

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta životního prostředí  
Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování



## **DIGITÁLNÍ MODELY TERÉNU V KRAJINNÉ EKOLOGII A EKOLOGII ŽIVOČICHŮ**

Teze disertační práce

Ing. Ondřej Lagner

Duben 2017

Praha

## Obsah

Úvod .....	4
Cíle práce .....	6
Rešerše .....	7
Vývoj digitálních modelů .....	7
Datové zdroje.....	11
Topografické mapování.....	11
Letecká fotogrammetrie .....	12
Lidarové měření .....	12
Canopy Height Model .....	14
Analýzy viditelnosti .....	15
Problematika geodat - TIN nebo Raster? .....	16
Vstupní podkladová data .....	17
Přesnost analýz .....	18
Korelační koeficient elevace a viditelnosti.....	19
Modelování viditelností v ekologii živočichů a krajinné ekologii .....	20
Shrnutí.....	21

Metodika disertační práce.....	22
1. Jak přesnost dat ovlivňuje spolehlivost modelů analýzy viditelnosti.....	22
Cíle práce.....	22
Zájmové území a vstupní data .....	22
Zpracování dat.....	23
Terénní měření.....	24
Výsledky .....	24
2. Méně přesná vstupní data způsobují silné nadhodnocení viditelné oblasti v digitálních modelech viditelnosti .....	25
Cíle práce.....	25
Zájmové území .....	25
Vstupní data a zpracování dat.....	26
Výsledky .....	26
3. Význam použití surových dat: Případová studie zaměřená na canopy height modelaci křoví.....	28
Cíle práce.....	28
Zájmové území a vstupní data .....	28
Zpracování dat.....	29
Terénní měření.....	29
Výsledky .....	29
Očekávané výstupy.....	31
Přílohy.....	32
Zdroje literatury.....	33

## ÚVOD

Modely terénu byly vždy úzce spojené s vědními obory, jako je vojenské inženýrství, krajinné plánování, architektura, stavebnictví a dalšími vědními obory o Zemi. Původně se jednalo o modely vyrobené z pryže, plastu, hliníku, písku apod. Koncem padesátých let 20. století však pronikají digitální technologie i do této oblasti (Li et al., 2005). Modelování povrchu terénu se od této doby provádí výpočetně a digitálně. S postupem času se tato vědní disciplína začala označovat jako digitální modelování terénu. Digitální modelování je proces získávání modelů zemského povrchu. Digitální modely našly s postupem času široké uplatnění v různých vědních odvětvích jako je kartografické mapování, vojenské mapování, stavební a důlní inženýrství, geologie, geomorfologie a územní plánování.

K vytvoření digitálního terénního modelu jsou potřebná data, která obsahují informaci o své poloze. Prostorových dat je však nepřehledné množství. Data lze dělit podle měřítka zpracování, polohové přesnosti, druhu zpracování, datového modelu, dokonce lze získat data komerčně či naopak bezplatně. Vzhledem k velkému výběru geodat dochází často při zpracování k nekritickému výběru vhodných dat pro konkrétní analýzu. Nežádá se tak stává, že pro lokální studii jsou použita data globálního měřítka, která zrovna byla zdarma, či se naopak použila data velmi drahá, ačkoli by je bylo možné zastoupit daty volně dostupnými.

Tato práce pojednává o prostorových datech, které jsou nezbytné pro tvorbu digitálních modelů terénů. Předkládané dílo se snaží nalézt přiměřená prostorová data pro konkrétní analýzy v terénu jak z hlediska náročnosti na zpracování i náročnosti finanční. Analýzy viditelnosti, které jsou v této práci silně zastoupené, nemají určit nejvhodnější lokality pro stavbu rozhledny, či detekovat vliv stavebního záměru na krajinu. Viditelnostní analýzy jsou zde brány jako nástroj hodnocení přesnosti digitálních modelů terénu či povrchu.

Dosavadní analýzy viditelnosti využívají jako podklad digitální elevační model, či model povrchu Země v rastrovém formátu. Výsledek analýzy se odvíjí od přesnosti vytvořeného rastru, resp. použitých prostorových dat a použité metodiky. Postupů, jak

vytvořit rastr zobrazující nadmořské výšky, je značné množství a bylo na toto téma napsáno mnoho prací a vědeckých článků. Výrazně méně prací se zaměřuje na porovnání a definování vhodných geodat pro aplikaci v krajinné ekologii v ekologii ptáků a modelování biotopů.

Předkládaná práce se zabývá digitálními modely terénu v krajinné ekologii, ekologii ptactva a modelování biotopů. Pro účely práce je digitální model terénu (DMT, DTM) definován jako rastrová matice zobrazující nadmořské výšky. Digitální terénní model je také brán jako termín nadřazený digitálnímu modelu povrchu (DMP, DSM) a digitálnímu modelu reliéfu resp. digitálnímu elevačnímu modelu (DMR, DEM).

Práce je strukturovaná na rešeršní část a tři studie. Rešerše přináší ucelený pohled na problematiku digitálního modelování terénů, proces získávání prostorových dat, tvorbu vhodných digitálních modelů a hodnocení vytvořených modelů pomocí analýz viditelnosti. Vzhledem k obsáhlosti problematiky digitálních modelů krajiny práce vyzdvihuje pouze odborné přístupy, které jsou využity v navazujících studiích.

## CÍLE PRÁCE

Nalezení vhodných geodat a ideální metody zpracování prostorových dat za účelem vytvoření digitálního modelu terénu, který by co nejpřesněji odpovídal skutečnosti, je velmi obsáhlá a složitá vědní disciplína. Cílem této disertační práce je možné využití analýz viditelnosti nejenom jako nástroje pro definování viditelných a neviditelných míst na výškovém rastru, ale představení nástroje výpočtu viditelnosti jako možnou alternativu pro hodnocení digitálních modelů. Vzhledem ke skutečnosti, že digitální modely zákonitě vycházejí z prostorových dat, lze tímto způsobem hodnotit přesnost a kvalitu vstupních dat, které jsou použity při tvorbě digitálních modelů. Cíle práce jsou následující:

- Vyhodnocení využitelnosti odlišných typů prostorových dat pro analýzy v krajinné ekologii a ekologii živočichů.
- Využití analýz viditelnosti jako nástroje pro validaci přesnosti digitálních modelů terénu.
- Vyhodnocení vlivu míry zpracování vstupních dat na přesnost digitálních terénních modelů.

# REŠERŠE

## Vývoj digitálních modelů

Snaha o zobrazení světa je stejně stará jako lidstvo samo. V historii civilizace můžeme najít mnoho pokusů o zachycení a ilustraci povrchu planety Země. Spolu s evolucí člověka a vývojem technologií se zpřesňovaly a vynalézaly sofistikované prostředky k vypočtení průběhu zemského reliéfu. Prvotní vznik digitálních terénních modelů byl pro vojenské využití. V průběhu času se staly neméně důležitým podkladem pro krajinné architekty, stavební inženýry, projektanty a odborníky v přírodovědných oborech. Původně byl terén zobrazován jako fyzikální model, vyrobený z jílu, písku později pryže či plastu (Li et al., 2005). V roce 1950 i tato oblast byla ovlivněna zavedením počítačových technologií. Modelování terénu se v té době proměnilo na číselnou soustavu a následně i na digitální vizualizaci. Tyto kroky vedly k vytvoření a zavedení současné vědní disciplíny modelace digitálních modelů terénu. Hlavním předmětem této disciplíny je proces získávání informací o zemském povrchu, jeho zpracování a následná vizualizace. Tato problematika našla široké uplatnění v navazujících oborech jako je kartografie, dálkový průzkum Země, stavebnictví, důlní inženýrství, geologie, geomorfologie, vojenské inženýrství, územní plánování, krajinná ekologie a ekologie živočichů (Yu, 1996).

Lidé se odjakživa snažili využít všech prostředků k zjištění zastoupení rozličných jevů v terénu. Různé obrazové znázornění krajiny ze starověku mohou být považovány za nejstarší reprezentace (Maune et al., 2001). Tyto obrazy ukazují obecné informace o terénních fenoménech jako je tvar a barvu terénu, nicméně metrika a přesnost těchto vyobrazení je na extrémně nízké úrovni. Z těchto důvodů nemohly být tyto předobrazy digitálních modelů terénu nikdy použity pro technické účely. Jedná se spíše o vizuální vjem krajiny na dotýčného autora. V období antiky byly také používány symbolické a semi – obrazové popisy krajiny. Tato díla lze považovat za první trojrozměrné znázornění povrchu terénu. Míra přesnosti a metrická kvalita je však na velmi podobné úrovni, jako u první obrazových znázornění krajiny (Moore et al. 1994).

