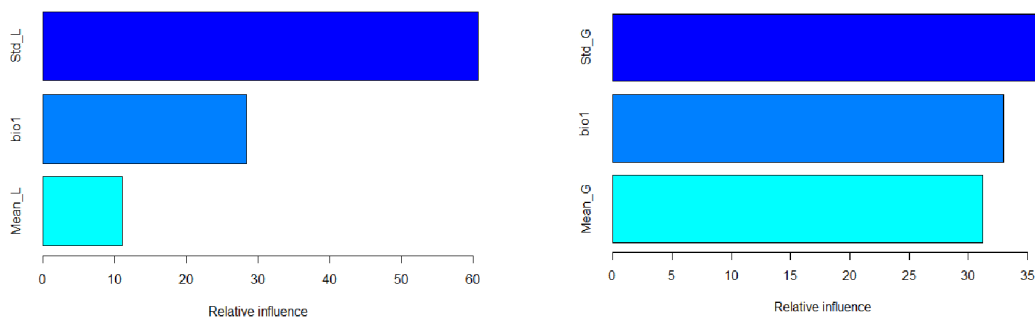
Obr. 14: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u strakapouda jižního



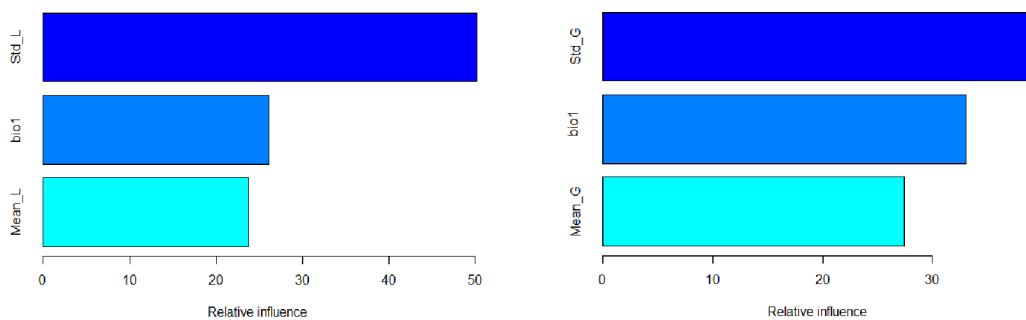
Obr. 15: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u strakapouda prostředního



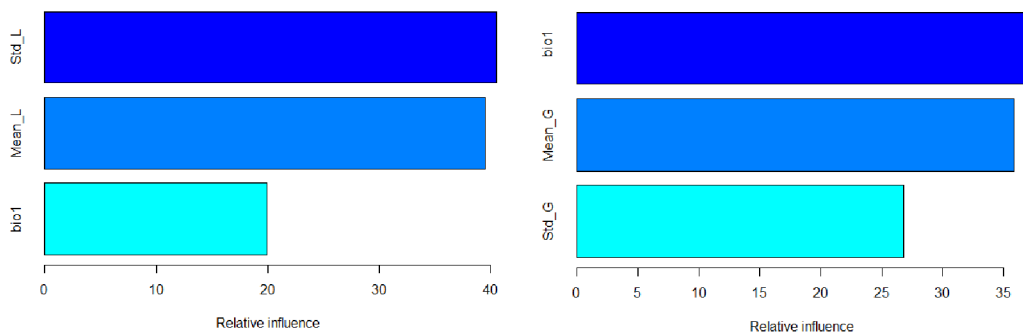
Obr. 16: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u králíčka obecného



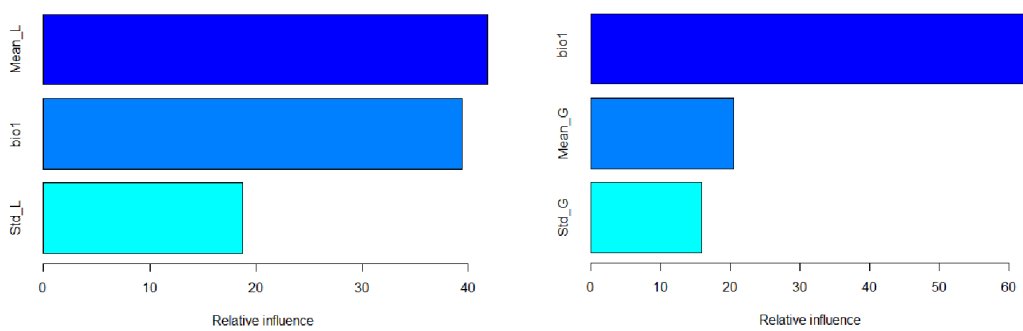
Obr. 17: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u křivky obecné



Obr. 18: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u sýkory uhelníčka



Obr. 19: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u žluny zelené



Obr. 20: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u drozda brávníka

5. Diskuze

Modelování distribuce druhů s využitím kvalitních dat může vést k vysoké prediktivní schopnosti modelů, čímž může pomoci v ochraně ptačích druhů. Nejdůležitějším faktorem pro výskyt studovaných ptáků byla průměrná výška vegetace a průměrná teplota. Variabilita vysvětlená prediktory odvozených z dat leteckého laserového skenování se pohybovala od 22 % do 40 %. Z toho průměrná výška vegetace zaujímala v průměru 39 % vysvětlené variability, průměrná teplota 37 % a směrodatná odchylka vegetace 24 %. Variabilita vysvětlená prediktory odvozenými z dat mise GEDI se pohybovala od 12 % do 34 %. Průměrná výška vegetace zaujímala 38 % vysvětlené variability, průměrná teplota 42 % a směrodatná odchylka 20 %.

5.1 Vliv struktury vegetace

Struktura vegetace je známým důležitým faktorem pro ptačí druhy. Kromě poskytování potravy, úkrytu před predátory a prostoru k hnízdění, může struktura vegetace například ovlivnit i teplotu a průnik slunečního světla do spodních pater vegetace (Davies a Asner 2014). Struktura vegetace tedy silně ovlivňuje výskyt ptáků v krajině (Bakx et al. 2019, Davies a Asner 2014, Kotsiotis et al. 2017). Vliv struktury vegetace s využitím LiDARových dat se ukázal jako podstatný faktor pro ptáky i v mnohých studiích (Kotsiotis et al. 2017, Moudrý et al. 2021, Vogeler et al. 2014).

Průměrná výška byla nejvýznamnějším faktorem pro hrdličku zahradní, straku obecnou a stehlíka obecného. Hrdlička zahradní je výhradně synantropní druh, který k hnízdění využívá stromy v okolí lidských sídel nebo i výklenky budov (Šťastný et al. 2021). Atlas hnízdního rozšíření ptáků (Šťastný et al. 2021) uvádí, že pravděpodobnost výskytu hrdličky zahradní stoupá v okolí lidských sídel. Straka obecná se souvislým lesům vyhýbá, ale využívá k hnízdění prostory s malými lesy nebo okolí lidských sídel (Šťastný et al. 2021). S rostoucí výškou průměrné vegetace pravděpodobnost výskytu straky obecné klesá, což je v souladu s habitatovými nároky uvedenými v atlasu hnízdního rozšíření. Výsledky pravděpodobnosti výskytu stehlíka obecného ukázaly, že klesá s růstem průměrné výšky vegetace, protože se jedná o druh, který se nejvíce vyskytuje na zemědělských půdách a ve městech (Šťastný et al. 2021). V případě směrodatné odchylky byla nejvíce ovlivněná křivka obecná a sýkora uhelníček. Křivka obecná je druh, který vyhledává okolí jehličnatých lesů, jelikož se

živí jejich semeny. Vyskytuje se například i ve smíšených lesích, na pastvinách, rašeliništích, v okolí vodních toků a v křovinách (Šťastný et al. 2021). Sýkora uhelníček se vyskytuje zejména v starších jehličnatých lesech, ale vyskytuje se i ve smíšených lesech, v křovinách, na rašeliništích a v okolí vodních toků. Naopak se vyhýbá okolí lidských sídel (Šťastný et al. 2021).

5.2 Vliv průměrné teploty

Ukázalo se, že průměrná teplota má důležitý vliv na ptačí druhy. Dílčí vysvětlená variabilita průměrné teploty se pohybovala od 17 % do 78 %. Měla tedy podobný efekt jako průměrná výška vegetace. Vlivem teploty na ptačí druhy se zabírá mnoho studií (Chatelain et al. 2013, Kuile et al. 2023, Tzschentke a Basta 2002). Například studie Kuile et al. (2023) ukázala vliv teploty na hnízdící ptáky. Studie Tzschentke a Basta (2002) se věnovala vlivu inkubační teploty na vejce ptáků a následné adaptace, které při změně inkubační teploty nastanou. Studie Chatelain et al. (2013) se zabývá změnou potravních nároků ptáků při změně teploty. Všechny studie ukázaly důležitost průměrné teploty pro ptáky. Ze sledovaných ptáků byli nejvíce průměrnou teplotou ovlivněni racek chechtavý a strakapoud prostřední. Pozitivní korelaci mezi průměrnou teplotou v květnu a pravděpodobností výskytu racka chechtavého se zvyšující teplotou uvádí i atlas hnízdního rozšíření ptáků (Šťastný et al. 2021), stejně jako u strakapouda prostředního.

5.3 Vliv hrubého měřítka

Hrubé měřítko mělo viditelný vliv na výsledky vlivu struktury vegetace. Při srovnání výsledků z leteckého laserového skenování a dat GEDI je viditelné, že se výsledky mezi sebou liší. Například při srovnání závislosti křivky obecné na průměrné výšce vegetace, je u LLS závislost stanovena na 15 % a u dat GEDI na 32 %. Podobných rozdílů a nejasností je ve srovnání výsledků nespočet. Podle korelace proměnných z LLS a GEDI (Obr. 9) můžeme vidět, že GEDI nadhodnocuje výšku vegetace z LLS, což může být způsobeno tím, že jsou data GEDI sbírána o zhruba deset let později. Rozdíly mezi výsledky z dat LLS a GEDI nemusí být nutně způsobeny hrubým měřítkem dat GEDI, ale také rozdílem v době sběru. Výsledky mohly být ovlivněny tím, že jsou data LSD sbírána v letech 2018-2021 a data LLS vznikla mezi lety 2009-2013. Vzhled krajiny a přítomná vegetace mohla za dobu

změnit svou podobu. Je tedy pravděpodobné, že data LLS mohla ukázat zavádějící spojitosti mezi výskytem druhů z LSD a vegetací z LLS.

