

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A
ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ**



**VLIV POZICE SLUNCE NA
VEGETAČNÍ INDEXY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. David Moravec, Ph.D.

Autor: Bc. Michal Kuchta

Studijní obor: Regionální environmentální správa

© ČZU Praha 2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Kuchta

Krajinné inženýrství
Regionální environmentální správa

Název práce

Vliv pozice slunce na vegetační indexy

Název anglicky

Solar position impact on vegetation indices

Cíle práce

Cílem práce je praktické ověření vlivu měnící se polohy Slunce na měření vegetačních indexů. Práce je reakcí na článek A green illusion, publikovaný v časopise Nature v roce 2014.

Metodika

1. Literární rešerše.
2. Snímání zvolené lokality ve dvou letových dnech pomocí UAV (dronu). U každého letového dne bude provedeno více letů v různou denní dobu. Dva letové dny zajistí měření v různých atmosférických podmínkách, během jasné a zatažené oblohy.
3. Výpočet spektrálních indexů pomocí vhodně zvoleného softwaru s následnou interpretací případných změn pozorovaných hodnot.
4. Porovnání výsledků s dostupnou literaturou.

Doporučený rozsah práce

40

Klíčová slova

A green illusion, dálkový průzkum země, vegetační indexy, NDVI, poloha Slunce

Doporučené zdroje informací

Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, and A. R. Huete. 1995. "A Review of Vegetation Indices." *Remote Sensing Reviews* 13 (1–2): 95–120.

Huete, Alfredo R., Kamel Didan, Yosio E. Shimabukuro, Piyachat Ratana, Scott R. Saleska, Lucy R. Hutyrá, Wenzé Yang, Ramakrishna R. Nemani, and Ranga Myneni. 2006. "Amazon Rainforests Green-up with Sunlight in Dry Season." *Geophysical Research Letters* 33 (6): 2–5.

Soudani, Kamel, and Christophe François. "Remote sensing: A green illusion." *Nature* 506.7487 (2014): 165.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. David Moravec, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2020

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2020

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Vliv pozice Slunce na vegetační indexy* vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji diplomovou 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 vědom, že odevzdáním diplomové 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 26. 6. 2020

Bc. Kuchta Michal

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidovi Moravcovi, PhD. za jeho ochotu a odbornou pomoc při přípravě a uskutečnění procesu získání dat, bez kterých by výzkum nemohl být uskutečněn. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za jejich podporu a trpělivost.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na vliv měnící se polohy Slunce na hodnoty vegetačních indexů. Práce je založena na nedávné kontroverzi vycházející z nečekaných výsledků dlouholetého satelitního průzkumu nad oblastí Amazonie.

Cílem je praktické ověření existence a míry těchto vlivů. Za tímto účelem bude provedeno snímání vybraného území s následným zpracováním získaných dat a výpočtu indexu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Snímání bude opakováno v různém čase během dne. Výsledné hodnoty z různých časů budou podrobeny vzájemnému porovnání. V případě výskytu signifikantních odchylek bude hledána jejich kauzalita vůči parametrům polohy Slunce v okamžiku snímání. Výsledkem práce budou hodnoty indexu NDVI pro vybrané typy ploch v různých časech. Práce by měla poukázat na možné ovlivnění hodnot vegetačních indexů v případech, kdy není brán zřetel na měnící se světelné podmínky.

Klíčová slova: zelená iluze, dálkový průzkum Země, NDVI, poloha Slunce

Abstract

This work is focused on the influence of the changing position of the Sun on the values of vegetation indices. The work is based on a recent controversy about the unexpected results of a long-term satellite survey over the Amazon forest.

The aim is a practical verification of the existence and extent of these effects. For this purpose, the selected area will be scanned with subsequent processing of the acquired data and calculation of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Scanning will be repeated at different times during the day. The resulting values from different times will be compared with each other. In case of any significant deviations, their causality to the parameters of the position of the Sun at the moment of sensing will be sought. The result of this work will be NDVI index values for selected surface types at different times. The work should point out possible influence on values of vegetation indices in cases where changing light conditions are not taken into account.

Key words: a green illusion, remote sensing, NDVI, Solar position

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce.....	2
3. Literární rešerše.....	3
3.1. Dálkový průzkum Země.....	3
3.1.1. Obecná definice.....	3
3.1.2. Historie.....	4
3.1.3. Základní princip.....	6
3.1.4. Praktické využití DPZ.....	8
3.2. Vegetační indexy.....	9
3.3. NDVI index, princip a jeho využití.....	10
3.4. A Green Illusion.....	13
3.4.1. Původ kontroverze.....	13
3.4.2. Výsledky pozorování.....	14
3.4.3. Interpretace výsledku a reakce na ni.....	15
3.4.4. A green illusion?.....	17
4. Výzkumná část.....	20
4.1. Metodický postup prací.....	20
4.2. Vymezení a charakteristika zájmového území.....	21
4.3. Provedení terénních prací.....	23
4.4. Analýza výsledků.....	26
4.4.1. Problém zpracování dat.....	26
4.4.2. Alternativní postup.....	27
4.5. Výsledky.....	32
5. Diskuse.....	40
6. Závěr.....	43
7. Zdroje.....	44
8. Přílohy.....	47
9. Seznam obrázků a příloh.....	53

1. Úvod.

Diplomová práce se zabývá problematikou vlivu změn pozice Slunce na měření vegetačních indexů. Práce je reakcí na kontroverzi vycházející z nečekaných výsledků dlouholetého satelitního průzkumu nad oblastí Amazonie. Koncepce tohoto průzkumu spočívala ve snímání reflektance (odrazivosti) slunečního záření od zemského povrchu a následného výpočtu vegetačního indexu EVI (Enhanced vegetation index). Cílem bylo dlouhodobé vyhodnocení stavu Amazonského ekosystému jako celku a jeho funkčních mechanismů. Snímání samotné probíhalo v letech 2000–2005 (Huete et al. 2006).

Shodou okolností v oblasti v roce 2005 proběhlo období abnormálního sucha, které mělo dle pozemních pozorování značně negativní dopad na lokální i globální stav vegetace v Amazonii. Vzhledem k těmto podkladům a dosavadním znalostem fungování amazonských pralesů se předpokládalo, že celá událost se adekvátně projeví na indexu EVI, vypočteného z dat v tomto období a poskytne souhrnná data změn struktury vegetace.

Data DPZ (Dálkového průzkumu Země), respektive indexu EVI, však vykazovala opak oproti původnímu předpokladu. Dle jejich interpretace celá oblast přestála suché období bez výrazných změn, v některých případech dokonce lokálně vykazovala nárůst zeleně. Bylo tedy usuzováno, že mechanismy amazonského pralesa jsou mnohem více komplikované, než se předpokládalo a jeho celková odolnost vůči stresovým faktorům, jako je nedostatek vody, je zřejmě výrazně vyšší (Huete et al. 2006; Saleska et al. 2007).

Závěry tohoto průzkumu vyvolaly v příslušných sférách značný ohlas. Postupem času bylo publikováno několik studií, zabývajících se analýzou získaných dat a jejich možné chybné interpretace. Jedna z posledních studií se zaměřila na změny vzájemné polohy zkoumané oblasti, snímacího senzoru a Slunce jakožto zdroje záření. Modely, z nichž studie vychází, ukazují, že získaná data jsou významně ovlivněna těmito faktory (Morton et al. 2014). Na základě této studie, publikované v roce 2014 v časopise Nature, je založena i tato diplomová práce.

2. Cíle práce.

Publikovaná studie, z níž diplomová práce vychází, je založena na vytvoření matematických modelů a trojrozměrných simulací. Cíl práce spočívá v praktickém provedení snímání vybraného území pomocí UAV za různých světelných podmínek, respektive opakovanému letovému průzkumu v rámci jediného dne. Smyslem je pokusit se o simulaci procesu, ke kterému došlo v roce 2000 – 2005 při snímání v Amazonii. Následnou analýzou získaných dat se vypočte vybraný vegetační index. Porovnáním indexů vypočtených za jednotlivé lety se vyhodnotí stálost výsledků a jejich případné ovlivnění změnou polohy Slunce.

3. Literární rešerše

3.1. Dálkový průzkum Země

3.1.1. Obecná definice

V rámci odborných publikací, věnujících se oblasti Dálkového průzkumu Země, bylo ustanoveno mnoho definic, z nichž lze odvodit základní koncepci dálkového průzkumu. Dle ní lze dálkový průzkum interpretovat jako „získávání informací na dálku“ (Campbell a Wynne, 2011). Tato jednoduchá definice v sobě obsahuje podstatnou informaci, že k získání dat není třeba fyzického kontaktu se zkoumaným předmětem. V podstatě tak lze za dálkový průzkum označit i každodenní lidské vnímání okolního světa pomocí zraku a sluchu, kdy smyslové orgány představují snímače a lidský mozek počítač zpracovávající a vyhodnocující získaná data (Wang a Weng, 2014). V rámci oboru dálkového průzkumu Země je však taková definice příliš obecná. Pro lepší představu je možno uvést definici z publikace Introduction to Remote Sensing, ve které je dálkový průzkum definován následovně:

„Dálkový průzkum je činnost získávání informací o zemském povrchu, využívající elektromagnetického záření v rámci jednoho či více typů elektromagnetického spektra, odraženého nebo emitovaného ze zemského povrchu“ (Campbell a Wynne, 2011)

Jedná se tedy o vědu a umění získávání informací o předmětu, oblasti nebo jevu prostřednictvím analýzy dat získaných zařízením, které není v kontaktu s předmětem, oblastí nebo zkoumaným jevem. Sbíraná data mohou být mnoho podob, včetně variací v rozložení síly, akustických vln nebo elektromagnetické energie (Lillesand, Kiefer a Chipman, 2015). Proces vyžaduje senzory, umístěné například v dronech, letadlech či satelitních platformách. Dále je potřeba nosného média pro přenos samotných informací. Dle využívaného média lze dálkový průzkum rozdělit na satelitní dálková snímání pro satelitní platformy, fotogrammetrický průzkum při zaznamenání viditelného světla, tepelná dálková snímání v případě infračerveného záření, radarové a radiové skenování u použití mikrovlnných vlnových délek a snímání LiDAR (Light detection a ranging), které využívá stanovení doby návratu laserového paprsku odraženého od zemského povrchu (Wang a Weng, 2014)

3.1.2. Historie

Vzhledem k faktu, že dálkový průzkum je zaměřen na získávání a analýzu dat zemského povrchu, je možné za prvopočátky tohoto oboru označit počátky fotogrammetrie (Campbell a Wynne, 2011). Za zakladatele fotogrammetrie je považován francouzský kartograf a zeměměřič Aimé Laussedat, který krátce po vynálezu technologie fotografování začal využívat snímky k měřickým účelům. V této době se jednalo výhradně o pozemní metody snímkování, kdy pořízené snímky sloužily například k určení polohy fotografovaných objektů průsekovou metodou. S příchodem možnosti létání byla fotogrammetrie následovně využívána k leteckému snímkování (Böhm 2002).

Opravdový rozmach dálkového průzkumu v podobě letecké fotogrammetrie pak přichází v době první světové války. S uvědoměním obrovského potenciálu pro mapovací a výzvědné účely došlo k rychlému vývoji snímacích zařízení i vyhodnocovacích přístrojů. Samotný proces snímkování však byl stále na nízké úrovni, kdy každý snímek musel být pořízen manuálně posádkou letadla. K úpravám kamer specificky k použití k leteckému snímkování dochází až v meziválečném období (Campbell a Wynne 2011)

V průběhu druhé světové války dochází k značnému nárůstu možností využití leteckého snímkování, které se jeví jako klíčové vojenské aktivum (Fischer 2019). Využití elektromagnetického spektra se rozšířilo od pouze viditelného světla k záření lidskému oku neviditelné. Především se jednalo o záření infračervené a mikrovlnné, které mohlo být využito například k odhalení maskování nepřítele na zemském povrchu. Válečný vývoj přinesl prudký posun vpřed, z lokálních měření terénu první světové války se z dálkového průzkumu stala činnost se schopností výrazně ovlivnit průběh vojenských operací hluboko v nepřátelském území. Postupně byl rozpoznán enormní potenciál těchto technologií i mimo sféru vojenského užití, nicméně pro jeho naplnění nebyly zkušenosti a ve světovém konfliktu ani potřebný prostor (Campbell a Wynne 2011).

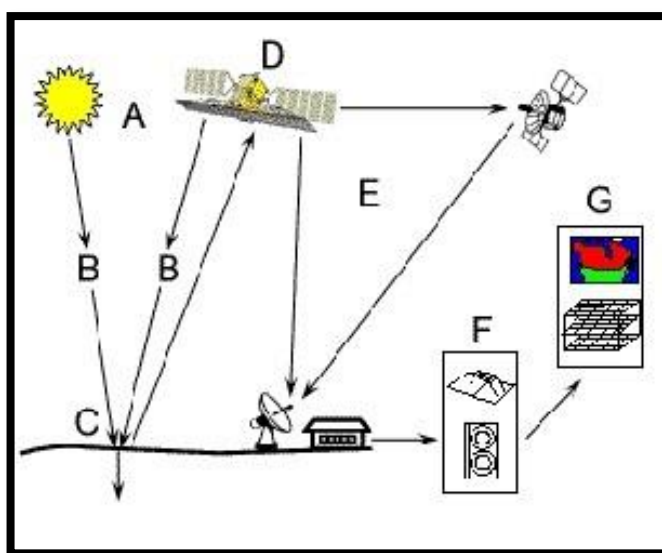
V období studené války zájem o dálkový průzkum značně vzrostl. Povaha konfliktu mezi Spojenými státy a Sovětským svazem zapříčinila, že letecké snímkování se stalo jednou z mála spolehlivých metod získávání informací. To vyústilo ve vývoj nových optických systémů a speciálních leteckých platform, používaných následně pro špionáž (například letadla U2). Oblast využití byla navíc rozšířena i mimo armádní sektor, například pro civilní topografická mapování či geologické průzkumy. Jako příklad lze uvést práci Roberta Colwela, který roku 1956 použil infračervený film k identifikaci chorob drobnozrnných obilovin a dalších problémů v agroprůmyslu (Fischer 2019; Campbell a Wynne 2011). Nové metody a pokročilé metody snímkování vedly k ustanovení samostatného pojmu „dálkový průzkum“ v roce 1960. Dříve byly tyto činnosti souhrnně označovány jako letecké fotografování, což byl termín dostatečně nevystihující úroveň tehdejšího snímkování (Baumann 2009).

K zásadním inovacím na poli dálkového průzkumu došlo v průběhu šedesátých a sedmdesátých let. Spočíval v celkovém rozvoji výpočetní techniky, z analogových snímků se tak začínají více prosazovat snímky digitální. Další inovací byla změna primární platformy nosičů snímacích zařízení z letadel na satelitní systémy. Tyto systémy byly schopny pokrýt nepoměrně větší území, navíc s možností pravidelně opakovaných pozorování. Snímání z orbity bylo využito například v americkém špionážním programu CORONA. V roce 1972 byl na zemskou orbitu vyslán Landsat, první satelit specificky upravený pro systematické zkoumání zemského povrchu v několika úrovních elektromagnetického spektra. Navzdory poměrně nízkému rozlišení se jednalo o průlom, který nejenom přinesl nové poznatky v mnoha oborech, ale také zvýšil podvědomí o těchto technologiích, což přispělo dalšímu rozvoji.

Počátkem osmdesátých let přišla druhá generace nástrojů snímací techniky, umožňující pořízení snímků s prostorovým detailem v řádu 30–10 m. V průběhu let devadesátých pak bylo dosaženo prostorového rozlišení v hodnotách 1 m a podrobnější. Se současným vývojem Geografických informačních systémů (GIS), v rámci kterých bylo možno pořízená data podrobit detailním analýzám, bylo dosaženo nových metod pracovních postupů napříč obory. Dnes je systém dálkového průzkumu Země mnohem vyspělejší, nicméně počátky v podobě programu CORONA či Landsat jsou stále patrné (Baumann 2009; Campbell a Wynne 2011).