Na vyšší úrovni jsou v této problematice starověké mapy. Ve své podstatě se jedná o efektivní způsob prezentace průběhu krajiny. Někteří autoři tvrdí (Li et al., 2005), že mapy hrály podobně důležitou roli ve vývoji společnosti stejně jako jazyk. Nezastupitelnou funkci mapy také tvořily při dobývání cizích území či obraně před nepřítelem. Podstatou vývoje map je tedy zpřesňování a reálnější znázornění skutečného stavu. Moderní mapy využívají propracovaný systém mapových klíčů a stanovují matematická pravidla pro kartografickou reprezentaci. Tři hlavní charakteristiky moderních map jsou:

1. Přesnost zajištěná matematickými pravidly
2. Využití generalizace s klesajícím rozlišením mapy
3. Intuičnost symbologie

Velmi využívanou a nejnámější metodou znázornění reliéfu je využití čar se stejnou nadmořskou výškou tzv. isohyps v českém překladu vrstevnic. Na topografických mapách jsou všechny zastoupené terénní prvky ortogonálně promítnuty na zobrazovací plochu. V závislosti na měřítku mapy je možné isohypsy nahradit bodem či jiným kartografickým symbolem. Výšku terénu lze v mapě vyčíst z pomocného popisu. Tyto hodnoty jsou označovány jako kóty. Použití map s výškopisem znázorněným vrstevnicemi je možné vystopovat až do 18. století. Zde je možné se opět setkat s názorem, že tato invence je jedním z nejdůležitějších objevů v kartografické historii, zvláště pro svojí jednoduchost a pohodlí při čtení mapy (van Kreveld, 1996).

Ve své podstatě je mapa vědecké zobecnění reality a terénu. Topografické mapy jsou založeny na převodu trojrozměrné reality na dvojrozměrnou plochu. Tato konverze zákonitě generuje míru nepřesnosti a zkreslení. Toto je považováno za jeden z důvodů snahy znázornění povrchu země pomocí třetího rozměru, nebo alespoň jeho iluze. Tradičně je toto řešeno pomocí scénografie, šrafováním, stínováním a barevnou hypsometrií. Právě stínování se ve zvýšené míře využívá dosud, jelikož je může být snadno generováno pomocí počítačové techniky (Skidmore, 1989).

Ve srovnání s výkresy má větší vypovídající hodnotu obrazové zachycení reality z důvodu podrobnosti a srozumitelnosti nejen pro ne odbornou veřejnost. Proto, jakmile byla vynalezena fotografická technika, rychlým tempem se umístila na předních příčkách



možností zachycení reality. Od roku 1848 se tak fotografie a později letecké snímky využívají pro reprezentaci terénu. Nicméně letecká fotografie zobrazuje zemský povrch opět pouze ve dvou rozměrech. Z toho důvodu nelze využít jedné fotografie k odvození výšky pozemních bodů. Upravené letecké snímky po korekcích mohou být využity v určitém smyslu jako geodetický plán. Ovšem opět bez výšky zobrazovaných objektů. Třetí rozměr však lze vyčíst z dvojice snímků, které mají určité procento překryvu sledované oblasti. Tato technika je nazývána jako fotogrammetrie. Pomocí fotogrammetrie je možné vytvářet plnohodnotný digitální model terénu a také se k tomu velkou část zvláště druhé poloviny 20. století využívala (Tang, 1989).

Nevýhodou snímků pořízených z paluby letadla je malá oblast, kterou je možné nasnímat za jeden let. Proto od roku 1970 je letecké snímkování doplněno o snímkování satelitní. Princip zůstává zachován, pouze se změnila výška letu. Vzhledem ke skutečnosti, že mnoho satelitních snímků se překrývá, není překážky pro využití těchto dat k doplnění a rozšíření možností fotogrammetrie (Li et al., 2001).

Zavedení matematických, početních a digitálních metod do modelování terénu vděčí specialistům zabývajících se fotogrammetrií. V roce 1950 byla fotogrammetrie velkou měrou používána pro sběr dat a plánování nových dálnic v USA. Roberts (1957) jako první navrhol využít počítač a digitální fotogrammetrii jakožto nový nástroj pro získávání a zpracování dat nutných pro projekty dálnic. Tuto myšlenku dále rozvinuli Miller a Laflamme (1958) z Masechusettského institutu technologií a vyvinuli metodu na vytvoření digitálního modelu země. Pomocí vybraných bodů změřili stereometricky jejich souřadnice včetně souřadnice výškové podél navržených silnic. Tito autoři také vytvořili koncepci digitálních terénních modelů a definovali jí následovně:

Digitální terénní model je statistická reprezentace spojitého zemského povrchu, pomocí množství vybraných bodů se známými souřadnicemi X, Y, Z v libovolném souřadnicovém systému. Oproti analogové formě má využití digitálních systémů mnoho výhod. Miller a Laflamme (1958) definovali následující:

1. Různé podoby reprezentace. Digitální technologie snadno umožňuje vyrobit množství vizualizací, vertikální řezy terénu, průřezy, náhledy a 3D animace.

2. Digitální forma neztrácí správnost údajů v čase. Na rozdíl od papírových map, kdy papír ztrácí své vlastnosti, může docházet k deformacím, digitální médium toto nepřípouští.
3. Vyšší míra automatizace a zpracování dat v reálném čase zvyšuje efektivitu a množství zpracovaných údajů v případě využití počítačů a digitálních technologií. Aktualizace těchto dat je mnohem flexibilnější než v případě využití analogové formy.
4. Digitální modely terénu umožňují vytvoření vizualizací v různých měřítcích a odlišných rozlišeních.

Digitální terénní model byl definován jako číselná reprezentace terénu. Původní název razil Miller a Laflamme (1958) avšak zažité jsou i jiná alternativní označení. Mezi ně patří digitální výškový model (digital elevation model - DEM), digitální výškové modely (Digital height model – DHM), digitální pozemní modely (Digital ground model – DGM) či digitální terénní elevační model (Digital terrain elevation model – DTEM). Tyto výrazy vznikaly nezávisle na sobě vývojem v různých zemích. DEM je široce využíván ve Spojených státech, DHM využívá Německo, DGM pochází ze Spojeného Království a DTEM byl zaveden americkou geologickou službou (Petrie, Kennie, 1987). V praxi se výše uvedené pojmy často překládají a považují za synonyma. V drtivé většině se o slova stejného významu jedná, avšak existují případy, kdy různá označení představují odlišné produkty. Znamená to tedy, že mohou existovat mírné rozdíly mezi těmito označeními. Li (1990) uvádí srovnání těchto produktů následovně:

1. Ground: „pevný povrch Země“; „základ pevninské části“; „Povrch Země“; „dno moře“ apod.
2. Height: „měření od základny vertikálně vzhůru“; „nadmořská výška či jiná uznávaná výška“; „výška hladiny moře (hloubka)“ apod.
3. Elevation: výška nad stanovenou úroveň (zejména se využívá nad hladinou moře), výška nad horizontem atd.
4. Terén: Nejsvrchnější část země s jeho přírodními prvky.

Mezi tento výčet pojmů je možné zahrnout ještě digitální model povrchu (Digital surface model - DSM). Na rozdíl od ostatních tento model znázorňuje průběh

terénu společně s veškerými objekty na jeho povrchu. Je tedy zřejmé, že takto vytvořený model obsahuje vegetační pokryv, budovy, industriální stavby a další antropogenní prvky.

Terminologie v této oblasti není jasně stanovena. Jak již bylo napsáno výše, záleží na geografické příslušnosti a zvyku, jaké označení je použito pro konkrétní produkt. V rámci Česka jsou vytvářeny a distribuovány dva hlavní datové produkty popisující průběh zemského povrchu. Jedná se o digitální model reliéfu a digitální model povrchu. Oba dva tyto produkty je možné označit jako digitální modely terénu, ačkoli reliéf obsahuje pouze průběh pevného zemského povrchu, na rozdíl od modelu povrchu, který splňuje kritéria napsaná o odstavci výše. Správcem a poskytovatelem těchto datových sad je Český úřad zeměměřičský a katastrální (Lagner, 2014).

Účelem tohoto krátkého exkurzu je přiblížení historie a vývoje problematiky zabývající se digitálním pohledem na povrch planety Země. Snaha o znázornění zemského průběhu bude provázet lidstvo stále, stejně jako neustálá snaha zobrazit a vymodelovat nejsvrchnější geologické vrstvy Země co možná nejuvěrněji.

## Datové zdroje

Zemské kontinenty zabírají rozlohou asi 150 milionů km<sup>2</sup>, což představuje 29% zemského povrchu. Suchozemská část planety je pokryta přírodními i kulturními prvky, kdy hlavní terénní činitele jsou geomorfologické procesy, avšak určitou část zemského povrchu transformoval člověk. Lze tvrdit, že zemský povrch je natolik členitý, že nelze stanovit jednoznačně správnou metodu mapování (Li et al., 2005).