6. Závěr

Při srovnání vlivu struktury vegetace a teploty tato práce ukázala, že jsou vlivy na ptačí druhy podobné. Nejvíce byly sledované druhy ovlivněny průměrnou výškou vegetace a průměrnou teplotou, naopak byly nejméně ovlivněny směrodatnou odchylkou výšky vegetace. Při srovnání výsledků vzešlých z LLS a dat z mise GEDI bylo zjištěno, že při využití hrubého měřítka může dojít ke vzniku nejasností a mnohých rozdílů. Například v několika případech nebyla u dat GEDI splněna minimální vysvětlená variabilita 20 % u ptáků, kteří minimální vysvětlené variability u dat LLS dosahovali (kachna divoká, straka obecná, žluna zelená, hrdlička zahradní, drozd brávník). Tato skutečnost poukazuje na nutnost využití kvalitních dat pro podobné účely, jelikož při vzniku nesrovnalostí podobného typu může dojít k dosažení zavádějících závěrů a tím vést k nevhodným opatřením k ochraně druhů. Je tedy důležité volit aktuální data v kvalitním rozlišení, která odpovídají potřebám studie.

7. Seznam použité literatury

- Bakx T. R. M., Koma T., Seijmonsbergen A. C., Kissling W.,** 2019: Use and categorization of Light Detection and Ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Diversity and Distributions* 00: 1–15.
- Coreau A., Martin J. L.,** 2007: Multi-scale study of bird species distribution and of their response to vegetation change: a Mediterranean example. *Landscape Ecol* 22, 747–764.
- Česká společnost ornitologická,** 2018: Liniové sčítání druhů, Metodika pro spolupracovníky. ČSO 2018-04-06.
- Davies A. B., Asner G. P.,** 2014: Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology & Evolution* 29 (12): 681–691.
- Dolman P. M., Sutherland W. J.,** 1995: The response of bird populations to habitat loss. *IBIS* 137: 38–46.
- Dubayah R., Blair J. B., Goetz S., Fatoyinbo L., Hansen M., Healey S., Hofton M., Hurtt G., Kellner J., Luthcke S., Armston J., Tang H., Duncanson L., Hancock S., Jantz P., Marselis S., Patterson P. L., Qi W., Silva C.,** 2020: The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing* 1, 100002.
- Elith J., Leathwick J. R.,** 2009: Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40, 677–697.
- Elith J., Leathwick J. R., Hastie T.,** 2008: A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77: 802–813.
- Fick S. E., Hijmans R. J.,** 2017: Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12), 4302–4315.
- Guisan A., Graham C. H., Elith J., Huettmann F., NCEAS Species Distribution Modelling Group,** 2007: Sensitivity of predictive species distribution models to change in grain size. *Diversity and Distributions* 13, 332–340
- Gupta R., Sharma L. K.,** 2022: Aboveground Biomass Prediction by Fusing Gedi Footprints with Optical and SAR Data Using the Random Forest in the Mixed Tropical Forest, India. *IGARSS 2022–2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5460–5463.
- Hanzelka J., Reif J.,** 2016: Effects of vegetation structure on the diversity of breeding bird communities in forest stands of non-native black pine (*Pinus nigra* A.)

and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in the Czech Republic. *Forest Ecology and Management* 379, 102–113

He K. S., Bradley B. A., Cord A. F., Rocchini D., Taunmu M., Schmidtlein S., Turner W., Wegmann M., Pettorelli N., 2015: Will remote sensing shape the next generation of species distribution models? *Remote Sensing and Species Distribution Models* 10.1002

Howell Ch. A., Latta S. C., Donovan M. T., Porneluzi P. A., 2000: Landscape effects mediate breeding bird abundance in Midwestern forests. *Landscape Ecology* 15: 547–562.

Chasmer L., Hopkinson Ch., Treitz P., 2006: Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32 (2), 116–125.

Chatelain M., Halpin C. G., Rowe C., 2013: Ambient temperature influences birds' decisions to eat toxic prey. *Animal Behaviour* 86, 733–740.

Kontsiotis V., Zaimis G. N., Tsiftsis S., Kiourtzidis P., Bakaloudis D., 2017: Assessing the influence of riparian vegetation structure on bird communities in agricultural Mediterranean landscapes. *Agroforest Syst* 93, 675–687.

Kuile A. M., Ogle K., Cavanaugh Ch., Dudley J., Markus A., Saab V., Wright M., Sanderlin J., 2023: Forest management, forest vegetation, and climate influence nesting ecology of a focal bird species in the western USA. *Forest Ecology and Management* 549, 121443.

Kumari K., Kumar S., 2023: Machine Learning Based Modeling for Forest Aboveground Biomass Retrieval. *International Conference on Machine Intelligence for GeoAnalytics and Remote Sensing (MIGARS)* 206–209.

Levin S. A., 2013: *Encyclopedia of Biodiversity: Edition 2.* Academic Press, 63–70.

Miller J., 2010: Species Distribution Modeling. *Geography Compass* 4/6, 490–509.

Moudrý V., Keil P., Gábor L., Lecours V., Zarzo-Arias A., Barták V., Malavasi M., Rochini D., Torresani M., Gdulová K., Grattarola F., Leroy F., Marchetto E., Thouverai E., Prošek J., Wild J., Šimová P., 2023: Scale mismatches between predictor and response variables in species distribution modelling: A review of practices for appropriate grain selection. *Progress in Physical Geography Earth and Environment* 47 (3).

Moudrý V., Moudrá L., Barták V., Bejček V., Gdulová K., Hendrychová M., Moravec D., Musil P., Rocchini D., Šťastný K., Volf O., Šálek M., 2021: The role of the vegetation structure, primary productivity and senescence derived from Airborne Lidar and hyperspectral data for birds diversity and rarity on a restored site. *Landscape and Urban Planning* 210, 104064.

- Oliveira P. V. C., Zhang X., Peterson B., Ometto J. P., 2023:** Using simulated GEDI waveforms to evaluate the effects of beam sensitivity and terrain slope on GEDI L2A relative height metrics over the Brazilian Amazon Forest. *Science of Remote Sensing* 7, 100083.
- Reif J., Prylová K., Šizling A. L., Vermouzek Z., Šťastný K., Bejček V., 2012:** Changes in bird community composition in the Czech Republic from 1982 to 2004: increasing biotic homogenization, impacts of warming climate, but no trend in species richness. *J Ornithol* 154, 359–370.
- Svenning J. Ch., Fløjgaard C., Marske K. A., Nógues-Bravo D., Normand S., 2011:** Applications of species distribution modeling to paleobiology. *Quaternary Science Reviews* 30, 2930–2947.
- Šálek M., Kalinová K., Daňková R., Grill S., Zmihorski M., 2021:** Reduced diversity of farmland birds in homogenized agricultural landscape: A cross-border comparison over the former Iron Curtain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 321, 107628
- Šimová P., Moudrý V., Komárek J., Hrach K., Fortin M. J., 2018:** Fine scale waterbody data improve prediction of waterbird occurrence despite coarse species data. *Ecography* 42: 511–520.
- Šťastný K., Bejček V., Mikuláš I., Telenský T., 2021:** Atlas hnízdního rozšíření ptáků v České republice 2014-2017. Nakladatelství AVENTINUM s.r.o., Praha.
- Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Goulden T., 2024:** State-wide forest canopy height and aboveground biomass map for New York with 10 m resolution, integrating GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data. *Ecological Informatics* 79, 102404.
- Torresani M., Rocchini D., Alberti A., Moudrý V., Heym M., Thouverai E., Kacic P. Tomelleri E., 2023:** LiDAR GEDI derived tree canopy height heterogeneity reveals patterns of biodiversity in forest ecosystems. *Ecological Informatics* 76, 102082.
- Tzschentke B., Basta D., 2002:** Early development of neuronal hypothalamic thermosensitivity in birds: influence of epigenetic temperature adaptation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* 131, 825–832.
- Vogeler J. C., Hudak A. T., Vierling L. A., Evans J., Green P., Vierling K. T., 2014:** Terrain and vegetation structural influences on local avian species richness in two mixed-conifer forests. *Remote Sensing of Environment* 147, 13–22.
- Wang Ch., Glenn N. F., 2008:** A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34 (2), 217–227.

Zeng Y., Jiang L., Lü Q., Zhao L., Liang J., Hu H., Linghu B., 2012: The relationship between species diversity and ecosystem function (productivity) of the late Middle Permian brachiopods community at the region of Hechuan, Chongqing, China. *Science China, Earth Sciences*, 55 (8), 1248–1254.

Internetové zdroje

Brázdil K., Bělka L., Dušánek P., Fiala R., Gamrát J., Kafka O., Peichl J., Šíma J., 2012: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) (online) [cit. 2024.03.14], dostupné z <https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf>.

Český úřad zeměměřický a katastrální: Digitální model reliéfu ČR (online) [cit. 2024.03.19], dostupné z <<https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/?m=20>>.

Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W., 2015: Remote Sensing and Image Interpretation (online) [cit. 2024.03.27], dostupné z <<https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-remote-sensing-and-image-interpretation.pdf>>

8. Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků:

Obr. 1: Vznik bodových mračen (Bakx et al. 2019)	16
Obr. 2: Sledované plochy LSD	20
Obr. 3: Struktura vegetace z leteckého laserového skenování v metrech	20
Obr. 4: Rozdělení ČR do jednotlivých pásem (oblastí) dle období sběru dat, ve kterých probíhalo letecké laserové skenování (ČÚZK).....	21
Obr. 5: Zobrazení lesů z dat LLS (vlevo) ve srovnání s ortofoto (vpravo) ve čtverci 1 x 1 km.....	21
Obr. 6: Průměrná výška vegetace v ČR z dat L3A mise GEDI v metrech	22
Obr. 7: Směrodatná odchylka průměrné výšky vegetace v ČR z dat L3A mise GEDI v metrech.....	22
Obr. 8: Model vytvořený pomocí funkce ModelBuilder v ArcGIS Pro	24
Obr. 9: Korelace mezi proměnnými LLS a dat GEDI, a to průměrnými výškami vegetace (mezi LLS_Mean a GEDI_Mean) a směrodatnými odchylkami vegetace (mezi LLS_STD a GEDI_STD). Červená linie zobrazuje funkci $y=x$	26
Obr. 10: Vliv průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu straky obecné	29
Obr. 11: Vliv průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu hrdličky zahradní	29
Obr. 12: Vliv směrodatné odchylky průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu křivky obecné	30
Obr. 13: Vliv směrodatné odchylky průměrné výšky vegetace z dat leteckého laserového skenování na pravděpodobnost výskytu sýkory uhelníčka.....	30
Obr. 14: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u strakapouda jižního.....	30
Obr. 15: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u strakapouda prostředního.....	31
Obr. 16: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u králíčka obecného	31
Obr. 17: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u křivky obecné	31
Obr. 18: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u sýkory uhelníčka.....	31
Obr. 19: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u žluny zelené	32

Obr. 20: Rozdíl v důležitosti sledovaných proměnných v případě použití dat LLS (vlevo) a GEDI (vpravo) u drozda brávníka 32

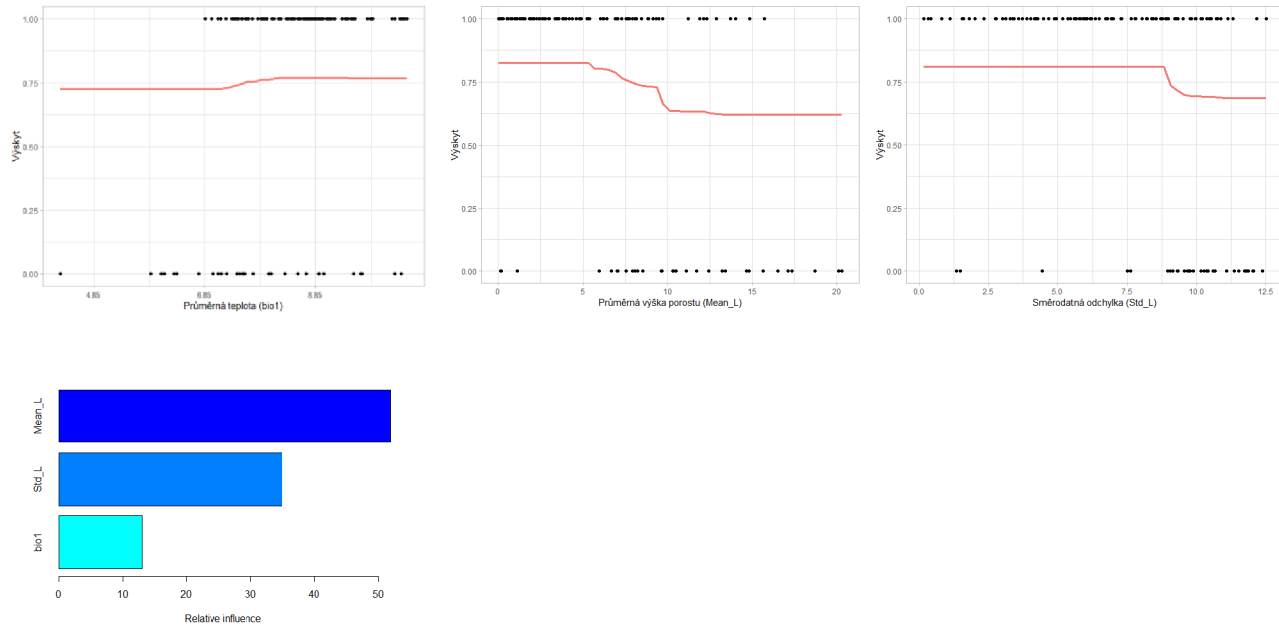
Seznam tabulek:

Tab. 1: Korelační koeficienty struktury vegetace leteckého laserového skenování (LLS_Mean, LLS_STD) a struktury vegetace dat GEDI (GEDI_Mean, GEDI_STD) 26

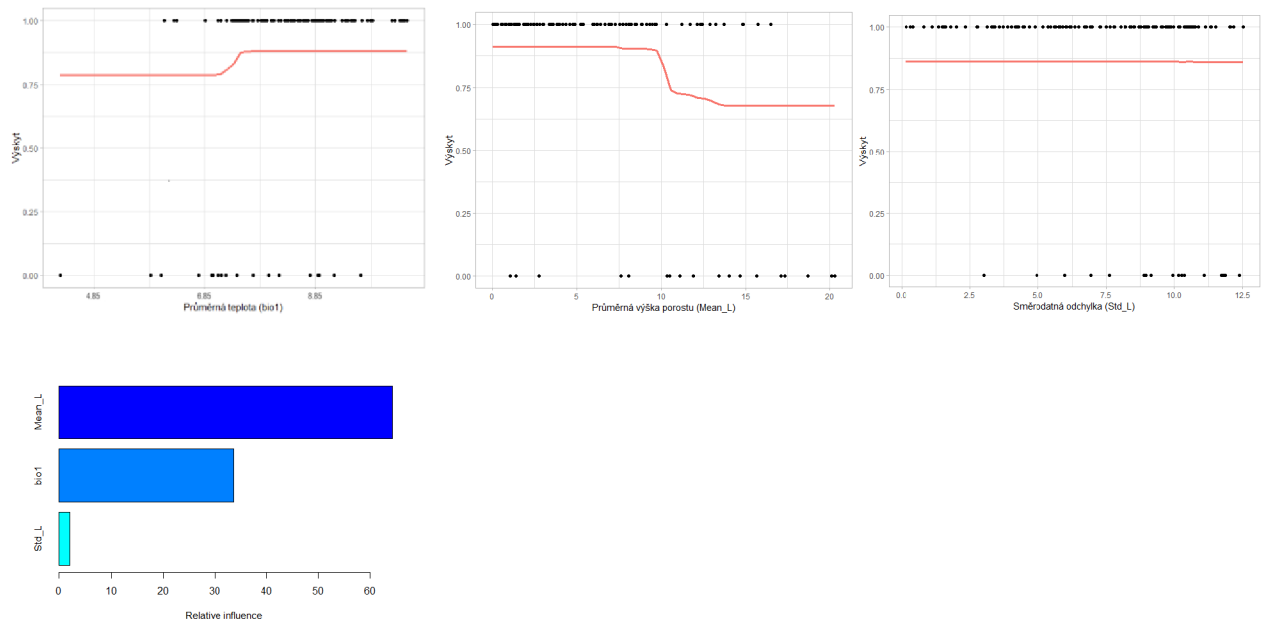
Tab. 2: Vztahy mezi proměnnými vegetace z leteckého laserového skenování a vybranými ptačími druhy 28

Tab. 3: Vztahy mezi proměnnými vegetace dat GEDI a vybranými ptačími druhy .. 29

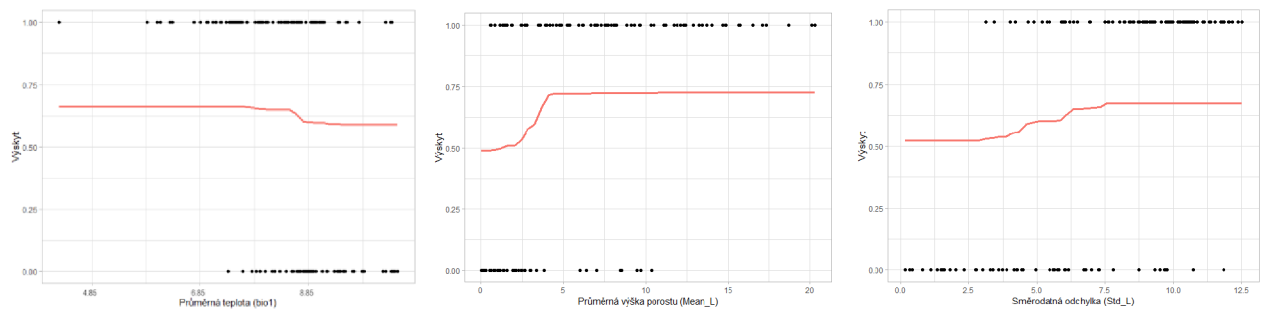
9. Přílohy

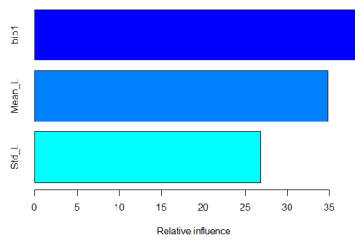


Příloha 1: Vliv proměnných na výskyt kachny divoké z leteckého laserového skenování.

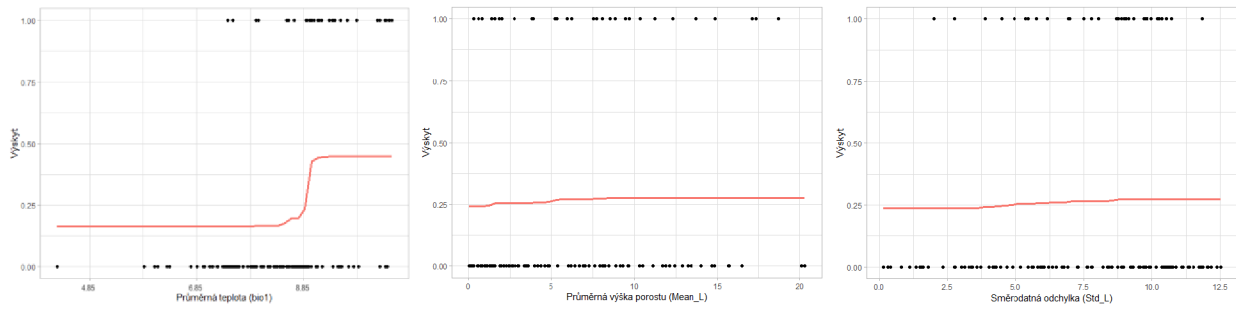


Příloha 2: Vliv proměnných na výskyt stehlíka obecného z leteckého laserového skenování.