3.1.3. Základní princip

Princip procesu dálkového průzkumu Země (dále jen „DPZ“) je založen na využití snímacích senzorů umístěných na palubách letadel, satelitů, případně bezpilotních systémů. Jak již bylo řečeno, tyto senzory nejsou v přímém fyzickém kontaktu se snímaným objektem a pro zaznamenání informací je potřeba přenosného média v podobě elektromagnetického záření. Výstupem zaznamenaných informací jsou nejčastěji digitální snímky, přičemž pro dosažení požadovaných výsledků je obvykle zapotřebí dalších analýz získaných dat (Wang a Weng 2014). Základní průběh procesu je znázorněn na následujícím obrázku („Fundamentals of Remote Sensing – Introduction“ 2015):



Obrázek 1: Proces funkce DPZ (Fundamentals of Remote Sensing 2015)

- A. **Zdroj energie** – základním předpokladem pro uskutečnění procesu je zdroj elektromagnetického záření, například Slunce či zdroj umístěný na nosiči senzoru
- B. **Interakce záření s atmosférou** – ovlivnění záření při jeho průchodu atmosférou, vliv se mění v závislosti na typu snímaného záření
- C. **Kontakt se zkoumaným předmětem** – po průchodu atmosférou dochází ke kontaktu s objektem zájmu (povrchu), dochází k jeho odrazu či vyzáření
- D. **Zaznamenání informace snímači** – odražené záření obsahující požadovanou informaci je zaznamenáno snímačem na nosném zařízení

- E. **Přenos a příjem zaznamenaných dat** – zaznamenaná data jsou v digitální formě přenesena do stanice umístěné na povrchu, kde následně dojde k jejich zpracování
- F. **Analýza a zpracování** – vyhodnocení zaznamenaných dat snímaného objektu, umožnění jejich dalšího použití
- G. **Aplikace vyhodnocených dat** – konečná část procesu DPZ, aplikace výsledků pro další analýzy, například na poli Geografických informačních systému (GIS)

Celý princip je tedy založen na ozáření zájmového prostoru či objektu elektromagnetickým zářením, skládající se z elektrického a magnetického pole. Zdrojem však nemusí být nutně sluneční záření. V podstatě jakákoliv forma odražené energie od zemského povrchu lze zaznamenat a interpretovat do obrazové podoby. Lze tak využít záření se zdrojem na samotném nosiči senzoru, například při radarovém snímání či laserovém skenování, anebo zaznamenat energii vyzařující ze zemského povrchu jako takového ve formě tepla (Richards 2012)

V závislosti na zdroji záření je možné rozdělit snímače na dva základní druhy, a to pasivní a aktivní. Pasivní snímače fungují na principu registrace záření emitované Sluncem, tedy snímají sluneční energii. Pasivním snímačem je například fotografická kamera, přijímající viditelné světlo či tepelné snímače. Vzhledem ke skutečnosti, že pasivní snímače fungují na základě slunečního záření, je možné je používat pouze ve dne, respektive v době, kdy je zkoumaný objekt ozářený. Aktivní snímače naproti tomu využívají vlastní zdroj záření, který je umístěn na nosiči. Jedná se například radarové snímání či laserové skenování LIDAR. Oproti pasivním snímačům mohou být použity nezávisle na denní době, navíc poskytují možnost optimálního nastavení vysílaného záření (Wang a Weng 2014).

Detail snímání záleží na prostorovém rozlišení daného senzoru, které vychází zejména z úhlu záběru (IFOV), což je v podstatě pomyslný kužel viditelnosti mezi snímačem a viditelnou plochou v daném okamžiku. S vyšší vzdáleností pak narůstá možný rozsah snímání na úkor prostorového rozlišení. Na zemské orbitě v současnosti funguje mnoho systému DPZ různých funkcí a prostorového rozlišení, jako nejvýznamnější lze uvést systémy Landsat, IKONOS, SPOT, QuickBird, IRS a meteorologické družice (Fiala a Jedlička 2010).

3.1.4. Praktické využití DPZ

Dle předchozích kapitol lze logiky odvodit hlavní výhody užití systémů DPZ v praxi – možnost zkoumat prakticky celou planetu, přičemž kvantita a typ získaných dat závisí na použitém snímacím senzoru a nosném zařízení. Nosnými elementy dnes mohou být od těch nejjednodušších autonomních křidel až po komplexní satelitní systémy. Snímací zařízení dnes zastupuje variace digitálních kamer vysokého rozlišení, multispektrální, hyperspektrální a termální snímače, případně radarové a laserové systémy. Celkový potenciál je tak obrovský, a to jak pro vědecké obory, tak pro využití širokou veřejností (Lillesand, Kiefer a Chipman 2015).

Jako příklad využití dat DPZ veřejností lze uvést službu Google Earth, která byla uvedena v provoz roku 2005 a je určena široké veřejnosti. Přístup k datům je jednoduchý, založený na běžných principech internetového vyhledávače Google. Uživatel tak může službu plně využívat bez nutnosti vědeckého vzdělání (Campbell a Wynne 2011). Hlavní přínos je ovšem stále zejména na úrovni vědeckých výzkumů, jako je snímání zemského povrchu a reliéfu, mapování LAND USE/LAND COVER, geologická a pedologická mapování, zkoumání vegetačních pokryvů a ekosystémů, monitoring sucha a vodních zdrojů, meteorologie, využití v zemědělství atd. (Lillesand, Kiefer, a Chipman 2015; Wang a Weng 2014).

Tato práce je zaměřena na problematiku vegetačních indexů, které souvisí s využitím DPZ v rámci monitorování vegetačního pokryvu. Podrobnější popis možností systému DPZ by tak byl v rámci rozsahu práce příliš zdlouhavý, proto bude od něj upuštěno. Velmi podrobné uvedení do problematiky DPZ poskytují zdroje citované v této kapitole. Popis principu fungování vegetačních indexů a problematika spojená s tématem této diplomové práce je popsána v následujících kapitolách.

3.2. Vegetační indexy

Zásadní role vegetace a jejich biochemických cyklů ve stavu a funkci světového klimatu je dnes již všeobecně známa. Pro výzkum této problematiky jsou však nezbytné jak fyzikální, tak fyziologické parametry vegetací. K získání takových dat je dnes již možné využít právě systémů DPZ (Myneni et al. 1995). Možnosti získávání informací přitom nejsou omezeny pouze na základní data, jako je výskyt či kvantita daného pokryvu. S dnešní technologií je možné získat i data o druhu pokryvu, jeho stavu, růstu a celkové dynamice. Takové informace jsou značně přínosné nejen pro výše zmíněná studia, ale i pro monitorování stavu životního prostředí a hodnocení biodiverzity různých lokalit (Xue a Su 2017).

V této sféře využívání systémů DPZ byly vyvinuty tzv. vegetační indexy. Jedná se o způsob zpracování získávaných dat pro kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení vegetačního pokryvu. Základní princip je založen na měření spektrální odrazivosti (reflektance) od zemského povrchu (Bannari et al. 1995). Zejména se využívá oblastí ultrafialového záření, viditelného světla a blízkého až středního pásma infračerveného záření (Bin Abdul Rahim et al. 2016). Spektrální odrazivost je určována různými faktory, jako jsou samotné typy vegetací dané lokality a jejich barvy, vlhkosti prostředí, půdní charakteristiky a další environmentální efekty. Velký vliv na měření má i časový aspekt, přinášející rušivé elementy v podobě měnících se světelných podmínek, stínů a atmosférických parametrů v lokalitě (Bannari et al. 1995).

První typy indexů byly definovány již v roce 1972 a využívaly surových satelitních číselných dat, bez zahrnutí atmosférických korekcí či kalibrace senzoru. Jednalo se o index RVI (Ratio Vegetation Index) a VIN (Vegetation Index Number), přičemž způsob jejich výpočtu byl následující:

- $RVI = R/NIR$
- $VIN = NIR/R$

kde R = „Red“ / odrazivost v červené viditelné části spektra a NIR = „Near InfraRed“ / odrazivost v pásmu blízkého infračerveného záření. Indexy zvyšovaly kontrast mezi vegetací a holou půdou, což umožňovalo monitorovat stav vegetačního pokryvu. Tyto indexy však byly citlivé vůči atmosférickým podmínkám a

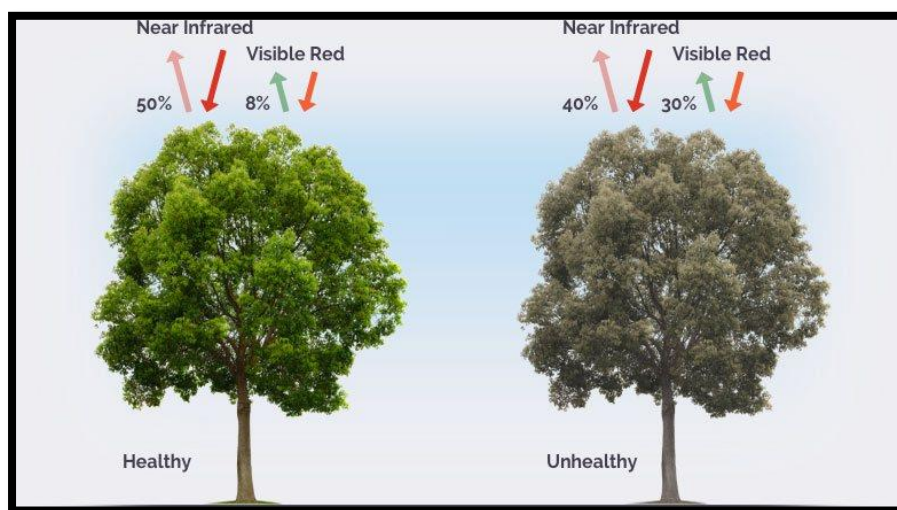
projevovala se i slabá rozlišovací schopnost v případech, kdy byl vegetační pokryv méně hustý. Vegetačních indexů je dnes definováno více jak 100 typů, přičemž způsob výpočtu a vstupní parametry se různí. Každý vegetační index má tak své přednosti a nevýhody, některé jsou přímo uzpůsobeny konkrétním vědeckým účelům. Stále více se také prosazuje jejich využití pomocí malých bezpilotních systémů (UAV) oproti satelitním nosičům. Navzdory pokročilým technologiím však stále není znám jednotný matematický výraz, který by univerzálně definoval všechny vegetační indexy, a to díky složitosti kombinací světelného záření, rozlišovacích schopností a použitých snímacích platform (Bannari et al. 1995; Xue a Su 2017).

3.3. NDVI index, princip a jeho využití

V diplomové práci je nezbytné blíže popsat vegetační index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), neboť právě tento typ indexu byl využit v rámci výzkumné části práce. NDVI je v současnosti jeden z nejvíce využívaných vegetačních indexů vůbec. (Xue a Su 2017). Jedná se o normalizovaný numerický ukazatel využívající blízkého infračerveného záření a viditelné části spektra a jeho primární účel je analýza zeleně, respektive zda snímaný cíl obsahuje živou vegetaci či nikoliv. První užití NDVI proběhlo v roce 1973 a jeho základní princip je založen na vztahu vegetace vůči dopadajícímu slunečnímu záření (Tiwari, Awasthi, a Rajan 2018).

Za předpokladu, že je rostlina zdravá a není nijak narušena, její pigment v podobě chlorofylu silně pohlcuje viditelnou část spektra slunečního záření (0,4 – 0,7 μ m) jakožto zdroje energie pro proces fotosyntézy. Buněčná stavba listů zase má za následek silnou odrazivost blízkého infračerveného záření (0,7 – 1,1 μ m). Vegetace se tak v těchto různých vlnových délkách jeví odlišně. V případě viditelného světla jsou plochy pokryté vegetací temné až černé, plochy bez vegetace naopak světlé. Blízké infračervené záření zobrazí plochy pokryté vegetací světleji oproti plochám bez vegetačního pokryvu. Porovnáním výsledků snímání odrazu obou vlnových délek pro danou lokalitu lze tak určit relativní množství vegetace, případně jejího zdravotního stavu (Jeeva et al. 2016).

Stručně řečeno – zdravá vegetace pohltí většinu viditelného světla, které na něj dopadá a odráží většinu blízkého infračerveného záření. A naopak, nezdravá vegetace odráží více viditelného světla, zatímco infračervení pohlcuje. V případě povrchu bez vegetačního pokryvu je odrazivost v obou částech elektromagnetického spektra nízká (Holm, Burnside, a Mitchel 1987). Princip je graficky znázorněn na obrázku 2.



Obrázek 2: Princip fungování NDVI (Earth Observing System 2020)

Samotnou hodnotu indexu pro dané místo získáme již zmíněným porovnáním obou vlnových délek, tzn. jejich rozdílem:

- $NDVI = NIR - RED$

kde RED = „Red“ / odrazivost v červené viditelné části spektra a NIR = „Near InfraRed“ / odrazivost v pásmu blízkého infračerveného záření. Pokud by však byl výpočet proveden pouze v takto jednoduché formě, mohlo by dojít k situaci, kdy by dvě vegetace identického stavu měly rozdílné hodnoty indexu. Stalo by se tak v případě, kdy by jedna z nich byla slunečnímu záření vystavena přímo, zatímco druhá byla zakryta oblačností. Přímou osvětlená vegetace by vždy měla vyšší hodnotu indexu, navzdory jejich identickému stavu. Eliminace takového jevu je dosaženo dělením výsledného rozdílu obou hodnot jejich vzájemnou sumou (Tiwari, Awasthi, a Rajan 2018). Konečný vzorec indexu NDVI je tedy:

- $NDVI = (NIR - RED / NIR + RED)$

Využití RED části viditelného spektra je dáno skutečností, že právě červená část vykazuje nejsignifikantnější rozdíly oproti NIR. Výsledné hodnoty indexu se pohybují v rozmezí hodnot od -1 do 1 a jejich základní interpretace je velmi snadná – čím vyšší číslo, tím je vegetace hustší nebo zelenější. Obecně tak záporné hodnoty indikují vodní plochy, hodnoty pohybující se kolem 0 reprezentují holé plochy nebo s minimálním vegetačním pokryvem, pokryté sněhem či plochy zastavěné. Hodnoty blíží se 1 představují hustou vegetaci, například pralesy. Hodnoty jsou zároveň úzce spjaty s fotosyntetickou aktivitou rostlin. Pokud tedy známe skutečný kvantitativní stav vegetačního pokryvu, můžeme na základě hodnot NDVI hodnotit jejich skutečnou aktivitu, respektive zdravotní stav (Pettorelli et al. 2011).

Využití indexu NDVI je široké, v současnosti se jedná o nejčastěji využívaný vegetační index. Mimo hodnocení množství biomasy a jejího stavu je možné použití pro hodnocení environmentálních či klimatických změn, predikci sucha či přítomnosti povrchové vody, degradace půd, včasné odhalení hrozeb v zemědělství nebo i managementu volně žijících zvířat. Jeho základní koncept v poslední době nachází stále nové způsoby využití nad rámec jeho původního určení (Pettorelli et al. 2011; Jeeva et al. 2016; Xue a Su 2017; Tiwari, Awasthi, a Rajan 2018). Jeho slabinou je však citlivost vůči barvě a jasů jednotlivých druhů půd, atmosférickým podmínkám a vlivu stínů. Výpočty tak vyžadují i kalibrační údaje pro co nejpřesnější výsledky (Xue a Su 2017). Právě citlivost indexu vůči stínům způsobených zdrojem záření je hlavním tématem této diplomové práce.

3.4.A Green Illusion

Téma diplomové práce vzniklo na základě nedávné kontroverze ohledně výsledků satelitních pozorování amazonských pralesů. Konkrétně se jedná zejména o článek „A Green illusion“ (Soudani a Francois 2014), jež byl publikován v časopise Nature a který souhrnně popisuje dané události. Následující kapitola se zabývá touto kontroverzí jakožto výchozího bodu pro praktický výzkum.

3.4.1. Původ kontroverze

V období let 2000 až 2005 proběhla v oblasti amazonských pralesů rozsáhlá analýza vegetace za účelem hlubšího poznání přírodních procesů a celkové dynamiky pralesa, jakožto přírodního prvku se zásadním vlivem na globální klima či cyklus vody nebo biogenních prvků. Dle autorů dané studie jsou tyto procesy stále nedostatečně pochopeny a jejich plné poznání je v dnešní době úbytku a ničení deštných pralesů nezbytné pro jejich záchranu (Huete et al. 2006).

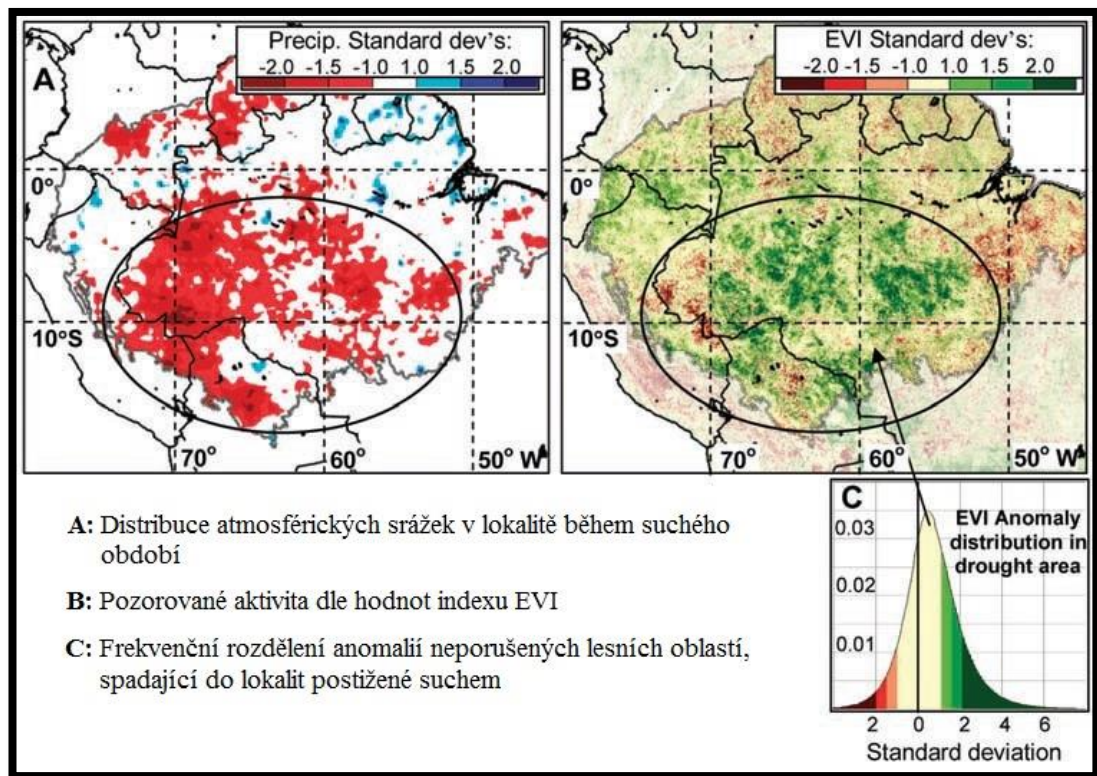
Pro měření byl použit spektroskop středně velkého rozlišení (MODIS), využitým vegetačním indexem byl tzv. vylepšený vegetační index EVI (Huete et al. 2006). Tento index se skládá z parametrů listové plochy a obsahu chlorofylu. Jsou-li správně použity korekce pro odstranění vlivu mraků a atmosférického aerosolu, sleduje změny fotosyntetické aktivity rostlin (Saleska et al. 2007). Vycházelo se přitom ze skutečnosti, že předchozí studie zabývající funkcemi tropických pralesů vycházely z fenologických jevů rostlin a jejich podnětů. Doprovodné jevy v podobě změn biomasy listů nebyly brány dostatečně v potaz. Právě obměny a přírodní procesy listů však mají zásadní roli při energetických výměnách ve vegetační atmosféře (Myneni et al. 2007).