## Topografické mapování

Každá země má své topografické mapy, které jsou využívány jako zdroj informací pro další analýzy a modelování terénu. Právě topografické mapování slouží jako hlavní zdroj dat pro vytvoření digitálních modelů terénu či povrchu. Dříve byly analogové mapy vektorizovány. Dnes už se spíše setkáváme s digitálním sběrem dat, kdy odpadá analogový formát a naměřená terénní data jsou rovnou zobrazena jako data digitální. Modelovací procesy tak využívají přímo data vektorová, která obsahují kromě složky

polohové i složku popisnou. Pomocí interpolačních metod jsou poté geodata transformována do plátových či rastrových modelů, které jsou využitelnější pro následné analýzy. Design sběru dat, měřítko a míra generalizace jsou hlavní veličiny, které ovlivňují přesnost výsledného modelu. Tyto faktory je nutné zohlednit při tvorbě digitálních modelů, aby přesnost výsledku odpovídala přesnosti vstupních dat.

## Letecká fotogrammetrie

Topografické pozemní mapování je proces velmi zdlouhavý a finančně náročný. Mapovaná oblast pokrývá pouze malou část zemského povrchu. Tato myšlenka nejspíše předcházela zavedení metody letecké fotogrammetrie. Historicky je tato metoda datována do poloviny 19. století, kdy byl fotoaparát umístěn na vzdušném drakovi. Základním principem fotogrammetrie je využití dvojice stereosnímků, které mají nenulovou horizontální paralaxu a určitý překryv. Při překrytí těchto snímků dochází k vytvoření stereomodelu, ze kterého je možné vyčíst vertikální výšku sledovaných objektů. Nejdříve pomocí stereokomparátoru – přístroje na zobrazování stereosnímků, později na počítačích byly odečítány výšky a vytvářel se terénní model.

## Lidarové měření

Laser jako nástroj pro dálkový průzkum země, je technologie stará asi 40 let. V šedesátých a sedmdesátých letech mnoho experimentů demonstrovalo možnosti využití laserového paprsku nejenom v oblastech pozemských. Monitoroval se zemský povrch, atmosféra, oceány, a navíc odražený paprsek našel své uplatnění i při poznávání povrchu Měsíce (Flood, 2001). Díky stále spolehlivějším sensorům a detailnějšímu rozlišení Lidarových systémů, ustálila se tato metoda jako jeden z nejdůležitějších nástrojů využívaných v dálkovém průzkumu Země, ve fotogrammetrii i mapování (Ackermann, 1996). V posledních letech navíc dochází k masivnímu rozšíření využití lidarů. Kompaktní a relativně dostupná cena usnadňuje pořízení skenovací technologie širokému spektru uživatelů a institucí.

Hlavní předností lidarů je jeho extrémně vysoká přesnost, kdy se za pomoci laserového paprsku ve velice rychlých cyklech měří doba odrazu od povrchu a spolu s údaji o poloze bezpilotního zařízení i nadmořská výška povrchu. V současnosti jsou skenovací technologie montovány výhradně na paluby malých letadel. Se stále se zmenšující hmotností a velikostí se však rozmáhá využití lidarů ve spojení s bezpilotními prostředky. Multikoptery nebo vrtulníky, však dokáží snímat pouze velmi malé oblasti v důsledku nízké rychlosti a vyššího zatížení senzorem. Z tohoto důvodu jsou tyto systémy použitelné pro monitorování pouze několika hektarů za jeden let, což znamená výrazné omezení (Zarco-Tejada et al., 2014).

Lidar je široce využívaná zaměřovací technologie. Má však omezení v prostorových a časových měřících, což může vést k dalšímu výzkumu využití této technologie (Vierling et al., 2008, Browning et al., 2015, Calders et al., 2015). Tato omezení v měřících jsou významná především v ekosystémech aridních oblastí, jelikož je zde častý výskyt řídké vegetace. Změny ve struktuře této krajiny za relativně krátkou dobu jsou důsledkem lesních požárů, herbivorů nebo rychlého růstu vegetace po četných srážkách (Friedel et al., 2000, D'Odorico et Porporato 2006, Huang et al., 2007). Vzniklá dynamika a různorodost přispívá k nejistým odhadům pozemní zásoby uhlíku (Huenneke et al., 2001, Hill et al., 2013). Aby se zamezilo těmto nejistotám, je vyžadován vývoj nových technik pro efektivní a přesné měření pozemní biomasy v intervalech, kterými bude možné zachytit zmiňovanou dynamiku (Strand et al., 2008, Hill et al., 2013, Murray-Tortarolo et al., 2016). Množství biomasy je běžně odhadováno pomocí druhově specifických regresních alometrických modelů, odvozených za pomoci terénního průzkumu (Huenneke et al., 2001, Allen et al., 2008, Muldavin et al., 2008). Pozemní monitorovací programy využívající druhově, místně a časově specifické vztahy mezi biomasou v různých měřících dosahují značné přesnosti. Jsou však mnohdy komplikované a rovněž náchylné na nedostatečné množství odebraných vzorků v prostorově heterogenních ekosystémech (Huenneke et al., 2001, Rango et al., 2006, Allen et al., 2008, Muldavin et al., 2008, Nafus et al., 2009).

## Canopy Height Model

Metoda Canopy height model (CHM) odvozená z metody lidarového sběru dat je téměř stejně stará, jako samotné lidarové měření. CHM je primárně určen pro zobrazení korun stromů. Typický tvar koruny listnatého stromu představuje klenbu - canopy, z čehož byl následně odvozen název pro tuto metodu. Často jsou však termínem CHM označovány všechny výsledky zpracování prostorových dat, které zobrazují různé prvky na zemském povrchu, ne pouze lesní vegetaci. Pravý canopy height model je však pouze ten, který zobrazuje vegetaci, a veškeré ostatní nadzemní prvky jsou odstraněny. CHM jsou představovány jako velmi přesná metoda zobrazování zemského povrchu, avšak pouze v případě, kdy prezentují odrazy lidarových paprsků. Omezení nastává v případě, kdy je CHM převeden do rastrového formátu. Tato transformace znehodnotí informace o jednotlivých odrazech a model je dále reprezentován pouze jako matice číselných hodnot. Velmi důležitým parametrem je také doba náletu laserovým skenerem. Nežádá se tento proces plánuje v době, kdy je vegetace neolistěná. Zpracovaný CHM poté nepředstavuje koruny stromů, ale pouze fragmenty větví stromů (O'Neil-Dunne, 2014).

Canopy height modely mají velký význam v oblastech lesnictví, kde se používají zvláště pro odhady dřevní hmoty a zásob uhlíku. (Corona Fattorini, 2008; Steinmann et al., 2013), v zemědělství (Naasset, 2002) či obecně v modelování ekosystémů. Význam CHM v kombinaci s pozemním měřením spočívá v predikci významných krajinných či lesnických údajů. Tato metoda je užívána ve spojení s lidarovými daty. Laserový paprsek vyslaný z paluby letadla či bezpilotního prostředku může proniknout pod koruny či větve stromů. Z jednoho měření tak díky mnohonásobnému odrazu lze získat více informací. Výsledkem je trojrozměrné georeferencované mračno bodů, jehož hustota odpovídá podmínkám letu. Schopnost lidarového měření zachytit více vertikálních pater a často i zaznamenat zemský povrch, umožňuje vytvořit digitální model terénu včetně vegetační diference (Hyypä et al., 2008; Lim et al., 2003). Pouze malý počet studií ukazuje, že digitální fotogrammetrie či satelitní snímání je vhodné pro tvorbu CHM modelů (Bohlin et al., 2012; Huang, 2009; Mora et al., 2013; Nurminen et al., 2013; Véga, St-Onge, 2008; Véga, St-Onge, 2009). Tyto metody ve srovnání s metodou Lidar neumožňují získat informaci pod vegetačním pokryvem (White et al., 2013). Navíc spojování jednotlivých snímků do velkého

celku je velmi náročné kvůli množství vegetačních charakteristik, podobné opakující se textuře, složité definici vlíčovacích bodů apod. (Baltsavias et al., 2008; Eisenbeiss, 2009; White et al., 2013). Vzhledem ke skutečnosti, že mnoho evropských zemí poskytuje přesné digitální terénní modely z lidarových dat (Bohlin et al., 2012), je možné kombinovat satelitní snímkování či fotogrammetrii s lidarovými daty. Výsledkem je poté přesnější a aktuálnější model vegetace, velmi vysokého prostorového i časového rozlišení. Práce publikované v posledních pěti letech poukazují na využití bezpilotních prostředků ve spojení s CHM (Dandois, Ellis, 2010). Bepilotní prostředky nalétnou menší plochu, avšak s prostorovým rozlišením v rámci jednotek centimetrů. Výhodou je také možnost častého opakovaného měření a získání tak představy o vývoji porostu v čase v rámci sledovaného území.