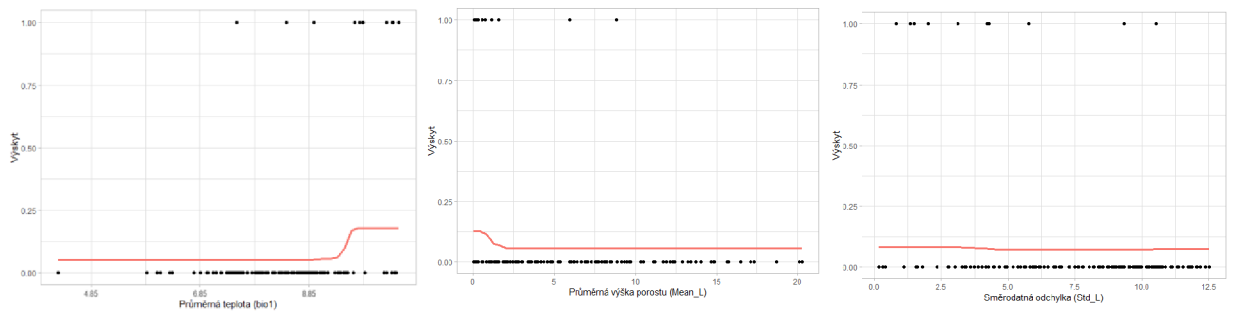




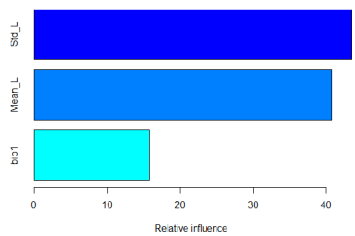
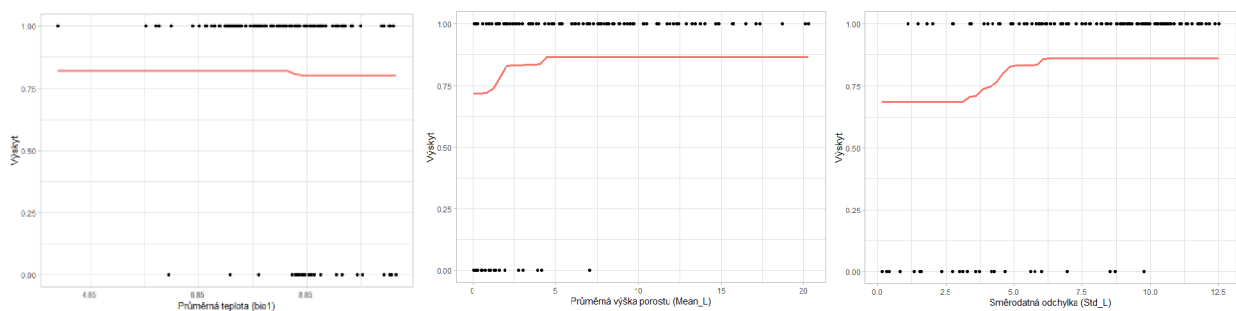
Příloha 3: Vliv proměnných na výskyt šoupálka dlouhoprstého z leteckého laserového skenování.



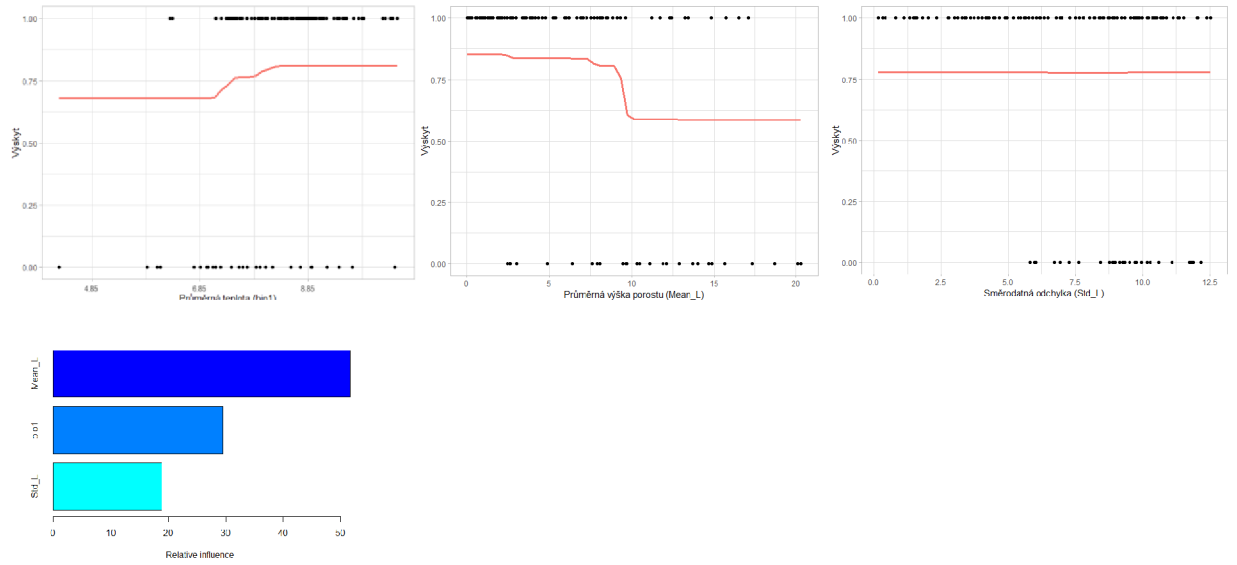
Příloha 4: Vliv proměnných na výskyt strakapouda prostředního z leteckého laserového skenování.



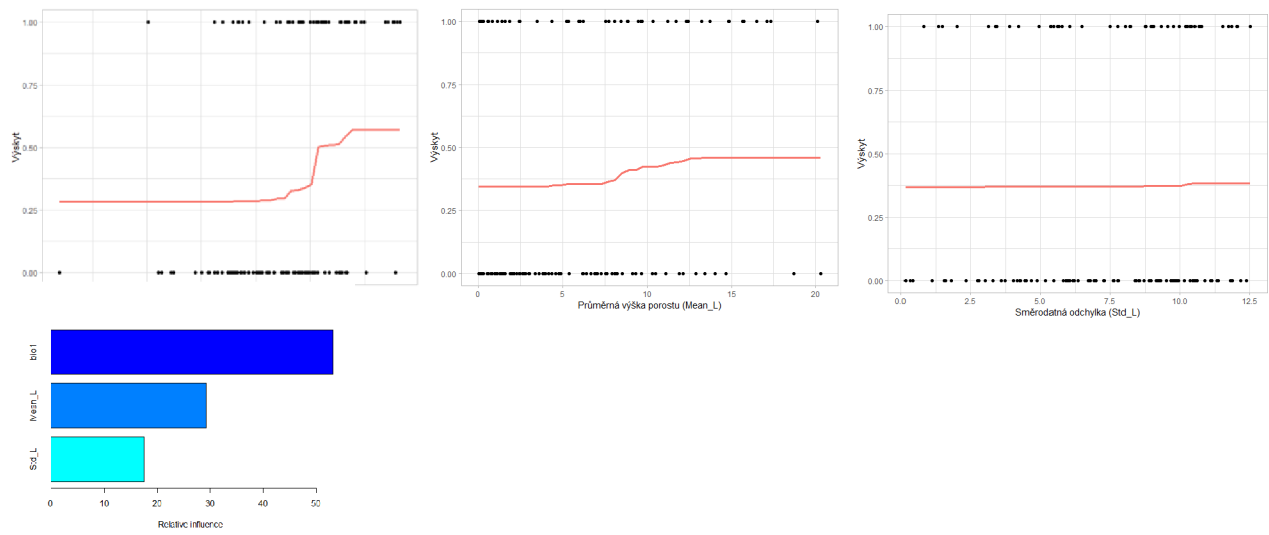
Příloha 5: Vliv proměnných na výskyt strakapouda jižního z leteckého laserového skenování.



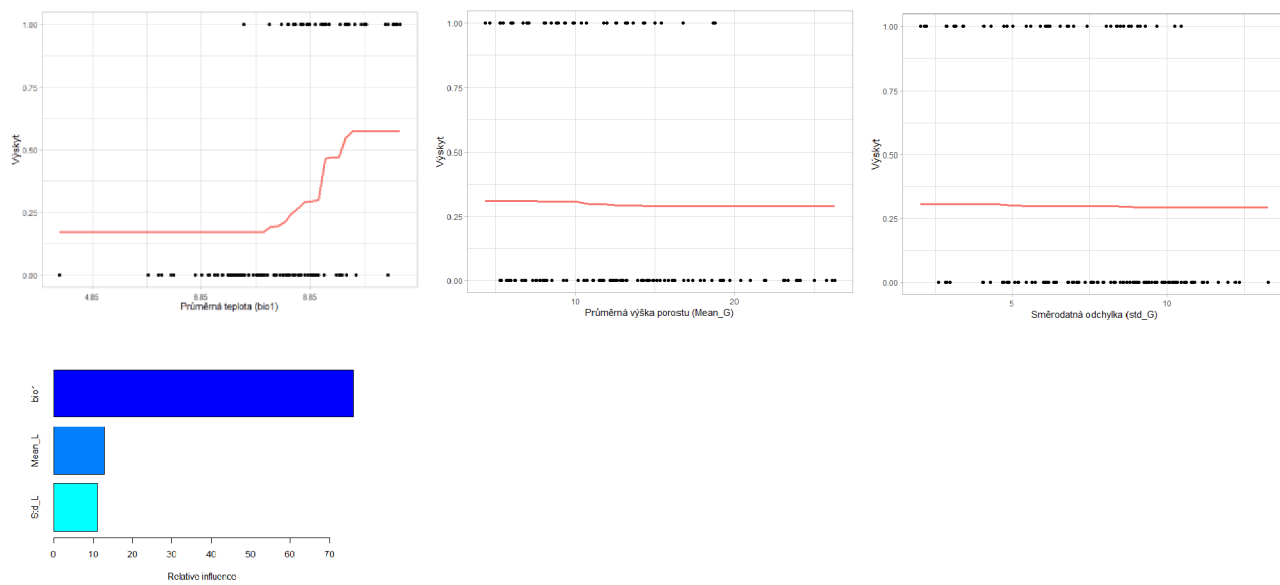
Příloha 6: Vliv proměnných na výskyt datla černého z leteckého laserového skenování.