V Amazonii roku 2005 došlo k rozsáhlému suchu. Jednalo se o první takovou klimatickou anomálii od uvedení senzoru MODIS do provozu (1999). Toto suché období se tak stalo jedinečnou příležitostí zjistit skutečné reakce neporušené pralesní vegetace na nedostatek vody v tak velkém měřítku. Předmětem zájmu byly zejména oblasti neporušené antropickou aktivitou, mající katastrofální dopad na funkci tohoto ekosystému (Saleska et al. 2007)

3.4.2. Výsledky pozorování

Komplexní analýza prokázala, že v oblasti převládá suchá sezóna. Na základě dřívějších poznatků o vegetačních procesech byla logicky očekávána negativní reakce. Tedy že nedostatek vody bude pro vegetaci omezující, sníží se celková transpirace a fotosyntetická aktivita bude nižší. To se očekávalo zejména v době kulminace sucha v období od července do září. V tomto období je i za obvyklých podmínek atmosférických srážek minimum. Výsledná data však ukazovala proces opačný, pozorované plochy se jevily buď bez výrazných změn, nebo dokonce „zeleněji“ oproti dosavadnímu stavu (Huete et al. 2006; Saleska et al. 2007).

Index EVI ukazoval v oblasti zvýšenou aktivitu, přičemž k nejvyšším hodnotám došlo paradoxně v kulminaci suchého období, kdy jednalo o hodnoty s nárůstem 25 % oproti normálu. Dle prvotního předpokladu se jevila aktivita v oblastech pastvin, kdy se hodnoty pohybovaly naopak s 25% ztrátou jakožto přirozenou reakcí na stres z nedostatku půdní vlhkosti (Huete et al. 2006). Hodnoty indexu EVI pro celé území je přehledně reprezentován na následujícím obrázku. Jak je patrné, na značné části území dochází k zvýšení aktivity vegetace:



Obrázek 3: Amazonie - index EVI v roce 2005 (Saleska et al. 2007)

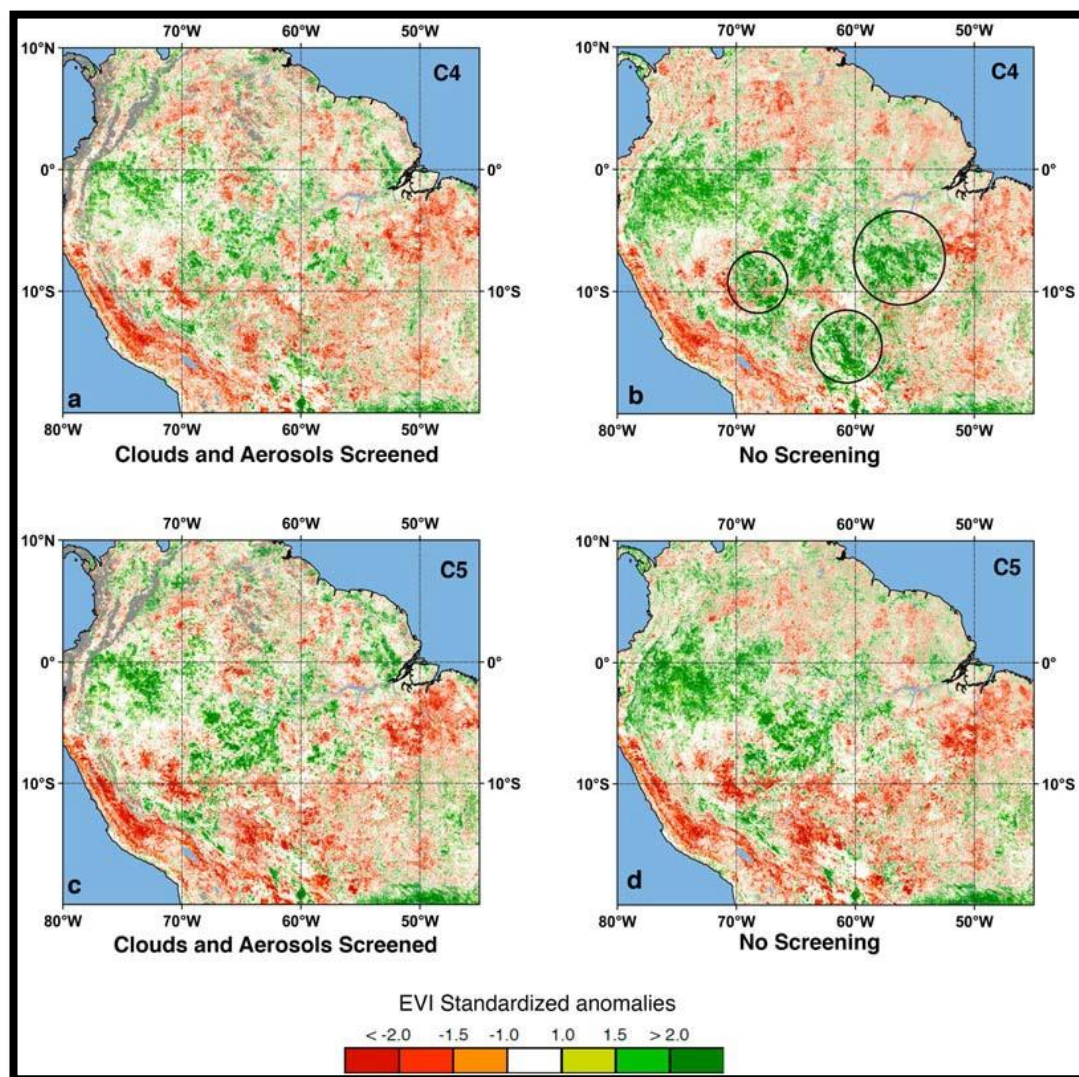
3.4.3. Interpretace výsledku a reakce na ni

Autoři pozorování přišli s několika teoriemi pro toto neočekávané navýšení aktivity. Jako nejjednodušší vysvětlení se jevila možnost, že dosavadní výzkum zkrátka nepopsal veškeré fyziologické procesy deštných pralesů, anebo že tyto procesy byly nesprávně pochopeny (Huete et al. 2006). Dalším možným vysvětlením bylo, že krátkodobé sucho nemá limitující účinek pro neporušenou vegetaci pralesa. Toto vysvětlení bylo založené na teorii, že hluboce kořenicí stromy dosáhnou k zásobám podzemních vod suchu navzdory. Vyšší distribuce slunečního záření pak naopak podpoří jejich aktivitu a výměnu listů. Tato teorie byla podporována skutečností, že v oblastech savan, pokrytých vegetací s mělkými kořeny, došlo k předpokládanému úbytku aktivity (Myneni et al. 2007).

Pozorování tedy poukázala na to, že amazonské pralesy mohou být mnohem odolnější, než předpokládaly mnohé ekologické modely, alespoň pokud jde o krátkodobé stresové události. Zvýšená aktivita podle autorů vyplývá z vyšší dostupnosti slunečního záření, která se dle jejich závěru jeví jako stěžejní limitující faktor, a z možného hydrologického přerozdělování dostupné vody ve vegetaci. Dostupnost vody je dle nich méně důležitým faktorem. Pro budoucí pozorování doporučili zaměřit se na reakce vegetace vůči dlouhodobějšímu suchu (Saleska et al. 2007)

Tyto závěry se neobešly bez odezvy. V roce 2010 Samanta et al. poukázali na značnou nesrovnalost mezi jednotlivými zprávami o reakci amazonské vegetace na toto suché období. Z hlediska pozemních studií a pozorování bylo hlášeno snížení růstu stromů a jejich vyšší úmrtnost. Se suchem také souvisela vyšší četnost požárů biomasy v oblasti. To ovšem byl přesně opačný stav oproti výsledkům satelitních pozorování, poukazující na zlepšení celkového stavu. Autoři si tedy dali za primární úkol najít odůvodnění tohoto nesouladu a sladit výsledky jednotlivých pozorování. Zaměřili se přitom na možné ovlivnění indexu EVI oblačností a vzdušným aerosolem. Právě vzdušné aerosoly jsou v oblasti rozšířené díky spalování biomasy a celkové zatížení bylo v suchém období roku 2005 vyšší. Zároveň je tato oblast charakteristická častým výskytem oblačností, a to i v případech celkového sucha.

Za tímto účelem využili s původními daty i data nová, pořízená z delšího časového období (2000-2008) a zejména vylepšeným systémem algoritmů vstupních dat pro filtrování vnějších atmosférických vlivů. Tato data opět podrobili výpočtu indexu EVI, zahrnuli dodatečnou filtraci atmosférických vlivů a následně vzájemně porovnali. Výsledky tohoto srovnání jsou patrné na následujícím obrázku:



Obrázek 4: Porovnání původních a nových dat (Samanta et al. 2010)

Horní dvojice obrázků (C4) představuje data původní, respektive původní index EVI. Dolní dvojice (C5) představuje data pořízená dle vylepšených korekčních algoritmů. Levý sloupec pak obsahuje data s filtrací atmosférického aerosolu a oblačnosti, pravý bez dodatečné filtrace. Skupina C5 zůstává v oblastech postižených suchem stejná, nebo jen s minimální odchylkou. V případě skupiny C4 je pozorována výrazná změna. Výsledky se zde shodují s původními závěry – dochází k výraznému zvýšení aktivity.

Dle této skutečnosti autoři konstatovali, že výsledky předchozích studií jsou výrazně ovlivněny oblačností a aerosoly, díky čemuž došlo k chybné interpretaci dat. Ke zvýšené aktivitě vegetace díky slunečnímu záření dle jejich závěru nedochází a vegetace v tomto období zůstala konstantní (Samanta et al. 2010).

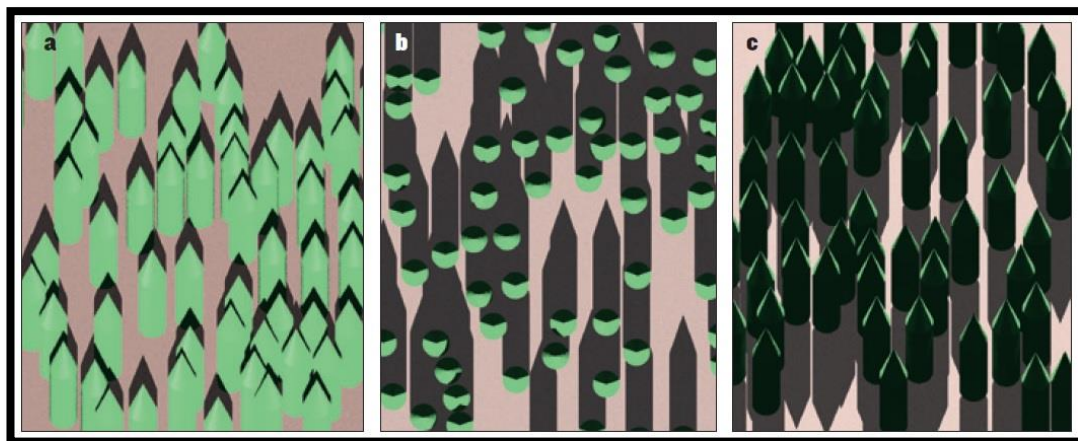
S takovým vysvětlením se ztotožňuje i navazující studie z roku 2012, která různými způsoby analyzovala nová data za celé pozorovací období v letech 2000-2008. Podle jejich výsledků dochází v celé oblasti k výraznému ovlivnění dat. Index EVI se mění nezávisle vůči suchu v roce 2005, ale náhodně v celém období pozorování. Odchytky byly jak kladné, tak záporné, bez časové návaznosti či závislosti na atmosférických srážkách. Navíc se ukázalo, že index EVI se výrazně mění i v závislosti na měsíci pozorování. Vzhledem ke skutečnosti, že se celkově odchytky pohybovaly ve vzájemně podobných hodnotách, došli autoři ke stejnému závěru, jako předchozí studie. Tedy že vegetace amazonského pralesa zůstala za sucha roku 2005 stejná a data byla ovlivněna atmosférickými vlivy. Zdůraznili nutnost data EVI filtrovat pro zajištění správné interpretace a v úvahu brát i časový aspekt jejich pořízení (Samanta et al. 2012).

3.4.4. A green illusion?

V rámci analýzy příčin korupce dat EVI se nejpodrobnějšímu zkoumání věnovali Morton et. al., kteří své závěry publikovali v roce 2014. Jejich analýza se zaměřila na ovlivnění odrazivosti v pásmu blízkého infračerveného záření (NIR) a obsahovala dvě základní hypotézy pro vysvětlení anomálie indexu EVI v roce 2005. První se zabývala optickými vlastnostmi listů vegetace. Druhá hypotéza pracovala nikoliv s optickými vlastnostmi snímaného povrchu, ale vzájemných pozic zdroje záření, pozorovacího senzoru družice a snímaného povrchu v konkrétním okamžiku (Soudani and Francois 2014). Studie kombinovala teoretické modely, pro které byla vytvořena trojrozměrná simulace lesa a skutečného satelitního pozorování pomocí optických a laserových (LIDAR) snímačů. Vliv listů byl zkoumán na základě předpokladu, že pokud by došlo k obměně starých listů za nové v důsledku zvýšené sluneční aktivity, došlo by k nárůstu hodnot EVI. Stalo by se tak díky skutečnosti, že mladé listy disponují vyšší odrazivostí záření (Morton et al. 2014).

Výsledky těchto analýz ukázaly, že k zvýšení aktivity vegetace skutečně nedošlo. Jako hlavní faktor vytvářející iluzi tohoto jevu označili měnící se geometrie a úhly pozorovacího senzoru vůči snímanému povrchu a zdroji záření – Slunci. V původních analýzách se tyto parametry skutečně nezohledňovaly, a pokud ano, došlo pouze k normalizaci veškerých dat na konstantní geometrii pozorovacího senzoru. Simulace v trojrozměrném modelu prokázaly, že při použití systému založeném na principu LIDAR nedochází k žádným výrazným abnormalitám a zeleň se jeví konstantní. V případě použití optického snímače se po uvedení parametrů úhlových korekcí nejen že došlo k odstranění anomálie v suchém období, ale i veškerých výraznějších odchylek za celé sledované období (Morton et al. 2014).

Autoři tedy došli k jednoznačnému závěru, že za danými abnormalitami stojí měnící se geometrie senzoru a zdroje záření v závislosti na době pořízení dat. Vůči povrchu dochází ke změnám pozorovacích úhlů a tvorbě stínů ve vegetaci, čímž je vytvářena iluze měnících se podmínek, ačkoli skutečný stav je neměnný. V podstatě se celý jev dá označit za zelenou iluzi. Jednoduché grafické znázornění tohoto jevu je znázorněno na obrázku č. 5. Zároveň poukázali, že na základě jejich simulací je k dosažení ideálních výsledků pro analýzy zeleně a jejich sezónnosti nezbytné zahrnout do pozorování i pozemní průzkumy a kalibrační data. Dále je vhodné kombinovat informace z lidarových a optických snímačů. Tímto postupem je možné eliminovat právě takto způsobené nepřesnosti. Z výsledků této studie zároveň plyne i určité sladění závěrů pozemních studií z daného období, poukazující na celkové negativní reakce vegetace vůči výraznému suchu (Soudani and Francois 2014).