## Analýzy viditelnosti

Analýzy viditelnosti hodnotí modelovaný povrch země a detekují oblasti, které jsou viditelné z místa pozorovatele. V současnosti se jedná o běžnou funkci většiny geoinformačních systémů. Výpočet porovnává hodnoty buněk a určuje, které buňky jsou vidět, či jestli je vidět buňka počáteční – buňka pozorovatele. Umístění sledované buňky závisí na uživateli. Viditelnostní analýzy jsou běžně využívány k hodnocení dopadu staveb na krajinný ráz (Lee and Stucky, 1998), hodnocení výškových staveb (Kidner et al., 1999), navrhování krajinných prvků (Chamberlain a Meitner, 2013) a podobně. Jako místo pozorovatele je možné určit nejen jeden konkrétní bod ale bodů více. Pokud se počítá viditelnost linie, jako body pozorovatele slouží lomové body tzv. vertexy. Proces výpočtu lze i otočit. V určitých případech je vhodnější informace, kam umístit objekt tak, aby byl co nejméně vidět.

Nástroj viewshed je dostupný v geografických programech platform ESRI, Grass GIS, SAGA GIS, Quantum GIS apod. Jako podkladový rastr se nejčastěji používá digitální elevační model, kde hodnota buňky nejčastěji odpovídá nadmořské výšce v dané lokalitě. Uživatel ještě musí definovat umístění pozorovatele a cílovou oblast, pro kterou hodnocení probíhá. Každá buňka zájmové oblasti se porovnává s umístěním pozorovatele. Spojnice bodu pozorovatele a cílové buňky se nazývá linie viditelnosti. Na této linii jsou určeny

buňky, které jsou pod spojnicí a nad spojnicí. Pokud se mezi cílovou a zdrojovou buňkou nachází pixel, který svojí hodnotou převyšuje hodnotu spojnice, poté je cílová buňka neviditelná. V případě počítání viditelnosti pro určitou oblast, je poté tento postup počítán pro každý pixel v dané lokalitě (Kim et al., 2004).

Algoritmus počítá i s doplňujícími proměnnými. Těmi nejzákladnějšími je nastavení výšky pozorovatele a cíle. Pokud se počítá viditelnost větrné elektrárny, bude výška cílové buňky navýšena o běžnou výšku stožáru. Dále je možné omezit azimut pozorování, vzdálenost a celkovou oblast, pro kterou je algoritmus využíván. Možná je také omezit vertikální úhel, pro který je model počítán.

Analýzy lze rozdělit na základní a pokročilé. K těm jednodušším lze přiřadit již zmiňovanou linii viditelnosti. K dalším aplikacím patří nástroj viewshed, kdy je z bodu pozorovatele počítána oblast, která je vidět. Analogickou funkcí k tomuto je rozšířený funkce viewshed s názvem observer point, kdy v případě více bodů pozorovatele je ještě rozlišeno, z jakého konkrétního bodu či jejich kombinace je určitá část rastru vidět. Pokročilejší aplikace potom počítají s územím jako celkem a výsledný rastr není složen pouze z binárního rastru – je / není vidět, ale v drtivé většině případů sčítá hotové rastry viditelnosti. Tato analýza se označuje jako multiple viewshed či cumulative viewshed (Fisher et al., 1997). Pro každý jednotlivý pixel rastru je spočítána funkce viewshed. Výsledných rastrů viditelností je poté stejný počet, jako buněk v celé zájmové oblasti. Všechny binární rastry se poté sečtou a vznikne nákladový rastr, který znázorňuje nejvíce a nejméně exponované rastry co se viditelností týče.

## Problematika geodat - TIN nebo Raster?

Existuje řada metod pro výpočet analýz viditelnosti. Širokou škálu aplikací, pro které je možné použít nástroj viewshed představuje De Floriani et al. (1999). De Floriani a Magillo (2003) toto rozšířili a poskytli přehled nejčastějších algoritmů, včetně analýz založených na rastrové síti, nepravidelné trojúhelníkové síti a síti trojúhelníků pravidelných. V drtivé většině jsou nejrozšířenější dva přístupy. TIN (triangulated irregular network) a DTM (digital terrain models) (Maloy a Dean, 2001). Výhoda TIN je ta, že vyžadují



méně místa v paměti počítače a výsledek může být více přesný než v případě použití rastrové mřížky. Toto potvrzuje Evans et al. (2001), který ukazuje, že TIN má lepší aproximaci povrchu v porovnání s využitím nižšího rozlišení rastru. Pokud máme možnosti k vytvoření velmi přesného rastru, poté je tento model přesnější. Kumler (1994) tvrdí, že oba přístupy mají svá pro a proti a každý je vhodnější na něco trochu jiného, nicméně do popředí se dostává, a současný vývoj toto potvrzuje, metoda DTM. Metody viewshed, založené na digitálním zobrazení povrchu, jsou nejčastěji binární povahy – je a není vidět (Burrough et al., 1998). Moderní výpočetní technika však umožňuje mnohonásobnou aplikaci nástroje viewshed a tak vznikají pokročilé metody, které zahrnují pravděpodobnostní podstatu věci, tzn. s jakou pravděpodobností je pozorovaný bod viditelný apod. (Chamberlain a Meitner 2013; Fisher, 1993; Fisher, 1996; Marcello et al. 2003).

## Vstupní podkladová data

Viditelnostní analýzy provádějí výpočty nejčastěji nad rastrem, který znázorňuje určitý fenomén, jehož hodnota je obsažena v buňce. V drtivé většině případů je tímto fenoménem nadmořská výška, jiný případ představuje Cooper (2005), který vytváří analýzy nad geomagnetickým polem země. V době, kdy ještě nebyla dostupná přesná lidarová data, vznikaly digitální modely terénu nejčastěji z vektorových dat. Maloy a Dean (2001) ve své práci uvádí, že analýzy viditelnosti vytvořené nad základní vektorovou mapou USA v měřítku 1 : 24 000 mají shodu s realitou 56, 57%. Pro úplnost byly porovnávány i mapy menšího měřítku. Ty však vykazovaly shodu mnohem menší. Ke správné interpretaci analýz viditelnosti je nutné vymodelovat objekty, které se nacházejí na zemském povrchu. Zástavbě, vegetaci, případně liniovým prvkům se přidá atribut, který odpovídá výšce subjektu. Výšky objektů nejsou pevně standardizované. Záleží na autorovi, jaké výšky zvolí. Příkladem může být výška lesa 20 m (Klouček, 2015; Wallentin et al., 2008), výška zástavby 8 m a ostatní vegetace 5 m (Klouček, 2015).

Často se s povrchem vůbec npracuje a realitu tvoří pouze digitální model terénu. Z toho vyplývá, že v případě modelování viditelnosti, přesnost výsledného modelu závisí na přesnosti vstupního modelu povrchu, který kombinuje přesnost terénního modelu a

správného výškového a prostorového určení objektů, jež se na něm vyskytují. Přesnost těchto modelů je často diskutována v literatuře, jako příklad je možné uvést práce Lake et al. (2000), Sander a Manson (2007), které se soustředí především na přesnost objektů na povrchu. Dean (1997) tvrdí, že analýzy viditelnosti, které byly provedeny nad modelem terénu – tudíž bez vegetačního pokryvu, nemohou v místech, kde se vegetace reálně vyskytuje přinášet správné výsledky.

Využívaná data nejčastěji vznikají pozemním měřením či dálkovým průzkumem Země. V posledních letech se do popředí dostává nejmodernější metoda laserového leteckého skenování tzv. Lidaru (Castro et al., 2015; Lake et al., 2000; Murgoitio et al., 2014). Tato metoda produkuje velmi přesné mračno bodů veškerých objektů na povrchu Země, které se poté vhodnou interpolační metodou transformuje na rastr. Lidarová data jsou však jedny z nejdražších a samotné zpracování je závislé na výkonovém vybavení hardwaru. Lidarová data často nejsou dostupná pro zájmovou lokalitu.

V drtivé většině případů se jako podklad pro aplikaci nástroje viewshed používá elevační model vztažený k nadmořské výšce určitého místa na povrchu Země. Existují však případy, kdy tomu tak není. Cooper (2005) ve své práci popisuje aplikaci analýz viditelnosti nad gravitačním a magnetickým polem. Tyto geofyzikální potenciální veličiny se používají k určení podpovrchové struktury země. Nejčastějším cílem těchto prací jsou geologické průzkumy či hledání zásobníků ropy. Analýzy viditelnosti se zde používají k identifikaci anomálií, které ve výsledku figurují jako překážka linie viditelnosti. Pro zpřesnění výsledku je na data aplikován ještě filtr, odstraňující datový šum a filtr na zvýraznění detailů.