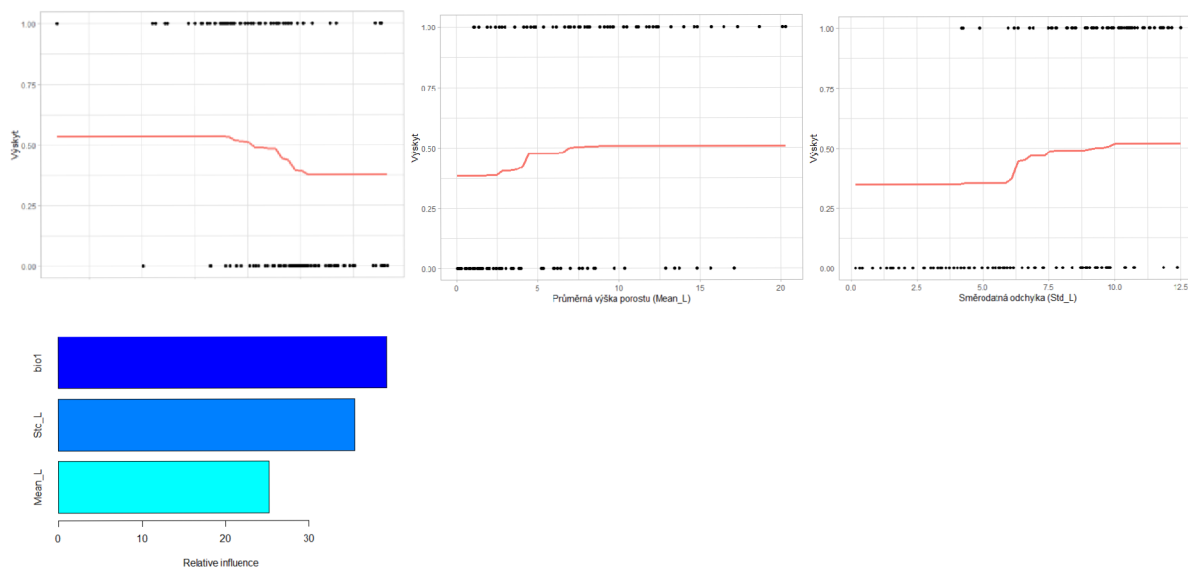
Příloha 7: Vliv proměnných na výskyt poštolky obecné z leteckého laserového skenování.



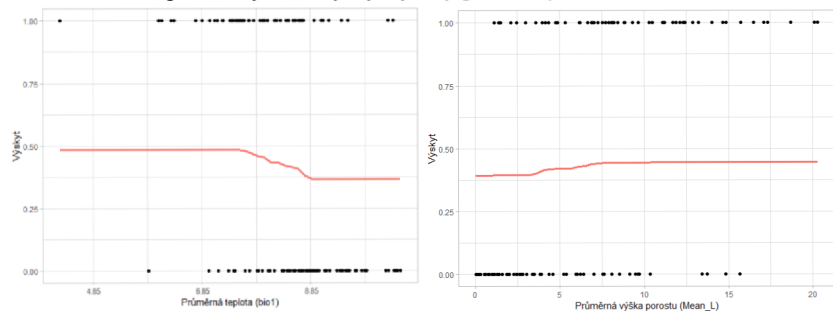
Příloha 8: Vliv proměnných na výskyt lejska bělokrkého z leteckého laserového skenování.



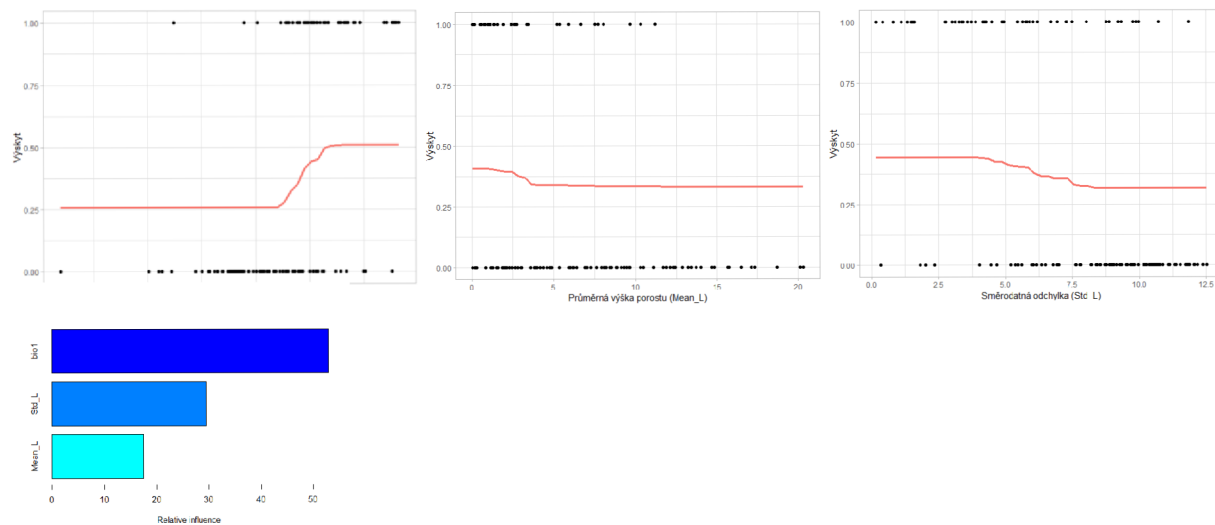
Příloha 9: Vliv proměnných na výskyt racka chechtavého z leteckého laserového skenování.



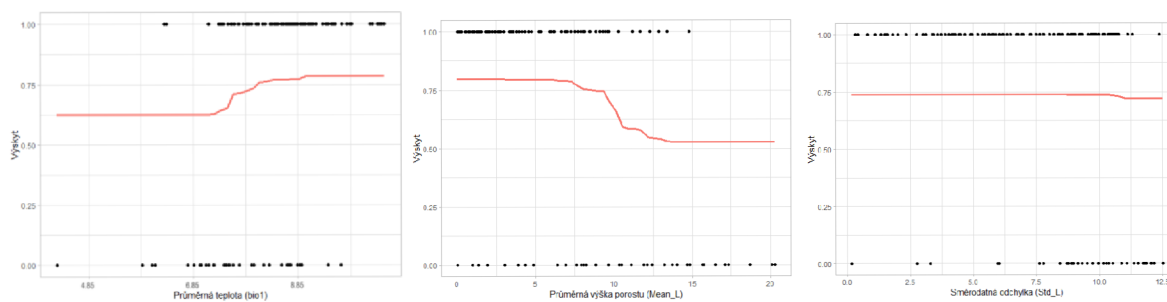
Příloha 10: Vliv proměnných na výskyt sýkory parukářky z leteckého laserového skenování.

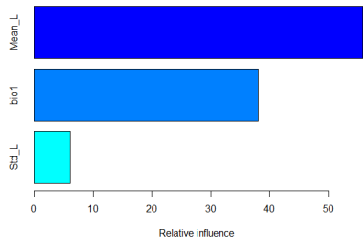


Příloha 11: Vliv proměnných na výskyt křivky obecné z leteckého laserového skenování.

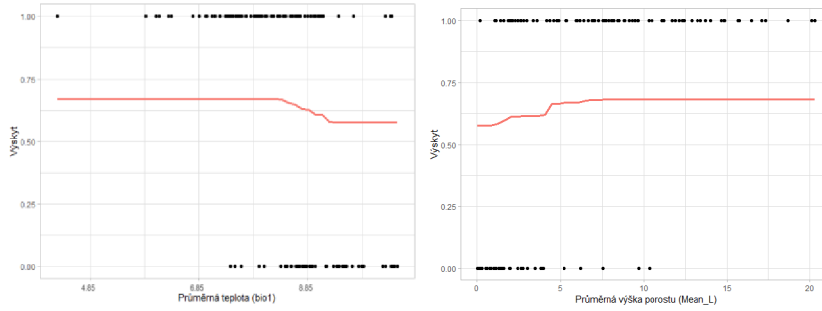


Příloha 12: Vliv proměnných na výskyt slavíka obecného z leteckého laserového skenování.

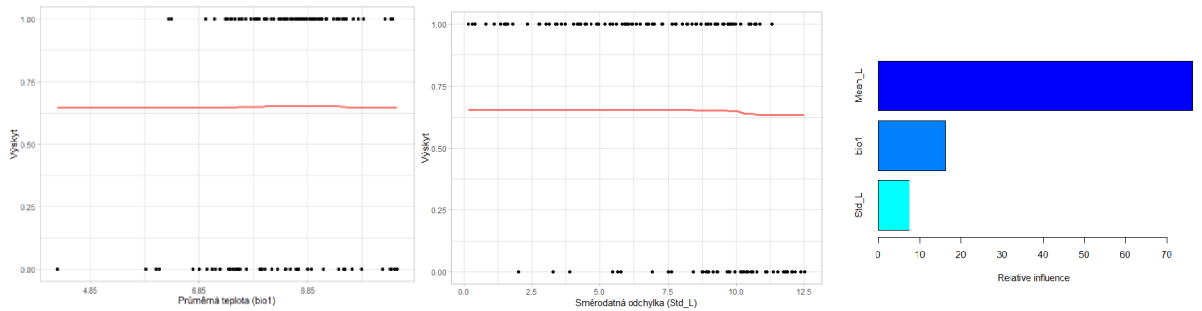




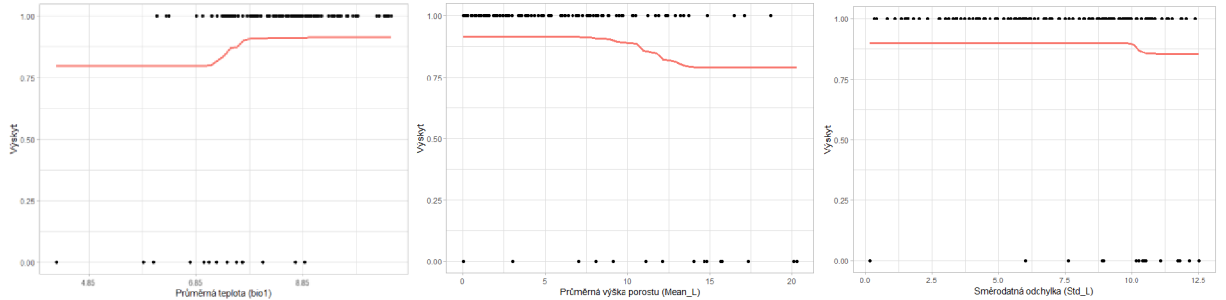
Příloha 13: Vliv proměnných na výskyt vrabce polního z leteckého laserového skenování.