Obrázek 5: Vliv polohy snímače a Slunce vůči povrchu (Soudani and Francois 2014)

- *A – poloha Slunce a snímacího senzoru je na jihu v jedné ose*
 - *B – poloha Slunce zůstává stejná, pozorovací senzor je nad sledovanou oblastí*
 - *C – poloha Slunce je na severu, snímací senzor se nachází na jihu*
- (popisované polohy snímače a zdroje jsou vztaženy vůči pozorované ploše)*

Z následné modelové situace je patrný vliv polohy senzoru vůči sledované ploše a Slunce sloužící jako zdroj záření. V případě obrázku A dochází k maximálnímu osvětlení sledované vegetace a minimalizaci stínů. Vegetace se tak jeví zelenější. Obrázek B již ukazuje více stinných míst a tedy i z hlediska analýzy zhoršení výsledků. Obrázek C ukazuje nejhorší možný případ, kdy senzor a Slunce jsou vůči ploše na opačných stranách. V takovém případě dojde k maximalizaci stinných ploch a vegetace vypadá tmavší, než je tomu ve skutečnosti (Soudani and Francois 2014).

4. Výzkumná část

4.1. Metodický postup prací

V rámci výzkumné části práce byla vybrána reprezentativní oblast s vhodným zastoupením různých druhů ploch. Území mělo zahrnovat zejména nízkou vegetaci v podobě trav a vegetaci vyšší, tedy keře a stromy. Dále měly být zastoupeny i plochy bez vegetačního pokryvu a plochy zpevněné. Pro dosažení reprezentujících výsledků byla dostatečná i menší plocha, která bude zahrnuta v záběru jediného snímku. Nebylo tedy potřeba většího území, které by pro svou analýzu vyžadovalo vytvoření ortomozaiky. Území bylo dále vybráno s ohledem na místní znečištění a možnou přítomnost vzdušných aerosolů, které mohly přesnost výsledných hodnot narušit. Pro výpočet byl vybrán jako nejvhodnější index normalizovaných hodnot, tedy NDVI. Důvodem tohoto výběru je dostupnost nezbytné snímací techniky, relativně snadného výpočtu a také skutečnosti, že se jedná o nejrozšířenější vegetační index k datu napsání této práce.

Pro pořízení dat byla použita bezpilotní kvadrokoptéra neboli dron, nesoucí snímací soustavu určenou pro pořizování snímků ve spektrálním pásmu RGN a NIR. Vzhledem ke skutečnosti, že nebyl dostatek času pro pořízení dat různých období kalendářního roku, byla měnící se poloha Slunce znázorněna provedením 3 až 4 samostatných letů v jediném letovém dni. Časový interval mezi snímáním zaručil dostatečnou změnu polohy Slunce vůči snímanému povrchu, a tedy i tvorbě stínů na zájmovém území.

Letové dny byly celkově dva, s různými letovými podmínkami. Pro jeden den platily podmínky pro snímání teoreticky ideální – tedy bezvětří a zároveň zatažené obloze. Uvažovalo se přitom, že minimální až nulový výskyt stínů na zájmovém území mezi jednotlivými lety by měly mít za následek dosažení konstantních hodnot indexu NDVI. Tato data měla sloužit jako komparační vůči druhému letovému dni, který byl proveden za slunečného počasí, kdy tvorba stínů byla maximální a teoretické ovlivnění výsledků tak dosahovalo nejvyšších hodnot.

V rámci každého letu byly pořízeny vždy dva snímky za určitý časový interval, přičemž jeden v RGN a druhý NIR části elektromagnetického spektra. Pro zajištění identického okamžiku expozice se využito duálního systému snímačů, jehož konfigurace je blíže popsána v další kapitole. Z pořízených snímků byly následně vybrány dva pro každý typ snímaného záření. Jeden snímek reprezentující celé zájmové území při co nejlepší kvalitě a druhý, zachycující certifikovanou odraznou desku pro výpočet a kalibraci reflektance prostředí pro konkrétní let.

Získaná data byla následně dále zpracována v programu ArcGis společnosti ESRI, konkrétně jeho verze č. 10.4. Zpracování probíhalo s využitím georeference pořízených snímků, vektorizací jednotlivých typů ploch a následným provedením statistické analýzy pro každou zahrnutou plochu. Výsledné hodnoty každého snímku za konkrétní časové období byly vzájemně porovnány. Podrobný popis pořízení a zpracování dat je obsažen v následujících kapitolách.

4.2.Vymezení a charakteristika zájmového území

Jako zájmové území byla vybrána plocha nacházející se v areálu Libosadu České zemědělské univerzity v Praze (dále jen ČZU). Tento areál slouží jako pracoviště v oblasti výuky a výzkumu pro obory krajinné a zahradní architektury. Zároveň je koncipován i jako funkční park pro relaxaci a za tímto účelem je volně přístupný. Díky své koncepci jsou v areálu zastoupeny všechny potřebné typy ploch pro provedení vypovídající analýzy. Výběr území v areálu ČZU zároveň poskytuje možnost kontroly snímaných ploch a jejich případných změn mezi jednotlivými letovými dny, jež by mohly ovlivnit pořízená data.

Konkrétní prostor pro provedení snímání byl vybrán s ohledem na zastoupené plochy a možnosti identifikace vhodných identických bodů, které budou využity v průběhu zpracování snímků. Důležitým kritériem výběru bylo zajištění souladu s příslušnou právní úpravou, konkrétně Doplňku X leteckého předpisu a splnit veškeré požadované podmínky bezpečného letu bezpilotních systémů. Na základě těchto parametrů byla vybrána vhodná oblast pro provedení snímání (obrázek 6).



Obrázek 6: Zájmové území – Libosad, ČZU

Jak je z obrázku patrné, ve vybraném prostoru jsou zastoupeny základní typy vegetace, tedy traviny, křoviny a stromové porosty. Dále jsou přítomny plochy zpevněné, konkrétně se jedná o plochu zámkové dlažby a sěrkových cest. Tyto plochy jsou zahrnuty z důvodu celistvosti analýzy, která by pro maximální vypovídající hodnotu měla obsahovat i plochy bez vegetace. Území je navíc přehledné a z hlediska návštěvnosti minimálně frekventované. V bezprostřední blízkosti se nenachází objekty, které by mohly být v případě kritické situace ohroženy. Území navíc poskytuje dostatek ploch pro možnost nouzového přistání či řešení jiných komplikací v průběhu letu. Tyto předpoklady podmiňují naplnění podstaty bezpečného letu dle platné legislativy. Po uvážení všech zmíněných faktorů byla vybrána zobrazená plocha. Jistou nevýhodou území je skutečnost, že oblast spadá do ochranného pásma letiště. Není tedy možné v oblasti létat výše než 100 m. Vzhledem k rozsahu práce a úhlu záběru snímacího zařízení je však i nižší letová hladina dostačující.

4.3. Provedení terénních prací

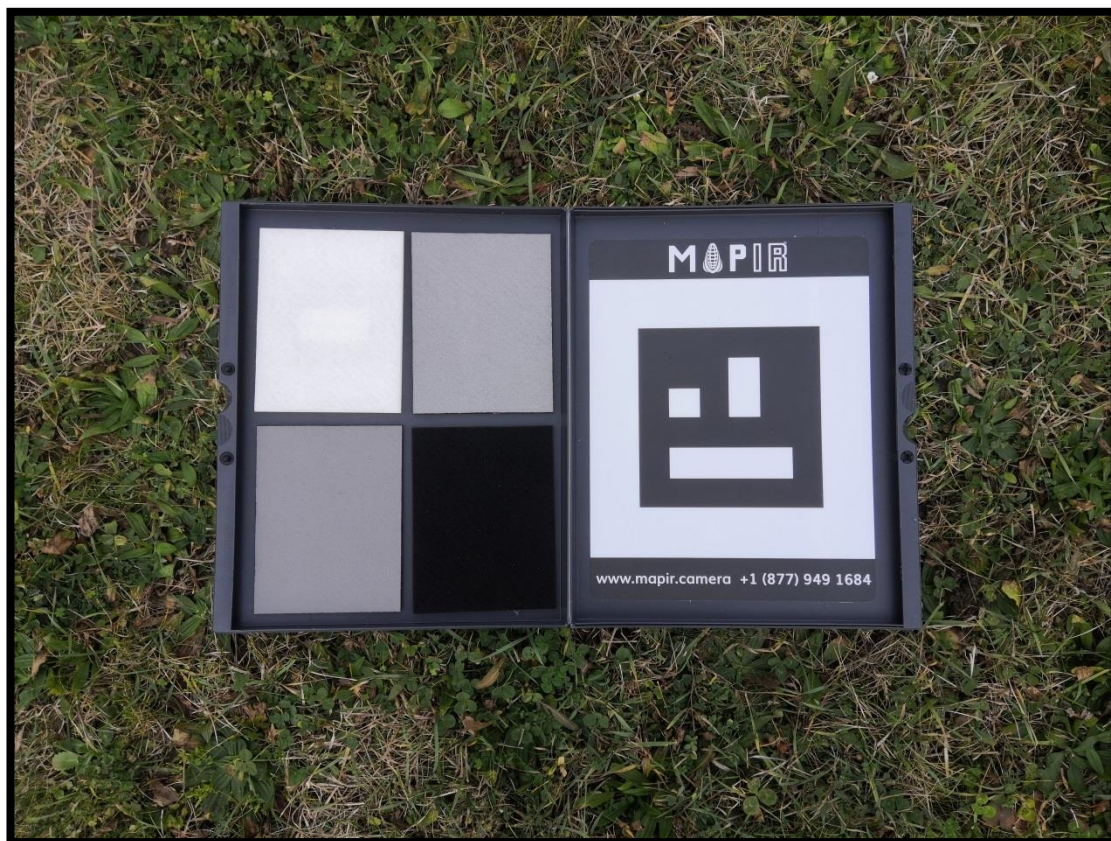
Pro praktické pořízení dat byla použita bezpilotní kvadrokoptéra, konkrétně model DJI Phantom 4 (Obrázek 7), nesoucí dva multispektrální snímače Survey 3 společnosti MAPIR. Tato soustava umožňuje současné pořízení dvojice snímků v RGN a NIR části elektromagnetického spektra. Je tedy zajištěno, že snímky zachycují identický prostor v konkrétní časový moment a letové hladině. K této soustavě byla využita i odrazná deska stejného výrobce, sloužící pro kalibraci dat a výpočtu reflektance zemského povrchu (Obrázek 8). Tímto způsobem je dosaženo zpřesnění výsledných výpočtů vůči aktuálním podmínkám.



Obrázek 7: Využitý systém UAV (DJI Phantom 4 + MAPIR Survey 3)

Jednotlivé lety se uskutečnily 2. a 4. prosince 2019, přičemž v rámci každého dne byly provedeny celkem tři samostatné lety v intervalu dvou až tří hodin. První ze dnů představoval podmínky pro snímání teoreticky ideální, kdy po celý den byla obloha zakryta oblačností a zároveň bylo bezvětří. Za těchto okolností měnící se poloha Slunce nevytvářela signifikantní stinné plochy a pořízená data by tak měla vykazovat stejné výsledné hodnoty.

Druhý letový den byl proveden za jasného bezvětřného počasí, tedy s maximální tvorbou stinných ploch. Pokud by změna polohy Slunce měla skutečně vliv na hodnoty indexu NDVI, takto pořízená data by měla vykazat odchylky nejenom mezi sebou (v rámci jednotlivých letů druhého dne), ale i vůči prvnímu letovému dni. Vzhledem ke skutečnosti, že oba letové dny byly provedeny s odstupem 48 hodin, byl zaručen neměnný stav snímaných ploch.



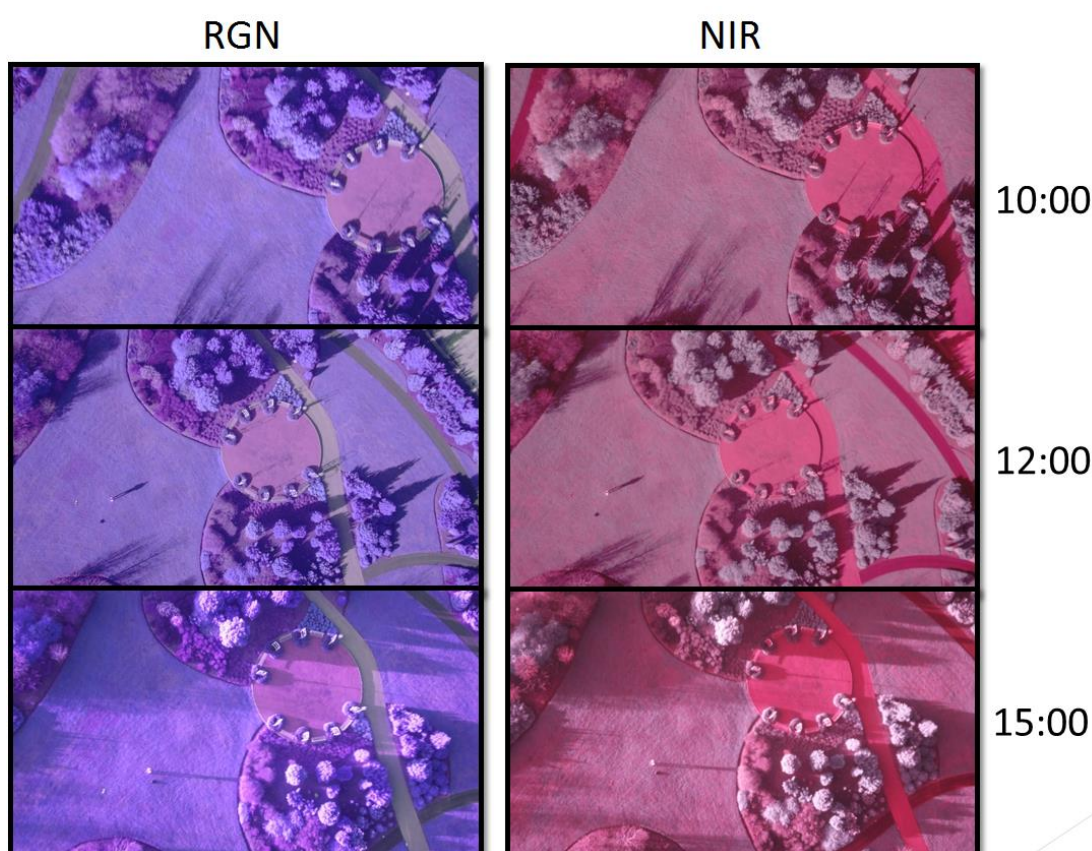
Obrázek 8: Kalibrační deska (MAPIR)

Lety byly účelně koncipované jako co nejjednodušší. Vzhledem k širokoúhlému záběru snímacích kamer nebylo nutné, aby se dron nad územím pohyboval jinak než v přímé vertikální rovině. Kromě hlavních snímků bylo nezbytné pořídit i záznam kalibrační desky. Souhrnné schéma jednotlivých letů je možné jednoduše popsat takto:

1. Nastavení intervalu snímání, zapnutí kamer
2. Předletová příprava, vzlet
3. Zaznamenání kalibrační desky
4. Výstup do optimální letové hladiny

5. Pořízení několika optimálních snímků
6. Přistávací manévr a ukončení snímání

Za každý let bylo pořízeno cca 20 dvojic snímků, z nichž byly manuálně vybrány nejlepší z nich. Výjimkou je let č. 2, kde byla při zpracování zjištěna chyba snímací soustavy a absence snímků NIR. Pro každý let tedy jsou zpracovány snímky zájmové oblasti a snímky kalibrační plochy, a to v RGB a NIR části spektra. Vybrané snímky pro druhý letový den jsou zobrazeny na obrázku č. 9, na kterém jsou patrné změny a posun stinných ploch. Obrázek č. 10 pak obsahuje podrobné informace k jednotlivým letům.



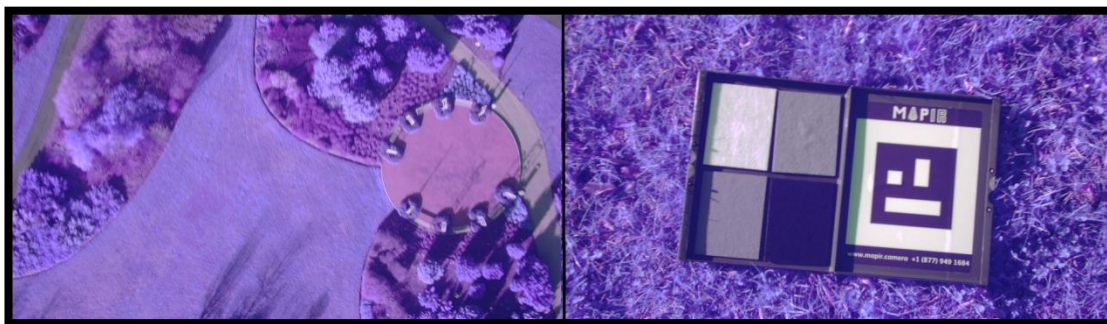
Obrázek 9: Pořizované snímky RGN a NIR

Datum	Pořadí letu	Čas	Let. podmínky	Výška [m]	Rozlišení [Mpx]
2.12.2019	1	10:00	Zataženo, bezvětří	50	16
	2	12:00	Zataženo, bezvětří	85	8
	3	15:00	Zataženo, bezvětří	85	8
4.12.2019	4	10:30	Jasno, bezvětří	95	8
	5	12:30	Jasno, bezvětří	95	8
	6	15:00	Jasno, bezvětří	95	8

Obrázek 10: Informace o letu

4.4. Analýza výsledků

V rámci každého letu bylo pořízeno cca 20 dvojic snímků, pro každý interval tedy snímek RGN a NIR. Každý snímek byl uložen ve formátu RAW a JPEG, přičemž pro analýzu měly být využity snímky RAW, jakožto dat bezztrátového formátu. Za každý let byly manuálně vybrány ideální snímky zachycující zájmový prostor a kalibrační odraznou desku. Pro každý let tedy byly vybrány dvě dvojice snímků. Tyto snímky byly následně podrobeny kalibraci pomocí programu přímo výrobcem použité snímací soustavy. Kalibrovaná data měla být následně importována do programu ArcMap za účelem provedení statistické analýzy a výpočtu indexu NDVI.