## Přesnost analýz

Kvalita výsledného rastru viditelnosti závisí na několika proměnných. Nejčastěji je viditelnost počítána nad digitálním elevačním modelem. Rozlišení resp. přesnost surových dat vstupního modelu silnou měrou ovlivňuje rozlišení výsledku. Nejčastěji se jako hodnotící kritérium používá tzv. root – mean – squared error (Fisher, 1992). Bylo prokázáno, že analýzy viditelnosti jsou velmi citlivé na přesnosti digitálního modelu terénu, na nichž jsou založeny (Fisher, 1991; Fisher, 1992; Fisher, 1996; Goodchild a Lee, 1989).

Tato chyba musí být zahrnuta jako hlavní činitel při hodnocení pravděpodobnosti správného výsledku (Fisher, 1996). Zatímco chyba horizontální určuje možnou vzdálenost zvoleného bodu od skutečného místa, pro analýzy viditelnosti je velmi důležitá i chyba vertikální, která může způsobit větší chybovost výsledného rasteru. Čím blíže je tato vertikální chyba blíže bodu pozorovatele, tím je tato chyba markantnější (Dodd, 2001). Pro úplnost je možné uvést, že rámci České republiky jsou dostupné modely, které pokrývají celé území, vzniklé z lidarových dat s vertikální i horizontální chybou nepřesahující půl metru (ČÚZK, 2014).

Výpočty analýz viditelnosti jsou velmi citlivé na překážky blízké bodu pozorovatele. Tuto skutečnost se zmiňuje autor Nagy (1994). Modelová linie viditelnosti zvětšuje blízké překážky úměrně vzdálenosti pozorovaného bodu. Kvůli tomuto fenoménu, který je označován jako dominantní vliv chyb v blízkosti pozorovacího bodu autoři Felleman a Griffin (1990) obhajují dvojúrovňový model povrchu, tedy model, který využívá více různých rozlišení rastru v rámci jedné zájmové lokality. Takový model okolí bodu pozorovatele znázorňuje pět až desetkrát přesněji, než okolí vzdálenější. Tímto způsobem se tak eliminuje chyba, která by se nacházela v nejbližším okolí pozorovatele a měla tak znatelnější vliv na výsledek. Fisher (1992) kromě přesnosti digitálního elevačního modelu zmiňuje také samotný výsledek analýzy viditelnosti, který odpovídá booleovské logice. Správnost těchto analýz je možné ověřit pouze porovnáním se skutečným stavem. Možnost, jak vyřešit chybu vzniklou podstatou booleovské logiky, představuje práce Felleman a Griffina (1990), kteří vícenásobnou analýzou viditelnosti dosáhnout toho, že hodnota každé buňky v rastru představuje pravděpodobnost, s jakou je toto místo z bodu pozorovatele vidět.

## Korelační koeficient elevace a viditelnosti

Jednu z možností jak hodnotit terén pomocí analýz viditelnosti zavádí Franklin a Ray (1994). Jako první přichází s koeficientem, který ukazuje závislost elevace a viditelnosti. Vychází z principu multiplikace funkce viewshed na jednotlivé pixely rasteru. Pro každou buňku rasteru byla spočítána viditelnost a následně byla korelována míra viditelnosti z daného bodu v závislosti na nadmořské výšce dané buňky. Jako zájmové území byly

vybrány dvě lokality, které obsahují jak hory, tak i rozlehlá údolí s jezery. Výsledky jsou následující:

1. Data nejsou silně korelována. Hory v horských oblastech jsou viditelné stejně, jako jsou viditelná rovinatá území v nížině. Tato skutečnost je vysvětlena tak, že viditelná část údolí se rozkládá mezi dvěma úbočími, takže z méně bodů pozorovatelů je vidět větší plocha. Protikladem jsou vrcholky hor, které jsou vidět odevšad, avšak se vždy jedná pouze o malé plochy.
2. Metoda indexování zaostřuje rysy hran. Identifikace vrcholového hřbetu je mnohem snazší, jelikož ideálně viditelná je pouze úzká linie vrcholků.
3. V rámci dané lokality je minimum vysoce viditelných bodů.
4. Viditelnost nejvyšších bodů úměrně neodpovídá jejich poloze.

Neexistuje zjevná korelace mezi nadmořskou výškou a indexem viditelnosti. Franklin a Ray (1994) udává hodnotu  $-0,12$ . Podobnou hodnotu udává Kim et al. (2004), který v rámci testovací lokality vypočetl korelaci  $0,293$ . Dále dodává, že nadmořská výška je i nadále špatným prediktorem viditelnosti. Společně s autorem Lee (1994), pozoruje, že topografická poloha může být klíčovější ukazatel, než absolutní nadmořská výška. Na druhou stranu dodávají, že všeobecně hřebeny a vrcholy mají v průměru větší tendenci být viděny v porovnání s ostatními body.

## Modelování viditelností v ekologii živočichů a krajinné ekologii

Jak již bylo uvedeno úvodem, ne vždy musí být analýzy viditelnosti primárním cílem studie. Častou je kvantifikace viditelnosti jedním ze vstupů do multikriteriální analýzy nebo podkladem pro výpočet prediktorů ve statistické analýze dat. S tímto přístupem se setkáváme i ve využití modelů viditelnosti v souvislosti s ekologií živočichů. Tyto studie mají obecně široký výzkumný záměr. Literatura dokládá viditelnost jako jeden z environmentálních a antropogenních faktorů (Jiang et al., 2014) pro modelování tygra ussurijského a identifikovali ji jako jeden z významných členů výsledného distribučního modelu. Během výzkumu Alonso et al. (2012) využili analýzy viditelnosti jako jeden

z významných faktorů pro výběr hnízdišť dropa velkého. Viditelnostní analýzy v těchto případech nemají určit vyloženě, zda jedinci na sebe vidí, nicméně substituují možnost ohrožení druhu predátorem či dostupnost kořisti pro predátora. Na toto téma zaměřenou studii zpracoval Olsoy et al. (2015), kdy mimo jiné pracovali právě s viditelností potenciálních predátorů z pozice kořisti a úkrytovými možnostmi kořisti vzhledem k pohledovým liniím ze stanovišť výhodných pro predátory. Na rozdíl od zmíněných prací, kde viditelnost byla uvažována z hlediska živočicha, využili Kizuka et al. (2014) pro predikci výskytu druhů viditelnost modelovanou pro pozorovatele – člověka. Predikována byla distribuce dvou introdukovaných invazivních druhů ryb, slunečnice velkoploutvé a okounka pstruhového, v nádržích v zemědělské krajině v Japonsku. Vzhledem k nízké konektivě těchto nádrží a dalším okolnostem autoři předpokládali vliv introdukcí člověkem na obsazenost nádrží těmito druhy a viditelnost nádrže ze silnice identifikovali jako vhodnější prediktor, než dříve používané proměnné jako vzdálenost nádrže od silnice či hustota osídlení v oblasti.

## Shrnutí

Digitální modely terénu a aplikované analýzy viditelnosti jsou jedny z nejčastějších analýz v prostředí geoinformatiky. Jsou nezastupitelnou součástí hodnocení krajiny jako celku i jednotlivých zásahů. Stejně tak mohou velkou měrou přispět a usnadnit záměry v oblasti krajinné ekologie, ekologie živočichů, územního plánování, architektury, pozemního stavitelství, urbanizace, plánování turistických cest, rozhleden a podobně. V současnosti se modelace terénu a viditelností potýká s problémem, kdy je dostupné velké množství vstupních geodat, avšak jejich kvalita se liší. Při výběru vstupních dat je proto nutné znát záměr, k čemu budou data použita a jaká přesnost bude vyžadována ve výsledném modelu. Nežádka je však možné se setkat s naprosto nevhodným výběrem vstupních geodat. Z toho důvodu často dochází při aplikaci k mnoha nedostatkům a desinterpretacím. Cílem této rešerše bylo zhodnotit současný stav této vědecké oblasti a přinést ucelený pohled na datové zdroje, digitální modely terénu a analýzy viditelnosti.

# METODIKA DISERTAČNÍ PRÁCE

## 1. Jak přesnost dat ovlivňuje spolehlivost modelů analýzy viditelnosti

Prostorová data svojí přesností a rozlišením ovlivňují tvorbu digitálních terénních modelů. Viditelnostní analýzy nacházejí mimo jiné své uplatnění při posuzování staveb na krajinný ráz. Tato studie se zabývá vyhodnocením viditelnosti větrných elektráren při využití různých datových sad.

Tento článek byl publikován pod názvem: **How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines** v periodiku Applied Geography (IF 2,565; 2015)

### Cíle práce

Visuální dopad větrných elektráren je často diskutované téma v souvislosti s analýzami viditelnosti. Často však není řešeno, jaký vliv mají vstupní data na výsledek analýzy. Z tohoto důvodu jsme se soustředili na (1) vyhodnocení spolehlivosti vytvářených digitálních modelů povrchu v různých měřítcích a na (2) zhodnocení false positives (kdy model predikuje viditelnost objektu, avšak skutečnost je opačná).