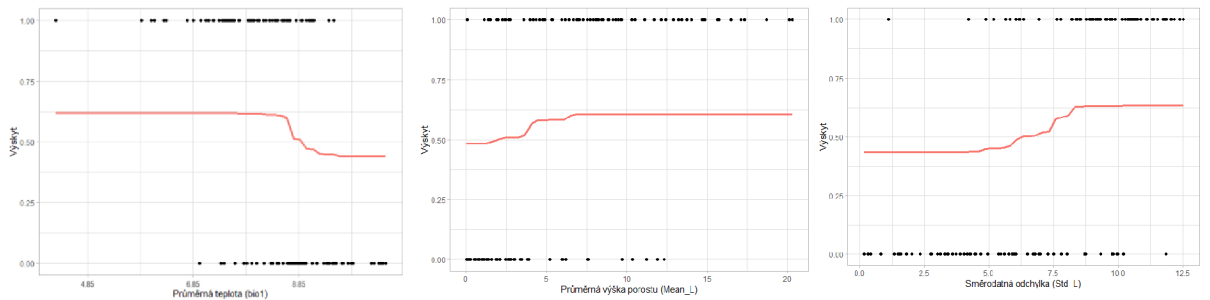
Příloha 14: Vliv proměnných na výskyt sýkory uhelníčka z leteckého laserového skenování.

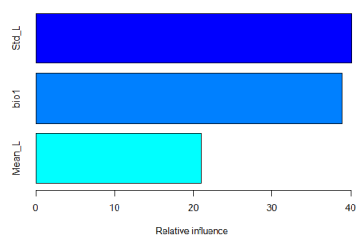


Příloha 15: Vliv proměnných na výskyt straky obecné z leteckého laserového skenování.

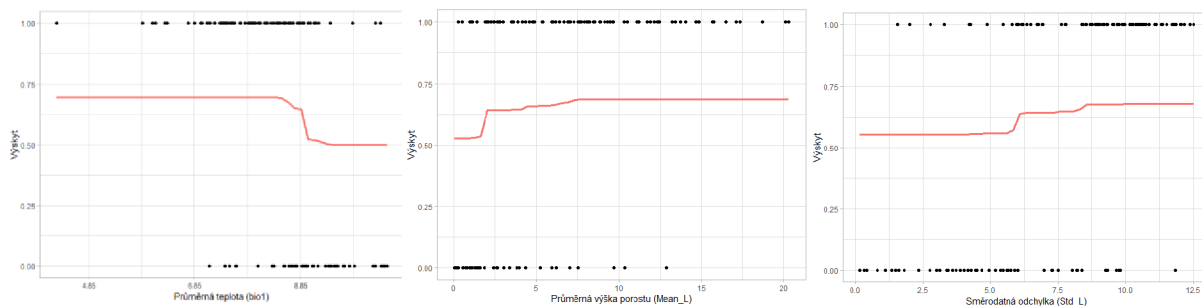


Příloha 16: Vliv proměnných na výskyt žluny zelené z leteckého laserového skenování.

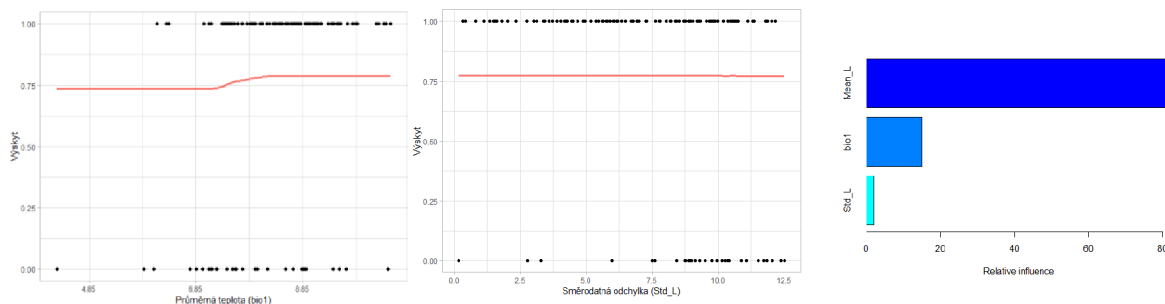




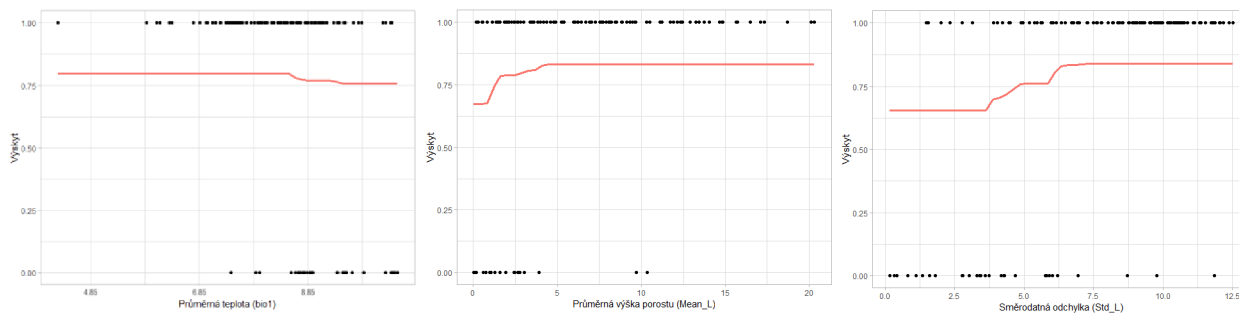
Příloha 17: Vliv proměnných na výskyt králíčka ohnivého z leteckého laserového skenování.



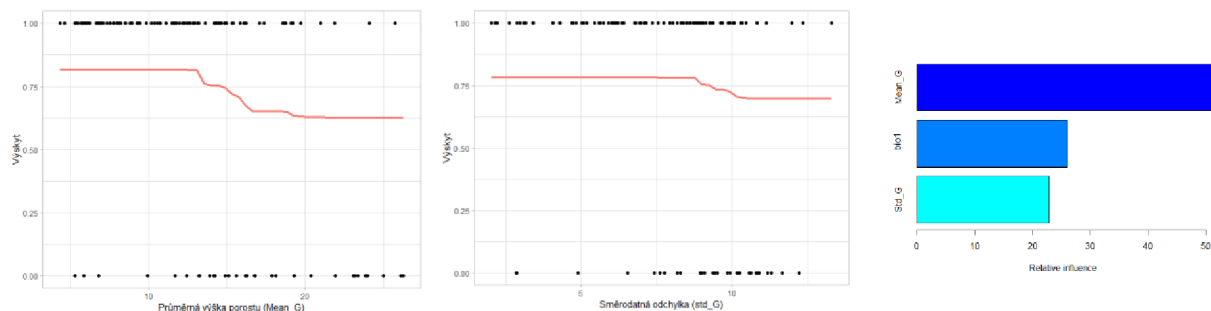
Příloha 18: Vliv proměnných na výskyt králíčka obecného z leteckého laserového skenování.



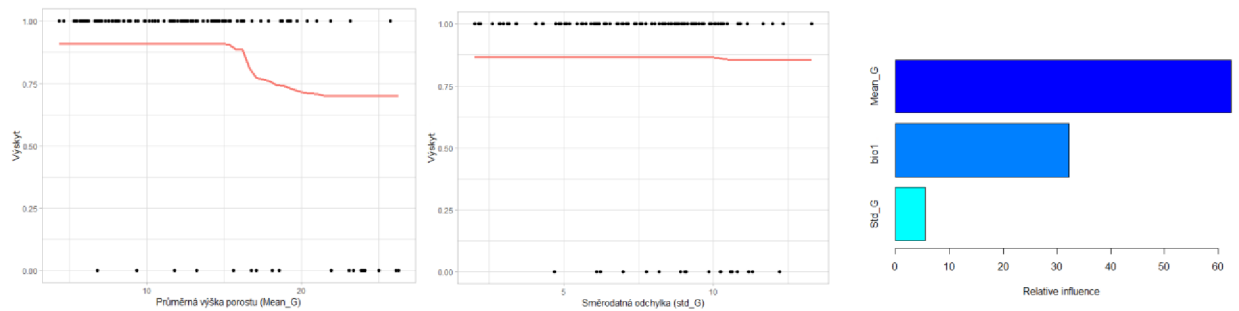
Příloha 19: Vliv proměnných na výskyt hrdličky zahradní z leteckého laserového skenování.