Obrázek 11: Příklad vybraných snímků (RGN)

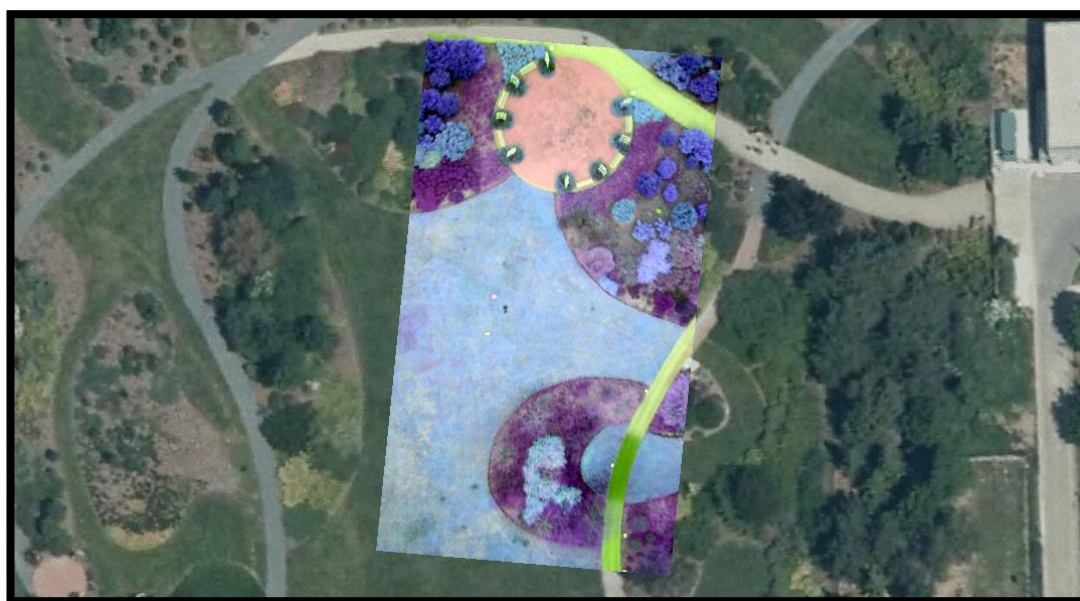
4.4.1. Problém zpracování dat

Ve fázi kalibrace dat pomocí snímků odrazné desky pro každý let se bohužel vyskytl problém, který si vyžádal změnu postupu prvotního zpracování dat. Konkrétně šlo přímo o jejich kalibraci v programu MAPIR. Jak se ukázalo, program nebyl schopen zpracovat snímky daného (vyššího) rozlišení a nebylo tak možné data kalibrovat a vypočítat přesnou reflektanci jednotlivých ploch v okamžiku pořízení. Na skutečnost, že program pracuje pouze se snímky určitého rozlišení, není nikde upozorněno a tomuto problému se tak nedalo vědomě předejít. Program je bohužel striktně jednoúčelový a nenabízí žádné alternativy úpravy dat před jejich zpracováním, které by daný problém vyřešily a zachovaly původní kvalitu. Tuto možnost nenabízí ani samotný poskytovatel programu. Vzhledem k ročnímu období již nebylo z důvodu nevhodných letových a stanovištních podmínek pořídit data nová. Bylo tedy nezbytné najít alternativní možnost zpracování, a to i za cenu nižší přesnosti výsledků.

4.4.2. Alternativní postup

Vzhledem k výše zmíněným důvodům bylo upuštěno od využití původního formátu RAW, který byl určen pro výpočet v programu MAPIR. Snímací soustava ukládá každý snímek i ve formátu JPEG, který je brán jako ztrátový a původně jej nemělo být využito. Jak však bylo zjištěno, systém ukládal data upravena do podoby obsahující veškeré potřebné informace, které jsou potřeba k vypovídající analýze. Pro další postup tak bylo pracováno se snímky v tomto formátu. V rámci tohoto postupu bylo dále upuštěno od kalibrace snímků pomocí odrazné desky, jelikož kalibrace v tomto formátu postrádá vypovídající hodnotu. Místo hodnot reflektance tak byly využity hodnoty DN (Digital Number) Následující kroky zpracování byly prováděny výhradně v programu ArcMap 10.4.

Pro další analýzu bylo nezbytné vstupní data upravit do skutečného souřadnicového systému vůči zemskému povrchu, konkrétně systému S-JTSK. Za tímto účelem byly pro jednotlivé snímky manuálně určeny identické body. Tyto body byly následně využity pro georeferenci vůči aktuálnímu ortofotu, poskytovaného ČUZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální) jako služba WMS. Při procesu byla využita affinní transformace. Tímto způsobem bylo docíleno určení skutečné polohy každého snímku a jejich vzájemného překryvu (obrázek 12). Nepřesnosti manuální georeference byly zmírněny postupem popsáním dále v kapitole. Pro identické body byly určeny odchylky RMSE, tato data jsou dostupná v digitální verzi práce.



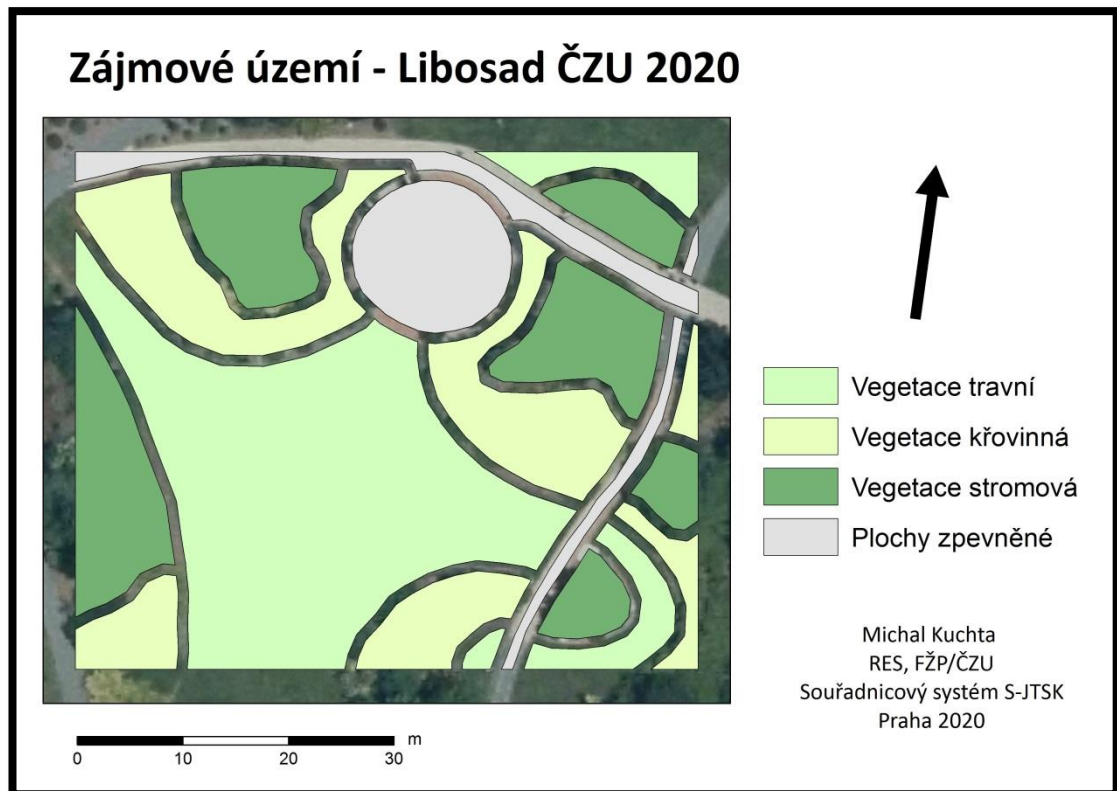
Obrázek 12: Georeference snímku na podkladovém ortofotu (ČUZK, 2020)

Následujícím krokem bylo vymezení jednotlivých druhů ploch na zájmovém území. Toho bylo docíleno procesem vektorizace. Jako zdroj bylo využito veškerých dostupných dat, tedy vhodné kombinaci ortofota lokality a jednotlivých snímků. Tímto postupem byly zmírněny polohové nepřesnosti mezi snímky, které vznikly jejich georeferencí. Po ukončení vektorizace byly na území klasifikovány celkem čtyři typy ploch, a to:

1. Vegetace travní
2. Vegetace křovinná
3. Vegetace stromová
4. Zpevněné plochy

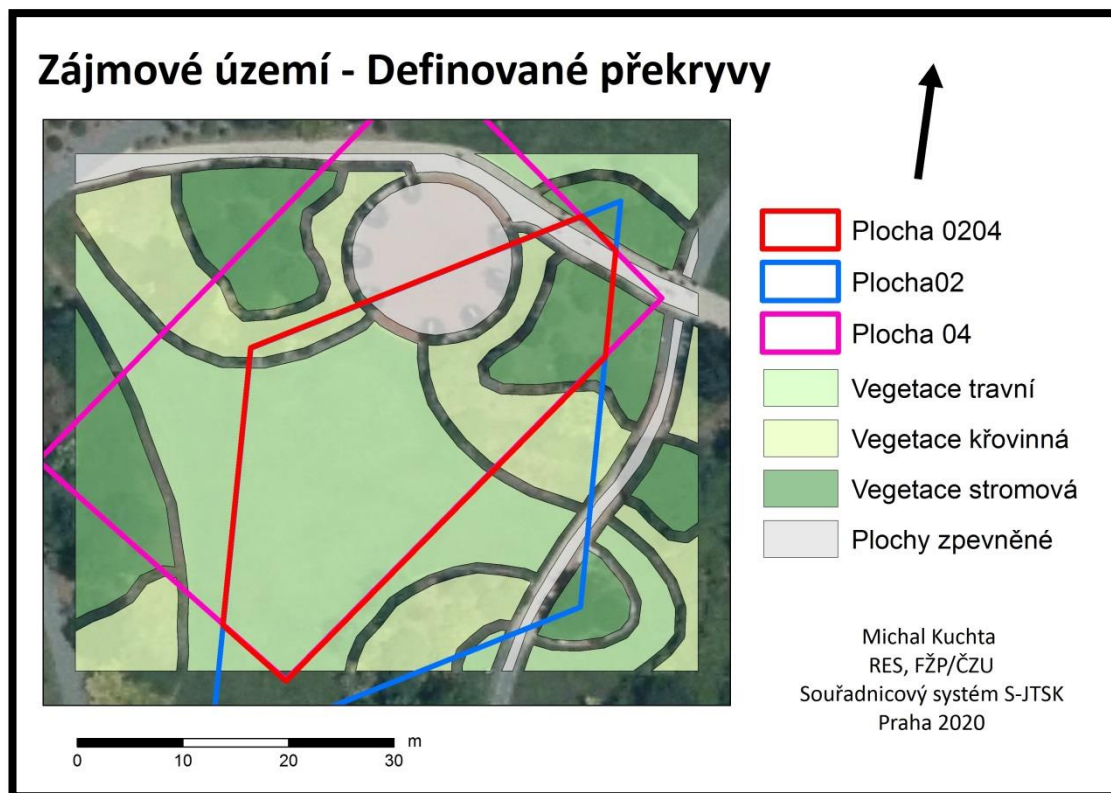
Jednotlivé typy ploch byly určeny terénní rekognoskací. Jejich klasifikace byla provedena obecným způsobem na základě typu povrchu a případného typu a výšky vegetace. Podrobnější rozlišení ploch, například na základě konkrétního druhu porostu, není v rozsahu práce potřebné a vzhledem k použitým metodám výpočtu je i nedosažitelné. Každá klasifikovaná plocha reprezentuje svými hodnotami typ plochy v rámci jednoho celku. Analýza je tedy zpracována pro každý typ ploch, nikoliv zvlášť pro každý určený polygon.

Protože celý proces přípravy dat na analýzu byl prováděn manuálně a dle zmíněných funkcí, nebylo možné polohové chyby mezi snímky úplně eliminovat. V určitých případech tak nastala situace, kdy na snímku zasahoval určitý typ plochy mimo své hranice určené vektorizací. Tyto odchylky by měly na výpočet statistických údajů negativní dopad a celkově by ovlivnily vypovídající hodnotu celého výzkumu. Pro odstranění tohoto nedostatku se z každého vektorizovaného polygonu odečetlo pomocí funkce „Buffer“ 0,5 m plošného rozsahu. Výsledkem jsou metrové rozestupy mezi jednotlivými polygony. Je tak zaručeno, že na žádném snímku nedojde k přesahu jednotlivých typů ploch mimo definované hranice. Určitá ztráta podkladových dat je kompenzována zlepšením přesnosti celé analýzy. Konečná podoba polygonů, určených k výpočtu statistických údajů je znázorněna na obrázku č. 13.



Obrázek 13: Identifikované plochy

Poslední úpravou dat před výpočtem bylo nalezení ploch, které jsou zaznamenány na veškerých dostupných snímcích, tedy prostor absolutního překryvu. Protože oba letové dny probíhaly za jiných podmínek a jiných letových hladin, snímky jsou různě orientovány v prostoru a jejich absolutní překryv zaujímá poměrně malý prostor. Na základě této skutečnosti bylo rozhodnuto o určení dodatečných ploch překryvu pro případné porovnání. Kromě absolutního překryvu tak byly i definovány plochy překryvu v rámci každého dne zvlášť. Všechny tři oblasti jsou znázorněny na obrázku č. 14, jejich názvy jsou odvozeny od data pořízení zdrojových snímků.



Obrázek 14: Definované plochy analýzy

Dle mapky je zřetelné, že rozsah překryvů v určitých místech přesahuje definované plochy. Tyto oblasti nebyly definované záměrně, a to kvůli značným nepřesnostem vzniklých georeferencí, které nešly dostatečně zmírnit. Pro analýzu tak byly započteny překryvy pouze v rozsahu definovaných ploch.

Takto upravená data byla podrobena zonální statistice (funkce „Zonal Statistic as Table“) pro veškeré dostupné statistické údaje. Proces byl proveden pro každý snímek a pro každé v něm obsažené pásmo. K dispozici jsou tedy údaje pro pásma RED, GREEN a infračervené pásmo. Kromě údajů z celkového překryvu za oba dny jsou k dispozici i samostatné údaje pro překryv v rámci každého dne. Vybrané číselné údaje byly následně importovány do programu Excel, kde došlo k jejich souhrnu a grafickému zpracování.

Výpočet proběhl pro snímky RGN i NIR. Snímky blízkého infračerveného záření byly původně pořízeny jako přesnější ekvivalent oproti infračervenému pásmu pořízeném snímačem RGN, čímž mělo být v kombinaci s kalibračními údaji dosaženo o něco přesnějšího výpočtu indexu NDVI. Vzhledem k nutnému zpracování snímků ve formátu JPEG však bylo od jejich použití upuštěno. Index NDVI je tak určen pouze na základě dat ze snímače RGN. Získané hodnoty zonální statistiky jsou průměr, medián, směrodatná odchylka, dosažená minima a maxima, rozsah, minoritní a majoritní hodnoty. Grafickému zpracování byly podrobeny pouze vybrané údaje, a to průměr, medián a směrodatná odchylka. Každá vypočtená hodnota je vztažena k typu plochy jako jednoho celku. Kompletní statistické údaje včetně dat snímků NIR jsou dostupné v elektronické složce práce, která je k dispozici na příloženém CD, případně ke stažení z univerzitního systému.

Pro každý vybraný statistický údaj je vytvořena jednoduchá srovnávací tabulka, obsahující veškeré získané údaje pro daný typ plochy. Prakticky tabulka obsahuje data pro červené, zelené i infračervené části spektra za každý provedený let. Dohromady jsou tak vytvořeny celkem 3 srovnávací tabulky. Pro grafické porovnání jsou vytvořeny spojnicové grafy, obsahující vzájemné porovnání hodnot vždy pro stejný typ záření. Každá tabulka tedy má přiřazen graf pro pásmo RED, GREEN a INFRA (infračervené). Vegetační index NDVI je určen z průměrných hodnot za každou zkoumanou plochu dle vzorce $[(RED - INFRA) / (RED + INFRA)]$.