### Zájmové území a vstupní data

Studie analyzuje viditelnosti větrných elektráren na severu České republiky. Rozloha zájmového území je asi 300 km<sup>2</sup>. Nadmořská výška v lokalitě je v rozmezí 200 – 1120 m n. m. Zvolená lokalita kombinuje mnoho typů krajiny, které poskytují různé podmínky pro aplikaci analýz viditelnosti. V rámci této lokality byly vybrány tři větrné parky. Kolem každého parku byl vytvořen buffer o velikosti 5 km, ve kterém bylo provedeno vyhodnocení přesnosti analýz viditelnosti. Oblast na severu Čech, v okolí tří větrných parků nebyla vybrána pouze kvůli krajinným charakteristikám, ale i kvůli množství dostupných různých geodat, které se neliší pouze stylem sběru, ale i měřítkem a přesností.

Zvolená data je možné rozdělit do dvou skupin. Lidarová a vektorová. Nejnovější a nejvíce přesný model představuje lidarová sada DMP 1G. Dále byla použita vektorová data ZABAGED v měřítku 1 : 10 000, DMU 25 v měřítku 1 : 25 000 a volně dostupný produkt ArcČR 500 v měřítku 1 : 500 000.

## Zpracování dat

Ze vstupních datových sad jsme vytvořili digitální modely povrchu prostřednictvím softwaru ArcGIS 10.2. V případě lidarových dat, které jsou dostupné jako body představující vrcholy TIN, se jednalo o vytvoření nepravidelné trojúhelníkové sítě, která byla následně převedena na rastr o rozlišení 5 m. Výškopis zbylých sad byl interpolován metodou TopoToRaster. Rozlišení rastru bylo kvůli porovnání stanoveno také na 5 m. Tímto krokem jsme vytvořili digitální model reliéfu. Jelikož jsme potřebovali digitální model povrchu, bylo nezbytné vymodelovat objekty na povrchu. Z datových sad byly vybrány vektorové vrstvy představující zástavbu a lesní porost. Těmto objektům poté byla přiřazena výška, kdy zástavba byla vysoká 8 m a lesní porost 20 m. Výška těchto objektů byla změřena a zprůměrována na základě terénního průzkumu. Prostou konverzí takto upravených vrstev na rastr a přičtením k již vytvořenému elevačnímu modelu vznikl digitální model povrchu vycházející z tří vektorových sad. Celkem byly vytvořeny 4 digitální modely povrchu z dat (1) DMP 1G, (2) ZABAGED 1 : 10 000, (3) DMU 25, (4) ArcČR 500.

Větrné elektrárny byly simulovány bodem s určitou výškou nad zemským povrchem. Bod představovaly souřadnice paty elektrárny. Výška středu rotoru (parametr OFFSETA) byla odečtena z technické dokumentace k větrným parkům v dané lokalitě a byla v rozmezí od 40 do 95 m. Výška pozorovatele (parametr OFFSETB) byla stanovena na 1,8 m.

Pomocí nástroje Observer point z nástrojového toolboxu programu ArcGIS byla vypočítána analýza viditelnosti pro elektrárny v území. Výsledkem je rastr, kdy pixel obsahuje informaci, zda je z něho elektrárna vidět či nikoli. V případě, že je vidět elektráren více, lze rozlišit informaci o tom, které všechny konkrétní elektrárny jsou viditelné z tohoto místa.

## Terénní měření

Cílem této studie bylo zhodnocení vlivu prostorových dat na přesnost analýzy viditelnosti. K tomu, abychom mohli zhodnotit přesnost, bylo potřeba ověřit skutečný stav terénním šetřením. Pro každý větrný park bylo náhodně vygenerováno 50 bodů pozorovatele v bufferu 5 km. Celkem se tedy jednalo o 150 bodů. Pro zamezení prostorové autokorelace byla nejmenší vzdálenost mezi body stanovena na 200 m. Vzhledem ke skutečnosti, že v lesních porostech je viditelnost minimální, byly body generovány pouze na otevřených lokalitách. Na těchto bodech bylo provedeno měření prostým okem. Na každém bodu pozorovatele bylo zjišťováno, zda jsou elektrárny viditelné a případně jaké.

## Výsledky

Výsledky studie potvrdili předvídatelnost míry spolehlivosti vstupních dat na analýzy viditelnosti. Tato závislost byla prokázána na příkladu viditelnosti větrných elektráren. Jednoznačně nejvhodnější datový vstup je digitální model povrchu vytvořený z lidarových dat. Studie prokazuje, že terénní modely založené na vektorových datech odpovídají svojí přesností měřítku, v jakém byly pořízeny. Čím větší měřítko, tím menší přesnost výsledného modelu oproti lidarovým datům. Lidarová data predikují nejméně false positives, kdy model tvrdí, že by elektrárna měla být vidět, avšak ve skutečnosti není. Nejvíce false positives náleží datové sadě ArcČR v měřítku 1 : 500 000. O této sadě je také možné tvrdit, že je nesrovnatelně horší až nevhodná pro potřeby předkládané studie.



## 2. Méně přesná vstupní data způsobují silné nadhodnocení viditelné oblasti v digitálních modelech viditelnosti

Studie se zabývá vlivem různých vstupních prostorových dat na analýzy viditelnosti a navíc jsou vybrány zájmové lokality tak, aby plně postihovaly významné fenomény v krajině. Zájmové území bylo vybráno s důrazem na plné zastoupení geomorfologického členění krajiny. Analýzy viditelnosti byly počítány v územích, kdy rozptyl nadmořských výšek odpovídá nížinám, vrchovinám a hornatinám. Tyto parametry byly rozšířeny o porovnání různé výšky lesního porostu, kdy se testoval vliv vertikální výšky porostu na výsledek analýzy viditelnosti.

Tento článek byl odeslán k recenznímu řízení pod názvem: **Less accurate input data causes strong overestimation of visible area in digital viewshed models** do periodika PLOS ONE (IF 3,234; 2015)

### Cíle práce

Hlavním cílem této studie je posouzení vlivu (1) přesnosti vstupních dat, (2) konfigurace terénu, (3) počtu vizuálních překážek, (4) výšky porostu na přesnost výsledné analýzy viditelnosti.

### Zájmové území

Analyzovali jsme celkem 104 lokalit v rámci České republiky. Jedna lokalita odpovídala jednomu mapovému listu mapy SM 1 : 5 000 (obdélník o rozměrech 2,5 x 2 km). Takový výběr poskytl dostatečně velké plochy pro analýzu viditelnosti a zároveň umožnil získat množství vzorků pro následné statistické vyhodnocení. Polohy mapových listů byly vybrány stratifikovaným náhodným výběrem z té části republiky, kde byly k dispozici digitální modely povrchu i terénu z dat laserového skenování, které poskytuje Český úřad zeměměřičský a katastrální. Výběr lokalit byl stanoven tak, aby zahrnoval skupiny o stejném počtu vzorků různě zalesněných území (tři kategorie, podle rozlohy lesa v rámci mapového listu: 0 – 9%, 10 – 24 % a 25 – 60%) a různé konfiguraci terénu (dle

směrodatná odchylka v mapovém listě: < 10, 11 – 30, > 30). Dále bylo nutné zamezit výběru sousedících mapových listů kvůli prostorové autokorelaci.

## Vstupní data a zpracování dat

Jako podklad pro analýzy viditelnosti jsme zvolili pět vstupních digitálních modelů povrchu, lišících se měřítkem a zpracováním vstupních dat. (1) Nejpřesnější geodata poskytovala 1. generace digitálního modelu povrchu. Toto byla také jediná datová sada, která poskytovala rovnou digitální model povrchu. Zbylé modely povrchu jsme vytvořili sečtením elevačního modelu a modelu znázorňující zástavbu a lesní porost. U modelu (2) vycházejícího z DMR 5G bylo nezbytné zvektorizovat krajinný pokryv ručně, na základě ortofotomapy. Zbylé tři modely byly založeny na vektorových datech dostupných sad: (3) SM 1 : 5 000, (4) DMÚ 1 : 25 000 a (5) ArcČR v měřítku 1 : 500 000. V těchto datových sadách byl výškopis znázorněn vrstevnicemi a krajinný pokryv polygony. Terénní model byl vypočten metodou TopoToRaster programem ArcGIS 10.2.

Vertikální výšky objektů byly kromě první datové sady představující model povrchu stanoveny následovně: pro budovy a osídlené plochy byla výška definována 8 m. Ostatní nelesní porost měl výšku 5 m. Pro lesy jsme testovali více výšek, pro dosažení přesnějšího výsledku. Výška lesa tak byla stanovena na 15, 20, 25, 30 a 35 m.