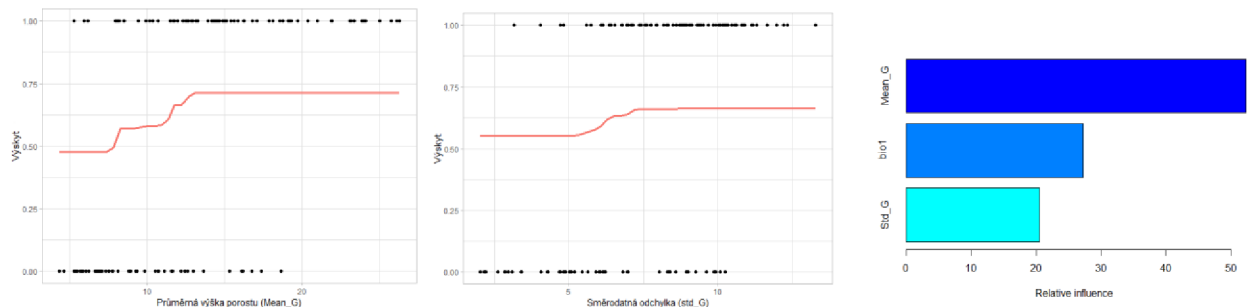
Příloha 20: Vliv proměnných na výskyt drozda brávníka z leteckého laserového skenování.



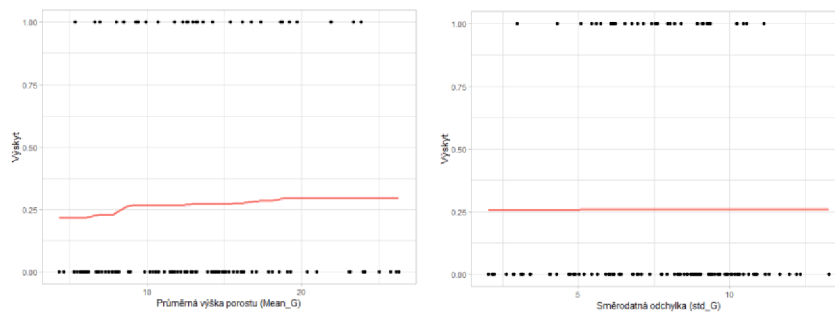
Příloha 21: Vliv proměnných na výskyt kachny divoké z mise GEDI.



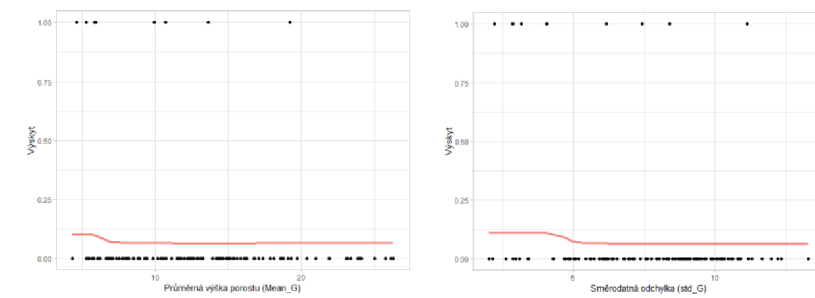
Příloha 22: Vliv proměnných na výskyt stehlíka obecného z mise GEDI.



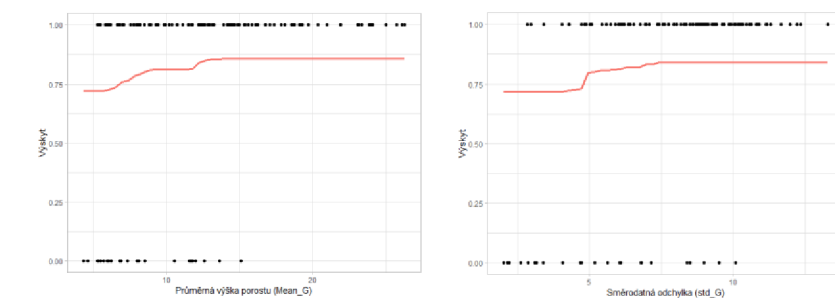
Příloha 23: Vliv proměnných na výskyt šoupálek dlouhoprstý z mise GEDI.



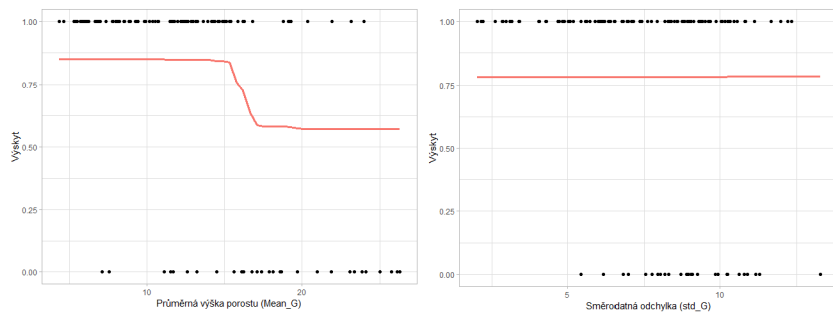
Příloha 24: Vliv proměnných na výskyt strakapouda prostředního z mise GEDI.



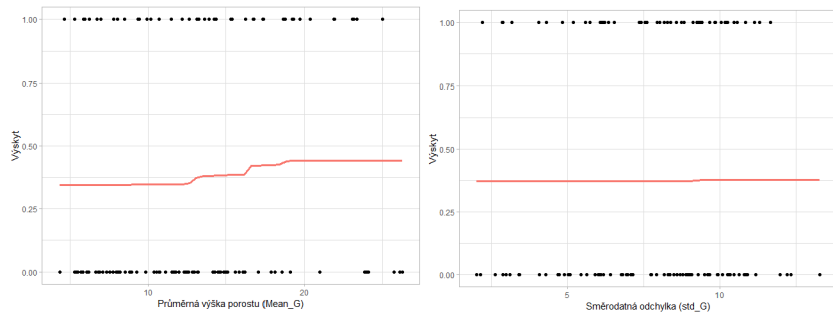
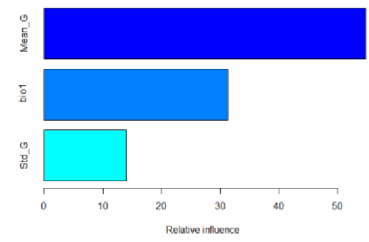
Příloha 25: Vliv proměnných na výskyt strakapouda jižního z mise GEDI.



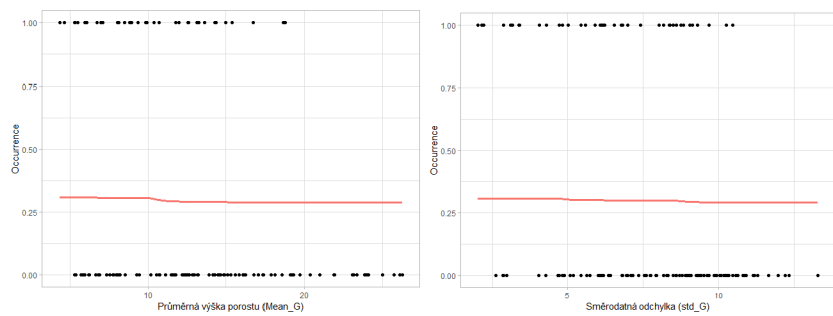
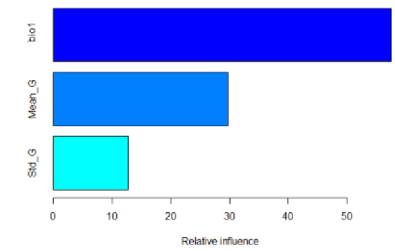
Příloha 26: Vliv proměnných na výskyt datla černého z mise GEDI.



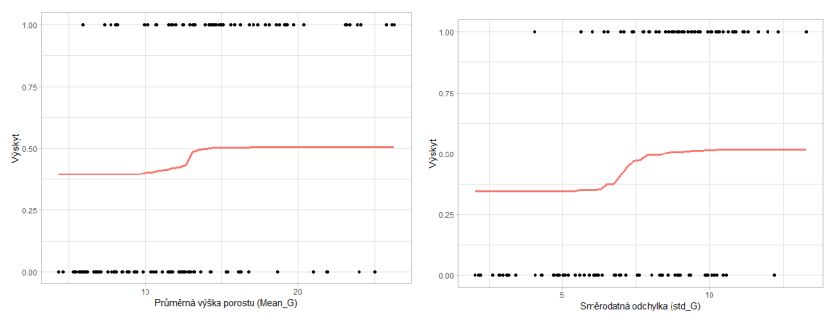
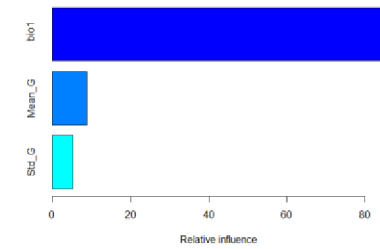
Příloha 27: Vliv proměnných na výskyt poštolka obecná z mise GEDI.



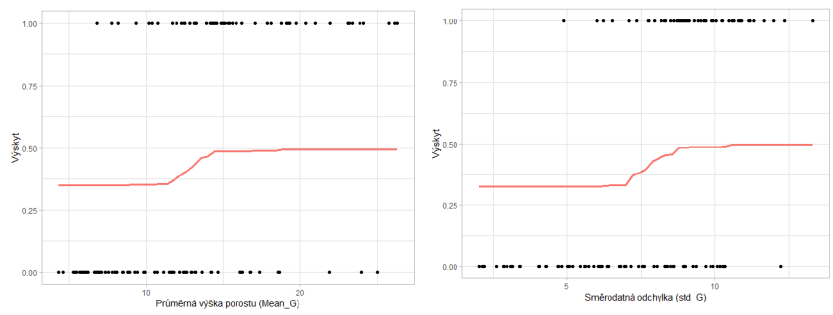
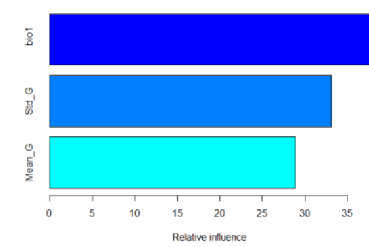
Příloha 28: Vliv proměnných na výskyt lejska bělokrkého z mise GEDI.