Z jednotlivých hodnot NDVI byl následně vypočten celkový aritmetický průměr pro každou plochu. Od této hodnoty byly určeny dílčí odchylky, jejichž průběh byl následně porovnán vůči parametrům polohy Slunce, které jsou uvedeny na obrázku č. 19. Cílem bylo zjistit, zda a případně který parametr polohy Slunce má na hodnoty NDVI největší vliv. Postup je proveden pro všechny počítané překryvy, tedy pro plochy 0204 (celkový překryv pro oba letové dny) a dílčí plochy 02 a 04. Pro zachování přehlednosti kapitoly jsou jako příklad postupu uvedena data pouze pro průměrné hodnoty plochy 0204 a indexu NDVI. Veškeré komparační tabulky jsou k dispozici v příloze této práce. Kompletní souhrn všech výpočtů a vypracovaných grafů je dostupný v elektronické verzi.

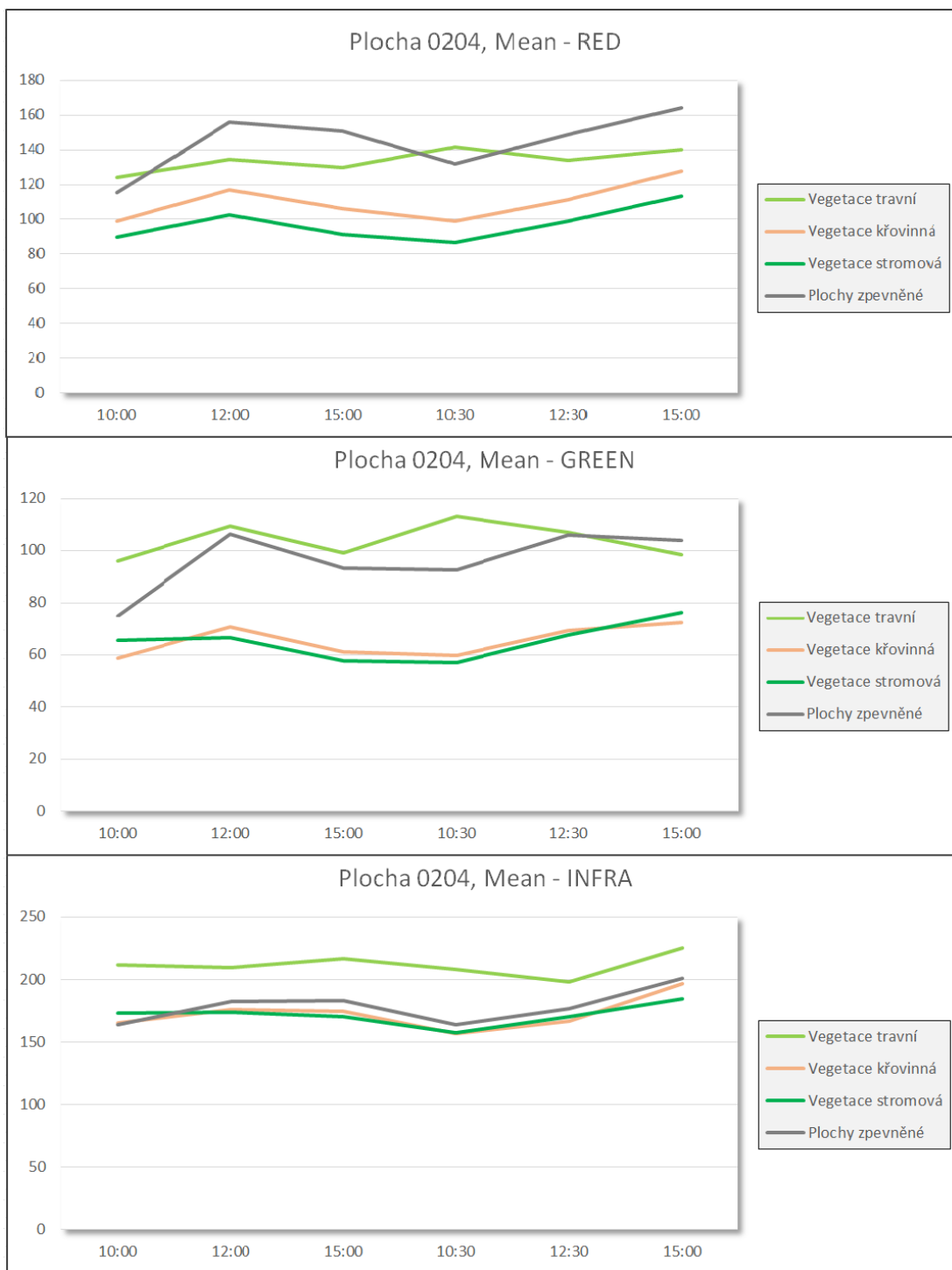
4.5. Výsledky

Jako primární data výzkumu jsou brány údaje absolutního překryvu, tedy data pro plochu 0204. Údaje pro plochy 02 a 04 jsou pouze doplňkové. Jak bylo zmíněno v metodickém postupu, jejich výpočet proběhl na odlišných překryvech, vztažených vždy ke konkrétnímu dni. Je tak znemožněno přímé porovnání. Výpočet těchto ploch byl proveden za účelem porovnání tendence odchýlení (pokles či nárůst) výsledných hodnot, respektive zda jsou tyto tendence shodné i v případě výpočtu z odlišných ploch. Toto porovnání je uvedeno dále v kapitole.

		Mean							
		2019_12_02			2019_12_04				
Plocha 0204	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red		124,1513	134,3996	129,6263	141,4776	133,9156	139,9813
		Green		96,05716	109,5233	99,01069	113,0556	107,0836	98,3244
		Infra		211,6667	209,3191	216,2781	208,3418	197,7538	225,1533
	Vegetace křovinná	Red		98,86526	116,9145	106,2519	98,83606	111,2166	127,5559
		Green		58,62238	70,67417	61,04985	59,93477	69,49688	72,52662
		Infra		165,128	176,0813	174,3888	156,7294	166,4076	196,6212
	Vegetace stromová	Red		89,96295	102,7737	91,3706	86,42326	99,10549	113,239
		Green		65,62244	66,71931	57,66584	57,0803	67,70225	76,39166
		Infra		172,9249	173,6931	169,9787	157,5746	170,2447	184,6732
	Plochy zpevněné	Red		115,3308	155,9684	151,0528	131,6126	148,575	164,3114
		Green		74,85745	106,2583	93,26335	92,64919	106,1404	103,9099
		Infra		163,8701	182,0239	183,0008	163,8336	176,8583	201,217

Obrázek 15: Vybrané statistické veličiny pro plochu 0204

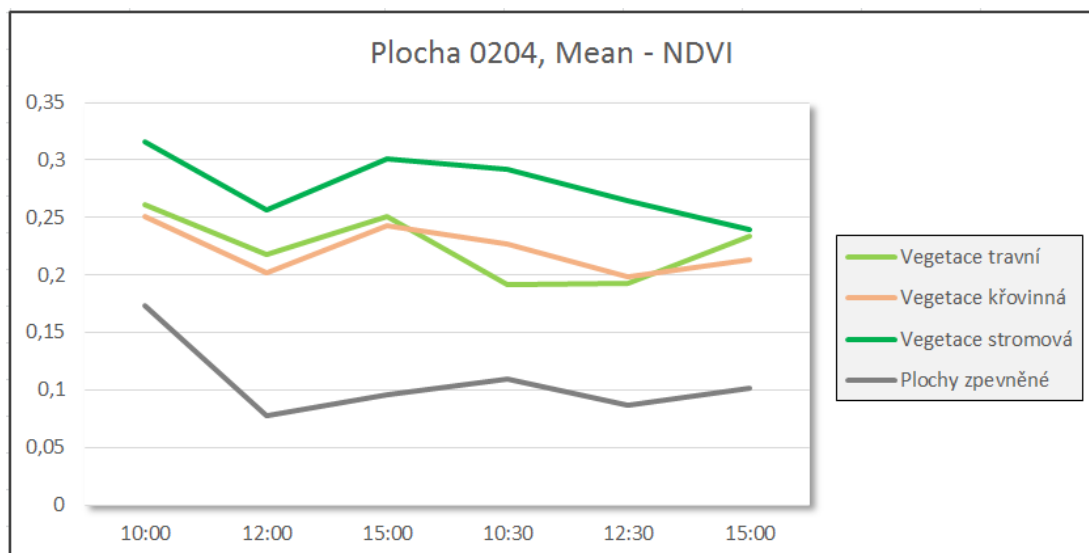
Obrázek č. 15 zobrazuje srovnávací tabulky pro statistické hodnoty průměrů snímaných ploch. Již v tomto případě lze pozorovat značné rozdíly hodnot reflektance mezi jednotlivými lety. Mění se přitom hodnoty všech typů zkoumaných ploch. Z grafického porovnání (Obrázek č. 16) vyplývá, že plochy stromové a křovinné vegetace zhruba zachovávají vzájemný interval hodnot. Plochy travní vegetace a zpevněných povrchů oproti tomu vykazují značný rozptyl jak vůči sobě navzájem, tak vůči plochám vyšší vegetace.



Obrázek 16: Příklad grafického porovnání hodnot (0204 - Průměr)

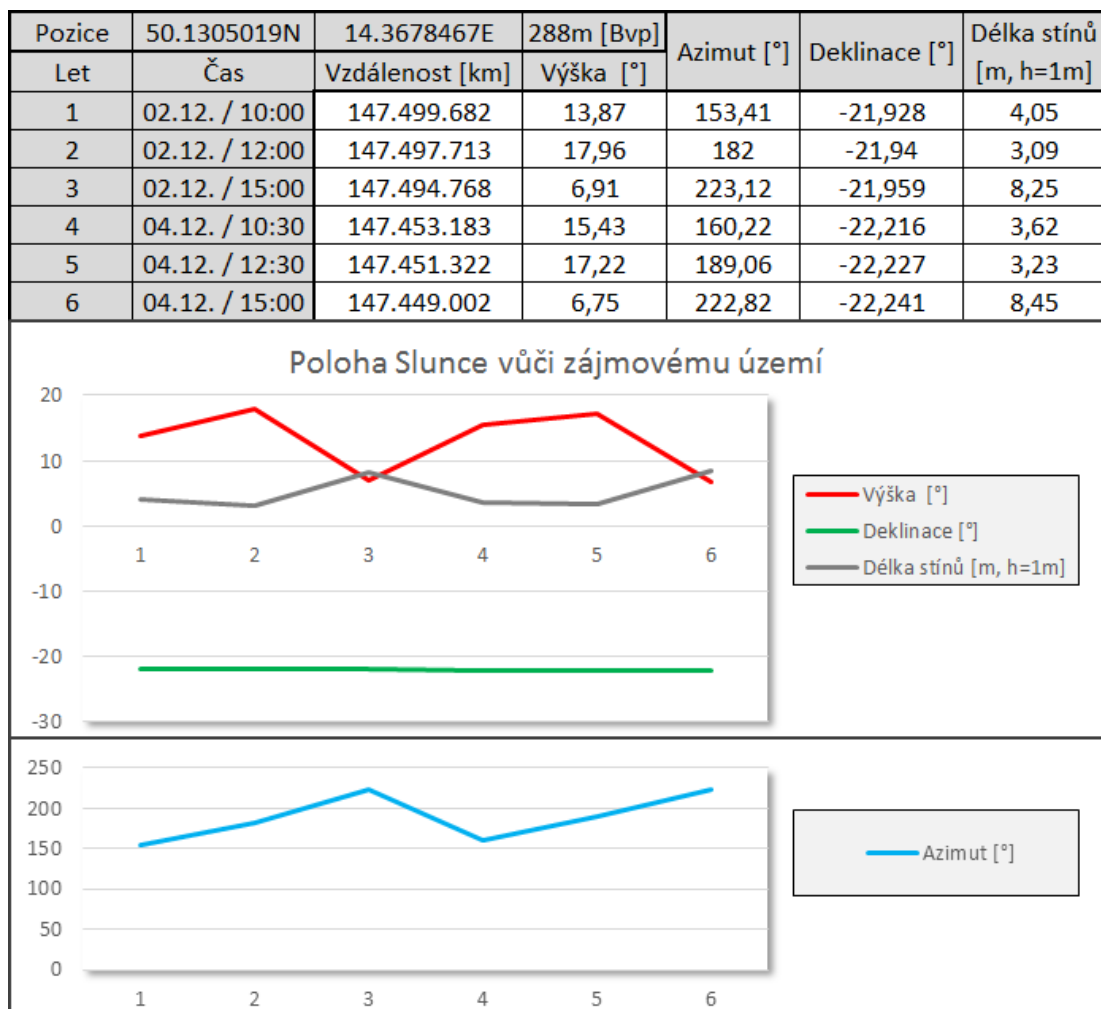
NDVI (MEAN)							
		2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 0204	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	0,260604	0,217967	0,250508	0,191139	0,192475	0,233262
	Vegetace křovinná	0,251002	0,201937	0,24279	0,22653	0,198798	0,213048
	Vegetace stromová	0,315579	0,256521	0,300778	0,291606	0,264114	0,239783
	Plochy zpevněné	0,173851	0,077089	0,095638	0,109059	0,08691	0,100965

Obrázek 17: Výpočet NDVI



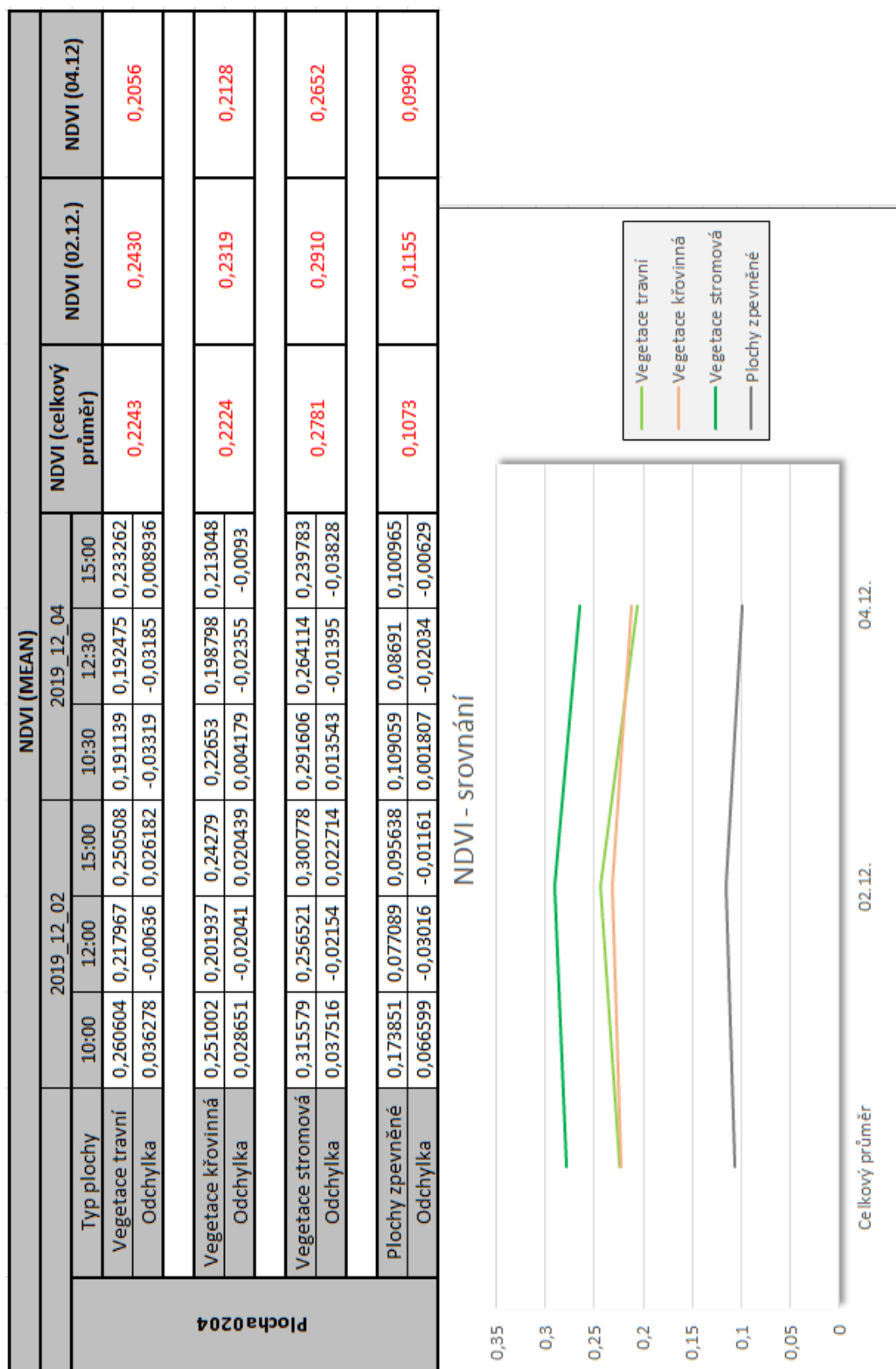
Obrázek 18: Grafické porovnání indexu NDVI (plocha 0204)

Obrázky č. 17 zobrazují výpočtu NDVI z průměrných hodnot reflektance dle příslušného zorce. Obrázek č. 18 pak jejich grafické porovnání. Jak je patrné, hodnoty se v průběhu času výrazně mění. V případě snímání prvního letového dne jsou výsledné hodnoty sice rozdílné, nicméně jejich vzájemný interval je relativně zachován. Oproti tomu hodnoty pořízení při druhém letovém dni vykazují intervaly různé, trendy jednotlivých typů vegetace se vzájemně výrazně odlišují. Celkově jsou tak výsledky při ideálních podmínkách (první letový den) vzájemně více stabilní.