Pro každý mapový list bylo náhodně vygenerováno místo pozorovatele. Výška pozorovatele byla určena na 1,8 m. Tato výška měla simulovat osobu stojící na zemi. Druhá varianta bylo stanovení výšky 80 m, což lze interpretovat jako viditelnost z rozhledny či naopak viditelnost větrné elektrárny. Tímto způsobem jsme vytvořili 2x21 viditelnostních modelů pro každou zájmovou lokalitu.

## Výsledky

Modely povrchu vytvořené z vektorových dat značně nadhodnocují viditelné plochy ve srovnání s modely založenými na datech lidarových. Absolutní míra nadhodnocení je větší, když je bod pozorovatele vysoko na povrchu Země, ačkoli trendy v nadhodnocení byly shodné u pozorovatele nízko nad terénem a bodem pozorovatele simulující pohled z věže.

V obou případech lze konstatovat, že žádná z ostatních datových sad s různou výškou vegetace se přesností neblížila modelům založených na lidarových datech. Dále bylo zjištěno, že výška vegetace má pouze malý vliv na výslednou analýzu viditelnosti v porovnání s efektem datové podstaty modelů.

### 3. Význam použití surových dat: Případová studie zaměřená na canopy height modelaci křoví

Prostorová data jsou významným fenoménem, bez kterého se v dnešní době neobejde žádný výzkum zabývající se životním prostředím. Ač jsou geodata podstatou určující přesnost prováděné analýzy, tak je datům i postupu zpracování v řadě studií věnována jen malá pozornost. Tato studie přináší porovnání jedné sady lidarových dat, která je dostupná ve třech formách zpracování. K dispozici jsou data surová, generalizované mračno bodů, zpracovaný DTM a DSM. Vlastním terénním měřením jsme tuto sadu rozšířili o validační data, která byla použita pro zhodnocení přesnosti.

Tato studie je rozpracovaná ve fázi manuskriptu, výsledky nejsou zcela definitivní. Pracovní název je: **Importance of using raw data: case study focused on canopy height models of shrubs** a očekává se publikování v druhém až třetím kvartále roku 2017 do periodika *Transaction in GIS* (IF 1,534; 2016)

#### Cíle práce

(1) Posouzení přesnosti vytvořeného Canopy Height modelu v závislosti na stupni zpracování LiDARových dat.

#### Zájmové území a vstupní data

Zájmové území studie leží na západě České republiky, v Doupovských horách (střed 50°18' N, 13°8' E) o rozloze 20 km<sup>2</sup>. Doupovské hory jsou vojenským prostorem s omezeným přístupem člověka. Proto je toto území ekologicky hodnotnou lokalitou se specifickou faunou a flórou. Charakteristická je zejména vertikální heterogenita vegetace, vliv častých disturbancí a rozsáhlé travní porosty s křovinou vegetací.

Data leteckého laserové skenování byla pořízena Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním v rámci projektu probíhajícího mezi lety 2009 – 2013. Zájmové území bylo nasnímáno v březnu 2011. Tato data jsou dostupná ve třech datových sadách: (1) originální lidarová surová data ve formátu LAS, (2) jednotlivé body představující nepravidelnou

trojúhelníkovou sítí ve formátu XYZ. Tato datová sada je dostupná jako digitální model terénu i digitální model povrchu. (3) Volně dostupná odvozenina z LiDARových dat v rastrovém formátu, který je dostupný jako digitální model terénu a povrchu.

## Zpracování dat

Originální surová data byla zpracována nástroji LAStools. Byla provedena klasifikace bodů terénu a vegetace a následně bylo celé bodové mračno normalizováno (nadmořské výšky byly nahrazeny relativními výškami nad klasifikovaným terénem). Z takto upraveného mračna bodů byl vygenerován nástrojem las2dem Canopy height model. Obdobným postupem byl získán CHM z datasetu reprezentovaného jednotlivými body ve formátu XYZ. Pro potřeby korektní klasifikace bodů terénu a vegetace bylo nutno spojit dvě dostupné datové sady (DTM and DSM) do jedno mračna bodů. To bylo následně zpracováno postupem jako u předchozího datasetu a výstupem byl CHM rastr. Poslední datová sada lidarových dat reprezentována rastrem modelu povrchu a terénu byla zpracována v programu ArcGIS 10.4. Canopy Height Model byl vytvořen odečtením terénního modelu od modelu povrchu.

## Terénní měření

Cílem terénního měření bylo získání referenčních dat o skutečných výškách vegetace v zájmovém území. Měření probíhalo v srpnu 2015 na 78 náhodně rozmístěných kontrolních bodech. Pro zamezení prostorové autokorelace byla nejmenší vzdálenost mezi body stanovena na 100 m. Pro navigaci na jednotlivé kontrolní body byl použit a portable GPS receiver (Oregon 450t, Garmin). Výška křovin byla měřena pomocí laserového dálkoměru a úhломěru (Vertex IV).

## Výsledky

Ze struktury jednotlivých vertikálních odchylek modelů je patrné, že všechny modely v průměru podhodnocují výšku vegetace oproti kontrolním měřením v terénu. Systematicky nejméně podhodnocený je model založený na zpracování surových dat. Vyšší

systematické chyby dosahují modely vytvořené na podkladě odvozených datových sad. U odvozených produktů dochází ke ztrátě informace, a to zejména u nízké křovinné vegetace. Ze studie dále vyplývá, že ze surových lidarových dat nízké bodové hustoty, která nejsou vytvořena zcela primárně pro účely tvorby digitálních modely vegetace, je možné získat dostatečně přesný canopy height model. Takto vytvořené modely ale budou velmi pravděpodobně podhodnocovat skutečnou výšku vegetace.

Ačkoli výsledky práce nejsou zcela definitivní a výzkum této studie není ještě ukončen, již nyní výsledky studie potvrzují, že pro ekologické aplikace je důležité využití surových geodat a ne pouze z nich odvozených produktů.

## OČEKÁVANÉ VÝSTUPY

**How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines.**

Publikováno v periodiku Applied Geography (IF 2,565; 2015)

**Less accurate input data causes strong overestimation of visible area in digital viewshed models.**

Odesláno k recenznímu řízení periodika PLOS ONE (IF 3,234; 2015)

**Importance of using raw data: case study focused on canopy height models of shrubs.**

Manuskript očekává se publikování v 2q až 3q 2017, periodikum Transaction in GIS (IF 1,534; 2016)

## PŘÍLOHY

Publikovaný článek: Klouček, T., Lagner, O., Šímová, P. (2015). How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Applied Geography*, 64, 46 – 54.



## ZDROJE LITERATURY

- Ackermann, F. (1996). Airborne laser scanning for elevation models. *GIM International*, 10(10), 24–25.
- Allen, A.P., Pockman, W.T., Restrepo, C., Milne, B.T. (2008). Allometry, growth and population regulation of the desert shrub *Larrea tridentata*. *Functional Ecology*, 22, 197–204.
- Alonso, J. C., Álvarez-Martínez, J. M., & Palacín, C. (2012). Leks in ground-displaying birds: Hotspots or safe places? *Behavioral Ecology*, 23(3), 491–501.
- Baffisfore, A. (1957). A do-it-yourself terrain model. *Photogrammetric Engineering*, 23, 712–720.
- Baltsavias, E., Gruen, A., Eisenbeiss, H., Zhang, L., Waser, L.T. (2008). High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1243–1259.
- Bohlin, J., Wallerman, J., Fransson, J.E.S. (2012). Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal For Forest Research*, 27, 692–699.
- Browning, D.M., Rango, A., Karl, J.W., Laney, C.M., Vivoni, E.R., Tweedie, C.E. (2015). Emerging technological and cultural shifts advancing drylands research and management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13, 52–60.
- Burrough, P., McDonnell, R., McDonnell, R. (1998). Principles of geographical informatik systems. Oxford, UK: Oxford University Press Oxford.
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 198–208.
- Castro, M., García-Espona, A., Iglesias, L. (2015). Terrain model resolution effect on sight distance on roads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(2), 165–172.
- Cooper, G. R. J. (2005). Analysing potential field data using visibility. *Computers and Geoscience*, 31, 877 – 881.
- Corona, P., Fattorini, L. (2008). Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal For Forest Research*, 38, 2911–2916.
- ČÚZK. (2014). Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí. Volně dostupné z: <http://www.cuzk.cz/Periodika-a-publikace/Terminologicky-slovník.aspx>
- Dandois, J.P., Ellis, E.C. (2010). Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*, 2, 1157–1176.
- De Floriani, L., Magillo, P. (2003). Algorithms for visibility computation on terrains: A survey. *Environment and Planning B*, 30(5), 709–728.