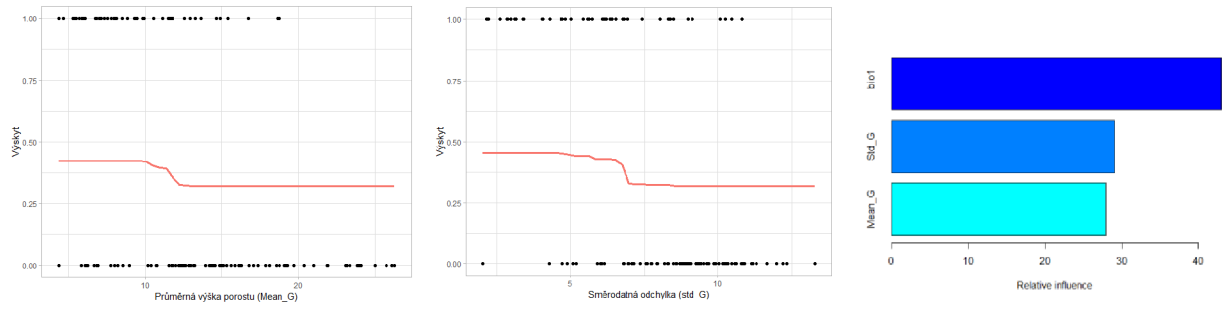
Příloha 29: Vliv proměnných na výskyt racka chechtavého z mise GEDI.



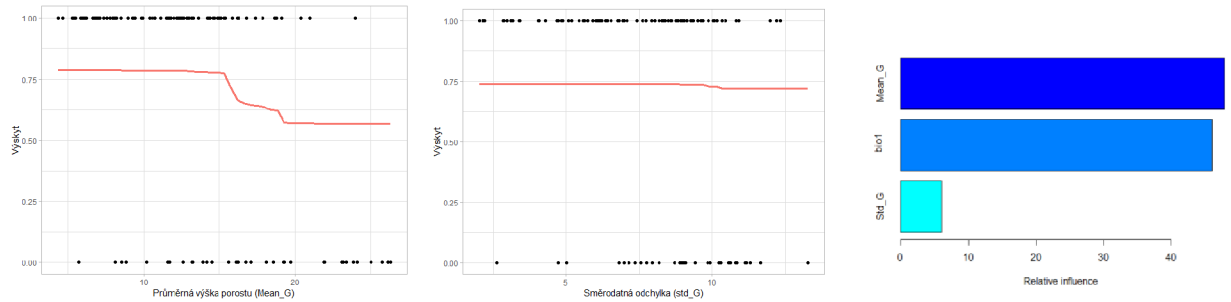
Příloha 30: Vliv proměnných na výskyt sýkory parukářky z mise GEDI.



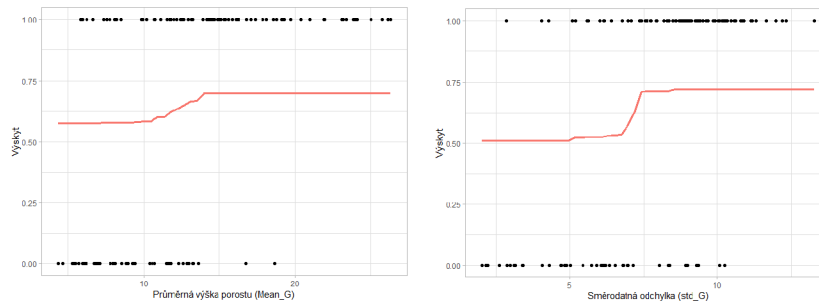
Příloha 31: Vliv proměnných na výskyt křivky obecné z mise GEDI.



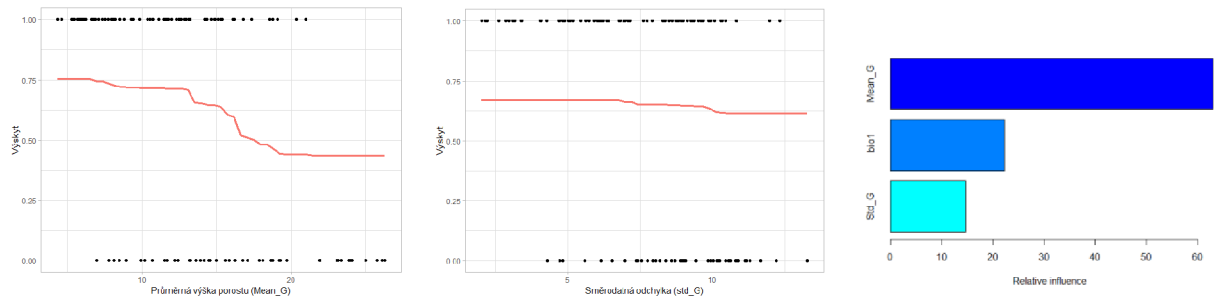
Příloha 32: Vliv proměnných na výskyt slavíka obecného z mise GEDI.



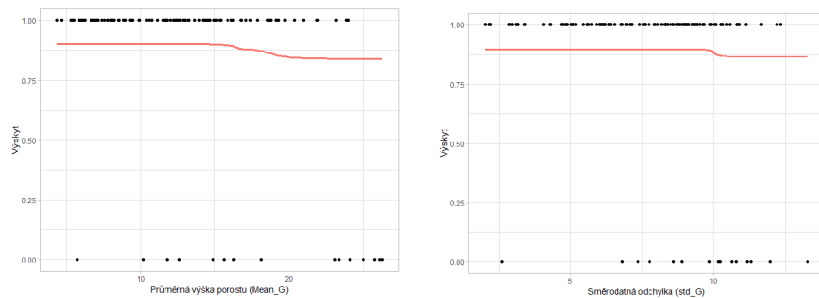
Příloha 33: Vliv proměnných na výskyt vrabce polního z mise GEDI.



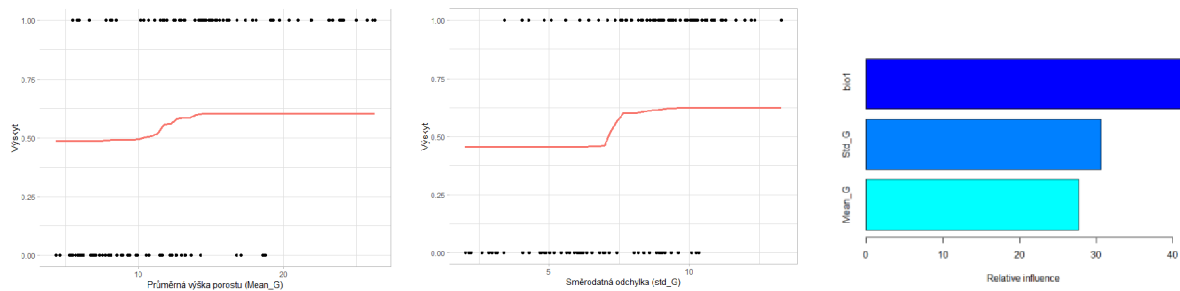
Příloha 34: Vliv proměnných na výskyt sýkory uhelníčka z mise GEDI.



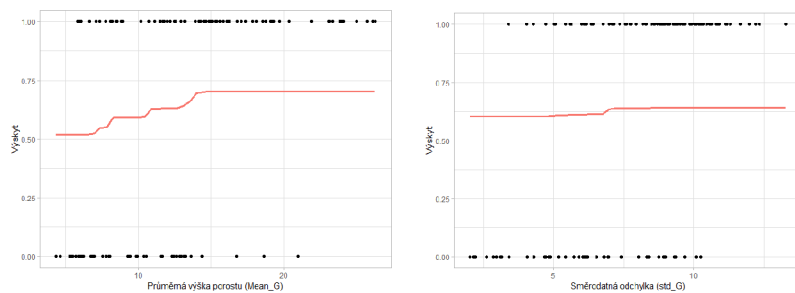
Příloha 35: Vliv proměnných na výskyt straky obecné z mise GEDI.



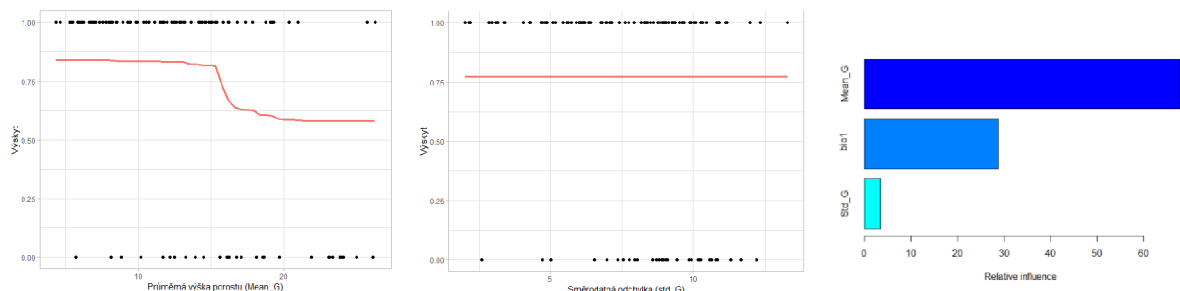
Příloha 36: Vliv proměnných na výskyt žluny zelené z mise GEDI.



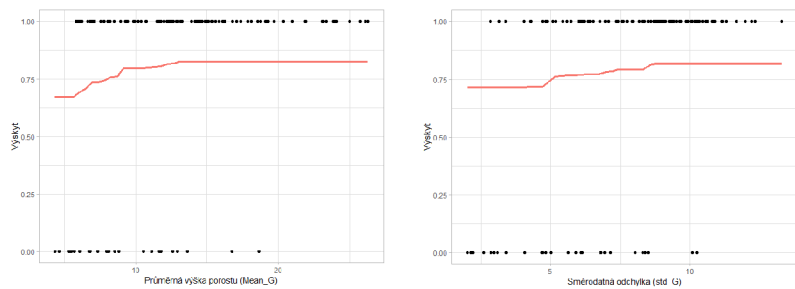
Příloha 37: Vliv proměnných na výskyt králíčka ohnivého z mise GEDI.



Příloha 38: Vliv proměnných na výskyt králíčka obecného z mise GEDI.



Příloha 39: Vliv proměnných na výskyt hrdličky zahradní z mise GEDI.



Příloha 40: Vliv proměnných na výskyt drozda brávníka z mise GEDI.