Obrázek 19: Poloha Slunce vůči zájmovému území (SunCalc, 2020)

Na obrázku jsou zobrazena data polohy slunce vůči zájmovému území pro daný čas a lokalitu. Pro zjednodušení porovnání jsou navzdory rozdílným jednotkám ve stejném grafu znázorněny parametry výšky Slunce nad horizontem a délka stínů (v tabulce uvedeny stíny pro objekty s výškou 1 metru). Z těchto dat je patrné, že nejnižší bylo Slunce vždy v době třetího náletu každého dne. V tuto dobu se také v lokalitě tvořilo nejvíce stinných ploch. Nejvýše je Slunce vždy v době druhého náletu, tedy v poledne. V tuto dobu také dosahují hodnoty indexu NDVI nižších hodnot.



Obrázek 20: Výpočet odchylek hodnot NDVI (Plocha 0204)

Pro porovnání letových dnů byly vypočítány průměrné hodnoty NDVI za každý letový den a celkový průměr ze všech provedených letů. Odečtením celkového průměru od dílčích hodnot NDVI byly zjištěny odchylky pro jednotlivé lety. Dílčí i celkové průměrné hodnoty byly následně graficky porovnány. Tabulka i graf jsou znázorněny na obrázku č. 20. Odchyly se pohybují v rozsahu 0,05 zjištěného průměru s proměnlivou tendencí. Celkově vyšších hodnot dosahují indexy v rámci prvního letového dne, nicméně se zachováním jejich tendenčního charakteru. Druhý letový den vykazuje celkově nižší hodnoty indexu, ovšem s nestálým tendenčním charakterem. Stejného výsledku bylo dosaženo i při porovnání doplňkových dat pro plochy 02 a 04.

Datum	02.12.		3 → 4	04.12.	
Typ plochy / Let	1 → 2	2 → 3		4 → 5	5 → 6
Vegetace travní	-	+	-	+	+
Vegetace křovinná	-	+	-	-	+
Vegetace stromová	-	+	-	-	-
Zpevněné plochy	-	+	+	-	+

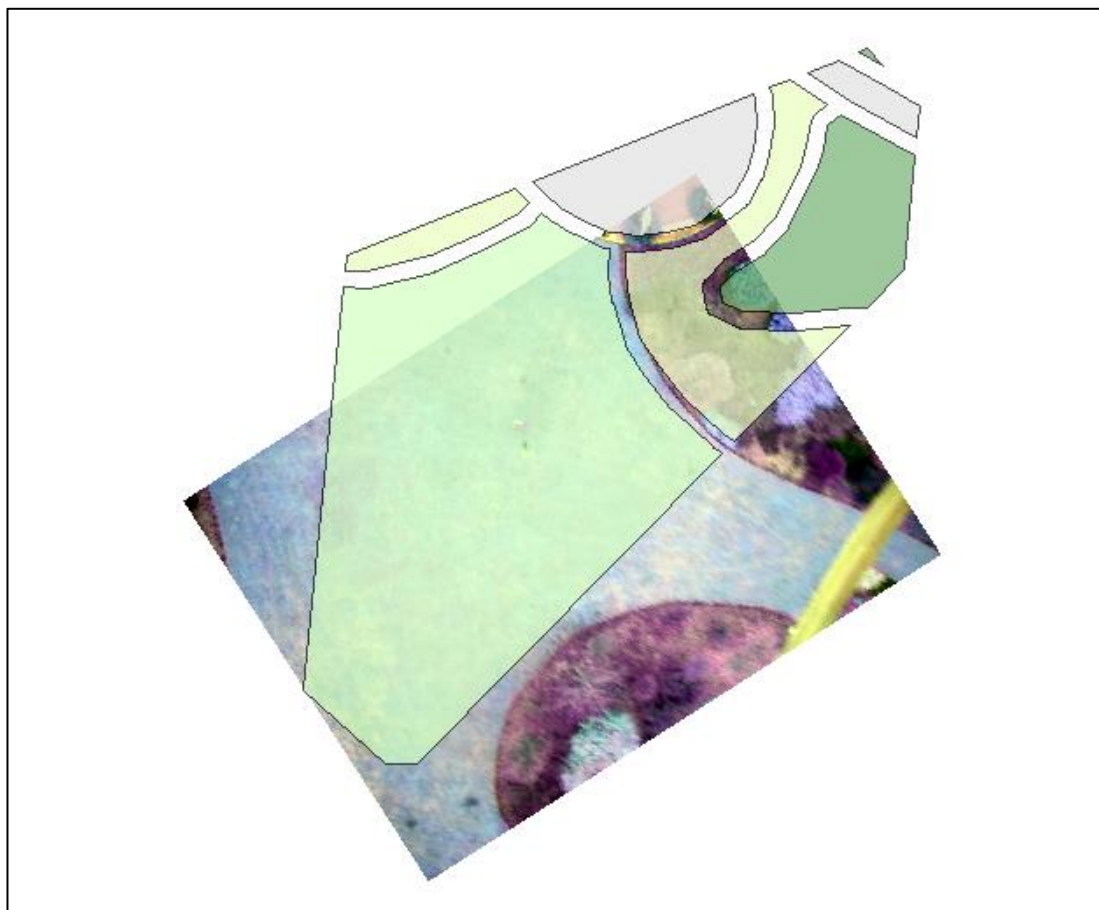
Obrázek 21: Porovnání tendenčního charakteru hodnot NDVI, plocha 0204

Datum	Plocha 02			Plocha 04	
Typ plochy / Let	1 → 2	2 → 3		4 → 5	5 → 6
Vegetace travní	-	+		+	+
Vegetace křovinná	-	+		+	-
Vegetace stromová	-	+		-	+
Zpevněné plochy	-	+		-	+

Obrázek 22: Porovnání tendenčního charakteru hodnot NDVI, plocha 02 a 04

Obrázky č. 21 a 22 zobrazují jednoduché porovnání tendenčního charakteru hodnot mezi jednotlivými lety. U všech typů ploch dochází mezi prvním a druhým náletem k poklesu hodnot NDVI, mezi druhým a třetím náletem pak k celkovému nárůstu. To se děje bez ohledu na to, zda jsou data vypočtena z celkového nebo dílčího překryvu. V případě druhého letového dne u hodnot dochází k poklesu či nárůstu mezi jednotlivými typy ploch nepravidelně. K rozdílům dochází i mezi výpočty z celkového a dílčího překryvu.

Dle výsledků dosahuje nejvyšších hodnot NDVI hned první let (2.12. /10:00). V tomto případě je však nutné uvést, že tento let byl proveden v nižší letové hladině. Pořízené snímky tedy zabírají pouze minimální potřebnou plochu a překryv není úplný (Obrázek č. 23), což má na výpočet průměrných hodnot zásadní vliv. Tento problém se týká zejména stromové vegetace a zpevněných ploch, které jsou na snímku zastoupeny v minimální míře.



Obrázek 23: Neúplný překryv prvního letu

Protože hodnoty NDVI byly vypočteny z průměrných hodnot reflektance, výpočet z menší plochy není vhodný pro porovnání s celkovou plochou, protože do výpočtu průměru vstupuje menší množství dat. Z tohoto důvodu byl dopočítán průměr pouze z pěti následujících letů. Tím bylo dosaženo jistého zmírnění odchylek mezi jednotlivými průměry (Obrázek č. 24), kdy maximální rozdíl nepřesahuje 0,02 výsledné hodnoty.

Let č.1. započítán					
Typ plochy	NDVI (celkový průměr)	NDVI (02.12.)	Odchylka	NDVI (04.12)	Odchylka
Trav. v.	0,2243	0,2430	0,0187	0,2056	-0,0187
Křov. v.	0,2224	0,2319	0,0096	0,2128	-0,0096
Strom. v.	0,2781	0,2910	0,0129	0,2652	-0,0129
Zpev. pl.	0,1073	0,1155	0,0083	0,0990	-0,0083

Let č.1. nezapočítán					
Typ plochy	NDVI (celkový průměr)	NDVI (02.12.)	Odchylka	NDVI (04.12)	Odchylka
Trav. v.	0,2171	0,2342	0,0172	0,2056	-0,0114
Křov. v.	0,2166	0,2224	0,0057	0,2128	-0,0038
Strom. v.	0,2706	0,2786	0,0081	0,2652	-0,0054
Zpev. pl.	0,0939	0,0864	-0,0076	0,0990	0,0050

Obrázek 24: Ovlivnění výsledků neúplným překryvem

Z tabulek hodnot NDVI na obrázku č. 24 je patrné, že v případě vynechání prvního letu se hodnoty více přiblíží celkovému průměru. Protože indexy NDVI prvního letu byly oproti ostatním značně vyšší u všech typů ploch, je možné předpokládat, že to bylo způsobeno výpočtem z nižší plochy. Jako přesnější výsledky tak lze označit vypočtené průměry bez zahrnutí letu č. 1.

5. Diskuse

Celý výzkum je vypracován na základě vlastních dat, pořízený v reálném prostředí. Zájmové plochy jsou vybrány v dostatečném typovém i plošném zastoupení. Díky krátkému časovému rozdílu mezi jednotlivými lety a dobré znalosti zájmového území, je vyloučena možnost, že by rozdíly výsledných hodnot byly způsobeny fyzickou změnou prostředí či zásahem jiného faktoru. Zájmové plochy po oba letové dny zůstaly v identickém stavu. Jak již bylo popsáno v metodice, snímací soustava se nacházela vždy přímo nad zájmovým územím. Vzájemná poloha soustavy a snímaných ploch tak zůstala neměnná, změny byly pouze v případě atmosférických podmínek a polohy Slunce. Provedením dvou letových dnů za různých atmosférických podmínek poskytlo možnost posouzení, zda zatažená obloha vede k výraznější stabilizaci pořízených dat oproti údajům získaných za jasného dne. Tento předpoklad byl částečně potvrzen, ačkoli celková míra ovlivnění zůstává i v případě zatažené oblohy vysoká.

Z výsledků vyplývá, že hodnoty NDVI se výrazně mění za každý provedený let. Grafické srovnání těchto dat potvrzuje prvotní předpoklad vycházející z průměrných hodnot reflektance jednotlivých typů povrchu. U vyšší vegetace křivky hodnot vykazují vzájemnou souměrnost, zatímco křivky nízké vegetace a holých povrchů jsou odlišné. Ve snaze nalézt souvislosti mezi změnami hodnot a světelnými podmínkami v prostředí byla vypočítána přesná poloha Slunce v průběhu každého letu. Z těchto údajů jsou nejpodstatnější výška Slunce oproti horizontu a v přímé závislosti na ní i délka stínů. Porovnáním hodnot je zjevné, že při vyšší výšce Slunce nad horizontem, kdy dochází k vytváření méně stinných ploch, hodnoty NDVI celkově klesají a naopak. Z toho lze teoreticky usuzovat, že vyšší vegetace sice je ovlivněna úhlem a směrem dopadajícího záření, nicméně její ovlivnění je relativně souměrné. Oproti tomu vegetace nižší je ovlivněna nesouměrně, pravděpodobně právě díky měnícím se stinným plochám, vznikající díky vyšší vegetaci. Tyto stíny mění svou orientaci i celkovou plochu a mají tak proměnlivý vliv.

V některých případech se odchýlení pohybuje v řádech 0,05 vypočtených hodnot, což lze považovat za podstatné ovlivnění. Některé studie stanovují své závěry právě na hodnotách vegetačních indexů, kdy i menší odchylka od správné hodnoty může mít za následek nesprávné určení stavu vegetace či klasifikaci ploch. Jako příklad lze uvést studii „Drought and vegetation stress monitoring in Portugal using satellite data“ (Gouveia, Trigo, and DaCamara 2009), zkoumající stav vegetace za suchého období v Portugalsku. Autoři využili pro klasifikaci ploch vegetační index NDVI, kdy například rozdělení mezi suchou a velmi suchou oblastí je určeno na základě změny o 0,025 hodnoty indexu. Za předpokladu silnějšího ovlivnění polohou Slunce tak mohlo dojít k nesprávnému zařazení některých oblastí, a tím i k jistému zkreslení celkových výsledků.

Pokud jde o porovnání výsledků za jednotlivé dny, zatažená obloha významně přispěla ke stabilizaci intervalů hodnot mezi jednotlivými typy ploch, nicméně míra ovlivnění je i tak vysoká. Jasně počasí mělo za následek nepředvídatelnost směřování odchylek a výsledky za takových podmínek mohou být více chybové. Vzhledem k výsledným hodnotám je možno konstatovat, že provedením více letů během dne za ideálních podmínek, s následným výpočtem průměru všech získaných hodnot pro danou plochu, je možno dosáhnout zmírnění ovlivnění. Srovnání s původními studiemi je poněkud problematické. Liší se celkový přístup i charakter vstupních dat. Prvotní studie, zabývající se touto problematikou, vychází z originálních dat, pořízených v Amazonii v časovém rozsahu 5 let. V porovnání s naším výzkumem je jednoznačný absolutní nepoměr zájmové plochy. Významnou odlišností je také způsob jejich pořízení, ke kterému byl využit satelitní systém. Ovlivnění tak není pouze z hlediska sluneční polohy, ale například i z polohy snímacího senzoru vůči území, oblačností a vzdušnými aerosoly. Díky použití systému UAV a minimální letové hladině tyto faktory nemusely být v případě našeho výzkumu zahrnuty.

Přímé porovnání s výzkumem, na jehož výsledky bylo upozorněno v článku *A green illusion* (Soudani and Francois 2014), je možné pouze částečně, a to z hlediska celkových závěrů. Morton et al. 2014 vycházejí z dat pořízených pomocí matematických modelů, simulující ideální pozice slunce vůči senzoru a prostředí tak, aby bylo možno přesné posouzení míry odchylek. Ačkoliv je tak jejich výzkum mnohem podrobnější, nepracuje s reálnými daty. Úplné porovnání tak není možné. Pokud jde o možnost snímání systémem LIDAR, které bylo v původní studii určeno jako optimální nástroj pro eliminaci vlivů Slunce, neměli jsme technické prostředky takové snímání uskutečnit. Nicméně náš výzkum potvrdil jejich závěry. Poloha Slunce má výrazný vliv na vegetační indexy, které mohou vést ke špatné interpretaci výsledků.

6. Závěr

Výzkum přinesl zajímavé poznatky v dané problematice. Na rozdíl od původních studií jsou data pořízena v reálných podmínkách a účelně ke zkoumání těchto jevů. V podstatě tak doplňuje dřívější výzkumy, které vycházely z již pořízených dat, případně vytváření simulací. Nedostatkem výzkumu oproti původním studiím je rozsah celkového snímání, a to z hlediska času i rozlohy zkoumané plochy. Pro průzkum rozsáhlejšího charakteru bohužel nebyl potřebný prostor. Pokud by bylo možné provést více letů za delší časový interval, kdy by se sluneční poloha výrazně změnila, mohl výzkum přinést komplexnější poznatky. Je však třeba podotknout, že takto rozsáhlý výzkum nebyl primárním cílem práce. Ten spočíval v ověření samotné skutečnosti, zda k ovlivnění dochází a zda je výrazné. Tento cíl byl bezpochyby splněn. Výzkum potvrdil, že k jevu skutečně dochází a může se na výsledcích jednotlivých snímání značně projevit. Pokud je při výzkumu provedeno pouze jediné snímání, kdy se nebere v potaz aktuální poloha Slunce, mohou se hodnoty indexu pohybovat v rozsahu, který neodpovídá skutečnému stavu či dokonce samotnému typu vegetačního pokryvu.

Na základě výsledků této práce je tak možné konstatovat, že změna polohy Slunce vůči zkoumanému území může mít výrazný vliv na přesnost získaných dat, a to i případně průzkumu ploch minimálního rozsahu. Pokud je však provedeno více letů, rozložených ideálně v časových intervalech, je možné dosáhnout jisté kompenzace těchto výkyvů.

7. Zdroje

- Abdul Rahim, Hazli Rafis Bin, Muhammad Quisar Bin Lokman, Sulaiman Wadi Harun, and Gabor Louis Hornyak. 2016. "Applied Light-Side Coupling with Optimized Spiral-Patterned Zinc Oxide Nanorod Coatings for Multiple Optical Channel Alcohol Vapor Sensing." *Journal of Nanophotonics* 10 (3). <https://doi.org/10.1117/1.JNP.10.036009>.
- Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, and A. R. Huete. 1995. "A Review of Vegetation Indices." *Remote Sensing Reviews* 13 (1–2): 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>.
- Baumann, Paul R. 2009. "History of Remote Sensing, Satellite Imagery, Part II." 2009. http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/RS_History_II/RS-History-Part-2.html.
- Böhm, Josef. 2002. "Fotogrammetrie." Ostrava. <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/skripta/Fotogrammetrie.pdf>.
- Campbell, James B., and Randolph H. Wynne. 2011. *Introduction to Remote Sensing*. 5th ed. New York: The Guilford Press.
- "ČUZK." 2020. <https://www.cuzk.cz/>.
- Earth Observing System. 2020. "NDVI." 2020. <https://eos.com/ndvi/>.
- Fiala, Radek, and Karel Jedlička. 2010. "Dálkový Průzkum Země." Ústí nad Labem. http://gis.fzp.ujep.cz/GIS/DPZ/Materialy/DPZ_skripticka.pdf.
- Fischer, William A. 2019. "History of Remote Sensing." *Manual of Remote Sensing* 1: 27–50.
- "Fundamentals of Remote Sensing – Introduction." 2015. Natural Resources Canada. 2015. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/fundamentals-remote-sensing-introduction/9363>.

- Gouveia, C., R. M. Trigo, and C. C. DaCamara. 2009. "Drought and Vegetation Stress Monitoring in Portugal Using Satellite Data." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (1): 185–95. http://idlcc.fc.ul.pt/pdf/Gouveia_nhess_2009.pdf
- Holm, AM, DG Burnside, and AA Mitchel. 1987. "The Development of a System for Monitoring Trend in Range Condition in the Arid Shrublands of Western Australia." *The Australian Rangeland Journal* 9 (1): 14–20.
- Huete, Alfredo R., Kamel Didan, Yosio E. Shimabukuro, Piyachat Ratana, Scott R. Saleska, Lucy R. Hutya, Wenze Yang, Ramakrishna R. Nemani, and Ranga Myneni. 2006. "Amazon Rainforests Green-up with Sunlight in Dry Season." *Geophysical Research Letters* 33 (6): 2–5. <https://doi.org/10.1029/2005GL025583>.
- Jeeva, K, T Mekala, S Nandhini, C Saranya, S Veerakumar, and K Kasthuri. 2016. "Agriculture and Crop Assessment Studies Using Remote." *IJARMATE*, 316–22.
- Lillesand, Thomas M., Ralph W. Kiefer, and Jonathan W. Chipman. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Morton, Douglas C., Jyoteshwar Nagol, Claudia C. Carabajal, Jacqueline Rosette, Michael Palace, Bruce D. Cook, Eric F. Vermote, David J. Harding, and Peter R.J. North. 2014. "Amazon Forests Maintain Consistent Canopy Structure and Greenness during the Dry Season." *Nature* 506 (7487): 221–24. <https://doi.org/10.1038/nature13006>.
- Myneni, Ranga B., Forrest G. Hall, Piers J. Sellers, and Alexander L. Marshak. 1995. "Interpretation of Spectral Vegetation Indexes." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (2): 481–86. <https://doi.org/10.1109/36.377948>.
- Myneni, Ranga B., Wenze Yang, Ramakrishna R. Nemani, Alfredo R. Huete, Robert E. Dickinson, Yuri Knyazikhin, Kamel Didan, et al. 2007. "Large Seasonal Swings in Leaf Area of Amazon Rainforests." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (12): 4820–23. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611338104>.
- Pettorelli, Nathalie, Sadie Ryan, Thomas Mueller, Nils Bunnefeld, Bogumila Jedrzejska, Mauricio Lima, and Kyrre Kausrud. 2011. "The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen Successes in Animal Ecology." *Climate Research* 46 (1): 15–27. <https://doi.org/10.3354/cr00936>.
- Richards, John A. 2012. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 5th ed. New York: Springer.

- Saleska, Scott R., Kamel Didan, Alfredo R. Huete, and Humberto R. Da Rocha. 2007. "Amazon Forests Green-up during 2005 Drought." *Science* 318 (5850): 612. <https://doi.org/10.1126/science.1146663>.
- Samanta, Arindam, Sangram Ganguly, Hirofumi Hashimoto, Sadashiva Devadiga, Eric Vermote, Yuri Knyazikhin, Ramakrishna R. Nemani, and Ranga B. Myneni. 2010. "Amazon Forests Did Not Green-up during the 2005 Drought." *Geophysical Research Letters* 37 (5). <https://doi.org/10.1029/2009GL042154>.
- Samanta, Arindam, Sangram Ganguly, Eric Vermote, Ramakrishna R. Nemani, and Ranga B. Myneni. 2012. "Interpretation of Variations in MODIS-Measured Greenness Levels of Amazon Forests during 2000 to 2009." *Environmental Research Letters* 7 (2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024018>.
- Soudani, Kamel., and Christophe Francois. 2014. "A Green Illusion." *Nature* 506: 165–66.
- "SunCalc." 2020. 2020. <https://www.suncalc.org/>.
- Tiwari, Ravindra, Kshama Awasthi, and S N Rajan. 2018. "Vegetation Change Detection in Delhi Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)." *International Journal of Information and Communication Technology* 1 (1).
- Wang, Guangxing, and Qihao Weng. 2014. *Remote Sensing of Natural Resources*. Terre Haute: CRC Press.
- Xue, Jinru, and Baofeng Su. 2017. "Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications." *Journal of Sensors* 2017: 17. <http://downloads.hindawi.com/journals/js/2017/1353691.pdf>.

8. Přílohy

Mean									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 0204	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red		124,151	134,4	129,626	141,478	133,916	139,981
		Green		96,0572	109,523	99,0107	113,056	107,084	98,3244
		Infra		211,667	209,319	216,278	208,342	197,754	225,153
	Vegetace křovinná	Red		98,8653	116,915	106,252	98,8361	111,217	127,556
		Green		58,6224	70,6742	61,0498	59,9348	69,4969	72,5266
		Infra		165,128	176,081	174,389	156,729	166,408	196,621
	Vegetace stromová	Red		89,9629	102,774	91,3706	86,4233	99,1055	113,239
		Green		65,6224	66,7193	57,6658	57,0803	67,7023	76,3917
		Infra		172,925	173,693	169,979	157,575	170,245	184,673
Plochy zpevněné	Red		115,331	155,968	151,053	131,613	148,575	164,311	
	Green		74,8575	106,258	93,2634	92,6492	106,14	103,91	
	Infra		163,87	182,024	183,001	163,834	176,858	201,217	

Mean									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 02	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red		90,5253	103,339	91,9342			
		Green		65,2325	65,9558	56,993			
		Infra		172,268	174,796	171,246			
	Vegetace křovinná	Red		99,6503	115,664	104,583			
		Green		58,3018	70,1783	60,8125			
		Infra		165,488	174,67	173,044			
	Vegetace stromová	Red		123,828	134,078	128,913			
		Green		95,4192	108,984	98,0871			
		Infra		210,138	208,365	214,878			
Plochy zpevněné	Red		123,84	155,782	150,732				
	Green		86,7179	109,152	96,1893				
	Infra		163,429	181,309	182,281				

Mean									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 04	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red					143,23	132,558	126,397
		Green					114,886	105,93	91,5058
		Infra					210,637	196,591	211,086
	Vegetace křovinná	Red					104,865	98,7636	104,075
		Green					69,7023	64,9405	69,067
		Infra					172,738	166,772	174,847
	Vegetace stromová	Red					109,151	111,48	110,56
		Green					65,5707	68,1097	63,1022
		Infra					165,302	165,615	177,702
Plochy zpevněné	Red					146,178	156,552	155,574	
	Green					104,864	113,991	100,94	
	Infra					173,158	180,923	190,058	

Příloha 1: Data reflektance (MEAN)

Median								
			2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 0204	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	Red		124	134	129	145	135
Green			96	110	99	116	108	98
Infra			212	209	216	212	199	230
Vegetace křovinná	Red		97	116	105	103	119	114
	Green		57	70	59	53	68	62
	Infra		162	173	171	157	169	192
Vegetace stromová	Red		89	103	91	81	98	86
	Green		66	66	56	41	55	53
	Infra		177	170	165	147	164	179
Plochy zpevněné	Red		125	162	158	155	168	174
	Green		75	105	92	108	116	100
	Infra		168	184	186	182	189	205

Median								
			2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 02	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	Red		90	103	91	/	/
Green			66	65	56	/	/	/
Infra			176	174	170	/	/	/
Vegetace křovinná	Red		98	115	104	/	/	/
	Green		56	69	58	/	/	/
	Infra		163	172	170	/	/	/
Vegetace stromová	Red		124	134	129	/	/	/
	Green		96	110	99	/	/	/
	Infra		211	209	215	/	/	/
Plochy zpevněné	Red		135	159	155	/	/	/
	Green		87	107	94	/	/	/
	Infra		166	183	184	/	/	/

Median								
			2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 04	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	Red		/	/	/	147	135
Green			/	/	/	118	108	93
Infra			/	/	/	214	199	221
Vegetace křovinná	Red		/	/	/	110	100	82
	Green		/	/	/	65	52	50
	Infra		/	/	/	171	158	167
Vegetace stromová	Red		/	/	/	116	119	94
	Green		/	/	/	63	64	53
	Infra		/	/	/	170	169	169
Plochy zpevněné	Red		/	/	/	168	172	163
	Green		/	/	/	115	118	101
	Infra		/	/	/	188	190	200

Příloha 2: Data reflektance (MEDIAN)

Strandart deviation									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 0204	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red		8,143226	5,37424	7,16121	16,9156	12,3615	23,178
		Green		7,850355	5,36899	6,74773	15,015	11,873	14,0435
		Infra		21,52352	6,2857	6,95858	17,9193	12,3224	22,4384
	Vegetace křovinná	Red		13,58529	10,0901	13,2688	42,1024	39,689	46,9669
		Green		11,61916	15,8591	13,5097	32,6813	35,6771	30,53
		Infra		19,98192	15,5831	18,3162	37,9559	35,7438	38,9004
	Vegetace stromová	Red		12,93539	10,6812	13,3326	46,8755	46,0889	59,3186
		Green		13,98005	13,7382	12,8651	38,2703	41,658	51,2761
		Infra		21,52352	19,0552	24,8349	51,3526	49,7044	46,8958
Plochy zpevněné	Red		32,95814	21,9258	26,1223	49,9484	40,2555	34,2132	
	Green		24,17059	17,033	18,8967	34,3004	30,1419	27,7751	
	Infra		18,69941	9,85591	13,384	37,7347	30,5037	26,3193	

Strandart deviation									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 02	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red		13,11491	13,0897	15,3887			
		Green		14,17977	14,3165	13,0015			
		Infra		21,57514	19,0451	24,8168			
	Vegetace křovinná	Red		15,77302	12,6391	16,223			
		Green		14,75776	17,7092	15,6244			
		Infra		22,55102	17,7559	21,5925			
	Vegetace stromová	Red		8,259246	5,7847	7,70649			
		Green		8,289752	6,51208	7,5056			
		Infra		9,602651	7,61981	8,14691			
Plochy zpevněné	Red		27,17986	20,4547	24,3967				
	Green		23,57181	17,5397	19,1672				
	Infra		14,76713	9,45525	12,7062				

Strandart deviation									
			2019_12_02			2019_12_04			
Plocha 04	Typ plochy	Typ záření	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	Red					16,0972	14,2596	32,7744
		Green					14,5425	13,4535	18,0925
		Infra					17,5396	13,6354	33,3286
	Vegetace křovinná	Red					44,0653	42,7241	56,0702
		Green					38,3076	39,7637	47,9488
		Infra					46,4641	46,7786	48,8015
	Vegetace stromová	Red					40,4321	39,0211	45,497
		Green					32,7964	35,537	28,7497
		Infra					36,1167	34,6578	42,5118
Plochy zpevněné	Red					43,4977	34,9487	39,1393	
	Green					30,3977	28,5549	26,3985	
	Infra					33,2165	26,2568	33,3733	

Příloha 3: Data reflektance (STD)

NDVI (MEAN)							
		2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 0204	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	0,2606	0,21797	0,25051	0,19114	0,19248	0,23326
	Vegetace křovinná	0,251	0,20194	0,24279	0,22653	0,1988	0,21305
	Vegetace stromová	0,31558	0,25652	0,30078	0,29161	0,26411	0,23978
	Plochy zpevněné	0,17385	0,07709	0,09564	0,10906	0,08691	0,10096

NDVI (MEAN)							
		2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 02	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní	0,31105	0,25691	0,30136			
	Vegetace křovinná	0,24832	0,20324	0,2466			
	Vegetace stromová	0,25844	0,21693	0,25005			
	Plochy zpevněné	0,13781	0,07573	0,09474			

NDVI (MEAN)							
		2019_12_02			2019_12_04		
Plocha 04	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00
	Vegetace travní				0,19049	0,19454	0,25094
	Vegetace křovinná				0,2445	0,25612	0,25373
	Vegetace stromová				0,20459	0,19537	0,23292
	Plochy zpevněné				0,08449	0,07222	0,09977

Příloha 4: Výpočet indexu NDVI

NDVI (MEAN)								
		2019_12_02			2019_12_04			NDVI (02.12)
Plocha 02	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní	0,323308	0,256318	0,302682				0,2941
	Odchylka	0,029206	-0,03778	0,008579				
	Vegetace křovinná	0,248316	0,203235	0,246596				0,2327
	Odchylka	0,0156	-0,02948	0,013881				
	Vegetace stromová	0,258438	0,216932	0,250051				0,2418
	Odchylka	0,016631	-0,02487	0,008244				
	Plochy zpevněné	0,13781	0,075727	0,094738				0,1028
	Odchylka	0,035052	-0,02703	-0,00802				

NDVI (MEAN)								
		2019_12_02			2019_12_04			NDVI (04.12)
Plocha 04	Typ plochy	10:00	12:00	15:00	10:30	12:30	15:00	
	Vegetace travní				0,190488	0,19454	0,250941	0,2120
	Odchylka				-0,0215	-0,01745	0,038952	
	Vegetace křovinná				0,244499	0,256118	0,253735	0,2515
	Odchylka				-0,00695	0,004667	0,002285	
	Vegetace stromová				0,204594	0,195366	0,232919	0,2110
	Odchylka				-0,00637	-0,01559	0,021959	
	Plochy zpevněné				0,084488	0,072215	0,099772	0,0855
	Odchylka				-0,001	-0,01328	0,01428	

Příloha 5: Výpočet odchylek NDVI - doplňkové překryvy

Let č.1. započítán					
Typ plochy	NDVI (celkový průměr)	NDVI (02.12.)	Odchylka	NDVI (04.12)	Odchylka
Trav. v.	0,2243	0,2430	0,0187	0,2056	-0,0187
Křov. v.	0,2224	0,2319	0,0096	0,2128	-0,0096
Strom. v.	0,2781	0,2910	0,0129	0,2652	-0,0129
Zpev. pl.	0,1073	0,1155	0,0083	0,0990	-0,0083

Let č.1. nezapočítán					
Typ plochy	NDVI (celkový průměr)	NDVI (02.12.)	Odchylka	NDVI (04.12)	Odchylka
Trav. v.	0,2171	0,2342	0,0172	0,2056	-0,0114
Křov. v.	0,2166	0,2224	0,0057	0,2128	-0,0038
Strom. v.	0,2706	0,2786	0,0081	0,2652	-0,0054
Zpev. pl.	0,0939	0,0864	-0,0076	0,0990	0,0050

Příloha 6: Výsledné hodnoty

9. Seznam obrázků a příloh

Obrázek 1: Proces funkce DPZ	6
Obrázek 2: Princip fungování NDVI	11
Obrázek 3: Amazonie - index EVI v roce 2005	14
Obrázek 4: Porovnání původních a nových dat	16
Obrázek 5: Vliv polohy snímače a Slunce vůči povrchu	19
Obrázek 6: Zájmové území – Libosad, ČZU	22
Obrázek 7: Využitý systém UAV	23
Obrázek 8: Kalibrační deska	24
Obrázek 9: Pořízené snímky RGN a NIR	25
Obrázek 10: Informace o letu.....	25
Obrázek 11: Příklad vybraných snímků (RGN).....	26
Obrázek 12: Georeference snímku na podkladovém ortofotu	27
Obrázek 13: Identifikované plochy	29
Obrázek 14: Definované plochy analýzy	30
Obrázek 15: Vybrané statistické veličiny pro plochu 0204	32
Obrázek 16: Příklad grafického porovnání hodnot (0204 - Průměr)	33
Obrázek 17: Výpočet NDVI	34
Obrázek 18: Grafické porovnání indexu NDVI (plocha 0204).....	34
Obrázek 19: Poloha Slunce vůči zájmovému území.....	35
Obrázek 20: Výpočet odchylek hodnot NDVI (Plocha 0204)	36
Obrázek 21: Porovnání tendenčního charakteru hodnot NDVI, plocha 0204	37
Obrázek 22: Porovnání tendenčního charakteru hodnot NDVI, plocha 02 a 04.....	37
Obrázek 23: Neúplný překryv prvního letu	38
Obrázek 24: Ovlivnění výsledků neúplným překryvem	39
Příloha 1: Data reflektance (MEAN)	47
Příloha 2: Data reflektance (MEDIAN)	48
Příloha 3: Data reflektance (STD).....	49
Příloha 4: Výpočet indexu NDVI.....	50
Příloha 5: Výpočet odchylek NDVI - doplňkové překryvy	51
Příloha 6: Výsledné hodnoty	52