- De Floriani, L., Puppo, E., Magillo, P. (1999). Applications of computational geometry to geographic information systems. *Handbook of Computational Geometry*, J.R. Sack and J. Urrutia (Eds), 333–388.
- Dean, D. J. (1997). Improving the accuracy of forest viewsheds using triangulated networks and the visual permeability method. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(7), 969–977.
- Dodd, H. M. (2001). The Validity of Using a Geographic Information System's Viewshed Function as a Predictor for the Reception of Line-of-Sight Radio Waves. Master of Science, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- D'Odorico, P., Porporato, A. (2006). Soil moisture dynamics in water-limited ecosystems. *Dryland Ecohydrology*, 31–46.
- Eisenbeiss, H. (2009) UAV Photogrammetry. Ph.D. Thesis, ETH, Zurich, Switzerland.
- Evans, W., Kirkpatrick, D., Townsend, G. (2001). Right-triangulated irregular networks. *Algorithmica*, 30(2), 264–286.
- Felleman, J. P., and Griffin C. (1990). The role of error in G1 based viewshed determination-a problem analysis, Institute for Environmental Policy and Planning, State University of New York.
- Fisher P.F. (1992). First Experiments in Viewshed Uncertainty: Simulating Fuzzy Viewsheds. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1, 212-238.
- Fisher, P.F, Farrelly, C., Maddocks, A., Ruggles, C. (1997). Spatial analysis of visible areas from the bronze age cairns of mull. *Journal of Archaeological Science*, 24(7), 581–592.
- Fisher, P.F. (1993). Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis. *International Journal Geographical Information Systems*, 7, 331–347.
- Fisher, P.F. (1993). Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis. *International Journal Geographical Information Systems*, 7, 331–347.
- Fisher, P.F. (1993). Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis. *International Journal Geographical Information Systems*, 7, 331–347.
- Fisher, P.F. (1994). Stretching the viewshed. In the Sixth International Symposium on Spatial Data Handling, 5–9 September 1994, Edinburgh, Scotland (London: Taylor and Francis), 725–738.
- Fisher, P.F., (1996). Reconsideration of the viewshed function in terrain modelling. *Geographical Systems*, 3, 33–58.
- Flood, M. 2001. Laser altimetry: from science to commercial Lidar mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1209-1211.
- Franklin, W.R., Ray, C.K. (1994) Higher isn't necessarily better: Visibility algorithms and experiments. In Sixth International Symposium on Spatial Data Handling, 2, 5–9 September 1994, Edinburgh, Scotland (London: Taylor and Francis), 751–763.
- Friedel, M.H., Laycock, W.A., Bastin, G.N. (2000). Assessing Rangeland Condition and Trend, *Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*, 227–262.

- Hill, T.C., Williams, M., Bloom, A.A., Mitchard, E.T.A., Ryan, C.M. (2013). Are Inventory Based and Remotely Sensed Above-Ground Biomass Estimates Consistent?. *PLoS One*, 8.
- Huang, C.-y., Marsh, S. E., McClaran, M. P., Archer, S. R. (2007). Postfire Stand Structure in a Semiarid Savanna: Cross-Scale Challenges Estimating Biomass. *Ecological Applications*, 17, 1899–1910.
- Huang, H.; Gong, P.; Cheng, X.; Clinton, N.; Li, Z. (2009). Improving measurement of forest structural parameters by co-registering of high resolution aerial imagery and low density LiDAR data. *Sensors*, 9, 1541–1558.
- Huenneke, L.F., Clason, D., Muldavin, E. (2001). Spatial heterogeneity in Chihuahuan Desert vegetation: Implications for sampling methods in semi-arid ecosystems", *Journal of Arid Environments*, 47, 257–270
- Hyypä, J.; Hyypä, H.; Leckie, D.; Gougeon, F.; Yu, X.; Maltamo, M. (2008). Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal Remote Sensing*, 2008, 29, 1339–1366.
- Chamberlain, B.C., Meitner, M. J. (2013). A route-based visibility analysis for landscape management. *Landscape and Urban Planning*, 111, 13–24.
- Jiang, G., Sun, H., Lang, J., Yang, L., Li, C., Lyet, A., Long, B., Miquelle, D.G., Aramilev, S., Ma, J., Zhang, C., Zhang, M. (2014). Effects of environmental and anthropogenic drivers on Amur tiger distribution in northeastern China. *Ecological Research*, 801–813.
- Kidner, D., Sparkes, A., Dorey, M. (1999). GIS and wind farm planning. In: Stillwell, J., Geertman, S., Openshaw, S. (Eds.), *Geographical Information and Planning*. Springer, London, 203–223.
- Kim, Y. H., Rana, S., Wise, S. (2004). Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques. *Computers & Geosciences*, 30(9–10), 1019–1032.
- Kizuka, T., Akasaka, M., Kadoya, T., & Takamura, N. (2014). Visibility from roads predict the distribution of invasive fishes in agricultural ponds. *PLoS ONE*, 9(6), 1–10.
- Kumler, M. P. (1994). An intensive comparison of triangulated irregular network (TINs) and digital elevation models (DEMs). *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 31(2), 1–99.
- Lagner, O. (2014). Vyhodnocení rozdílnosti analýz viditelnosti založených na různých datových vstupech. Diploma thesis, Czech University Of Life Sciences.
- Lake, I. R., Lovett, A. a., Bateman, I. J., Day, B. (2000). Using GIS and large-scale digital data to implement hedonic pricing studies. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(6), 521–541.
- Lee, J. (1994). Digital analysis of viewshed inclusion and topographic features on digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60 (4), 451–456.
- Lee, J., Stucky, D. (1998). On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (8), 891–905.

- Li, Z.L. (1990). Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling. Ph.D. thesis, The University of Glasgow.
- Li, Z.L., Qing, Z., Gold, Ch. (2005). Digital terrain modeling Principles and Methodology. CRC press, New York, USA.
- Lim, K.; Treitz, P.; Wulder, M.; St-Onge, B.; Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 88–106.
- Maloy, M., Dean, D. (2001). An accuracy assessment of various GIS-based viewshed delineation techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11), 1293-1298.
- Maune, D.F., Huff, L.C., Guenther, G.C. (2001). DEM user applications. Digital Elevation Model Techniques and Applications: The DEM User Manual. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 367–394.
- Miller, C. and Laflamme, R. (1958). The digital terrain model — theory and applications, *Photogrammetric Engineering*, 24, 433–442.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. 1994. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., p. 7–34.
- Mora, B., Wulder, M.A., Hobart, G.W., White, J.C., Bater, C.W., Gougeon, F.A., Varhola, A., Coops, N.C. (2013). Forest inventory stand height estimates from very high spatial resolution satellite imagery calibrated with lidar plots. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 4406–4424.
- Muldavin, E.H., Moore, D.I., Collins, S.L., Wetherill, K.R., Lightfoot, D.C. (2008) Aboveground net primary production dynamics in a northern Chihuahuan Desert ecosystem, *Oecologia*, 155, 123-132.
- Murgoitio, J., Shrestha, R., Glenn, N., Spaete, L. (2014). Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanning Derived Vegetation Obstruction Factors for Visibility Models. *Transactions in GIS*, 18, 147–160.
- Murray-Tortarolo, G., Friedlingstein, P., Sitch, S., Jaramillo, V.J., Murguía-Flores, F., Anav, A., Liu, Y., Arneeth, A., Arvanitis, A., Harper, A., Jain, A., Kato, E., Koven, C., Poulter, B., Stocker, B.D., Wiltshire, A., Zaehle, S., Zeng, N., (2016). The carbon cycle in Mexico: Past, present and future of C stocks and fluxes, *Biogeosciences*, 13, 223–238.
- Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80, 88–99.
- Nafus, A.M., McClaran, M.P., Archer, S.R., Throop, H.L., (2009). Multispecies allometric models predict grass biomass in semidesert rangeland, *Rangeland Ecology and Management*, 62, 68–72.
- Nagy, G. (1994). Terrain visibility. *Computer and Graphic*, 18, 763-773.

- Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Honkavaara, E. (2013). Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 104–115.
- O’Neil-Dunne, J. (2014). Canopy Height Models - An Object-Based Approaches, Letters from the SAL, University of Vermont, volně dostupné z: <http://letters-sal.blogspot.cz/2014/10/canopy-height-models-object-based.html>
- Olsoy, P. J., Forbey, J. S., Rachlow, J. L., Nobler, J. D., Glenn, N. F., & Shipley, L. a. (2014). Fearscales: Mapping Functional Properties of Cover for Prey with Terrestrial LiDAR. *BioScience*, 65(1), 74–80.
- Petrie, G., Kennie T. (1987). An introduction to terrain modeling: applications and terminology. *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering: A Short Course*, University of Glasgow.
- Rango, A., Laliberte, A., Steele, C., Herrick, J.E., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., Roanhorse, A., Jenkins, V. (2006). Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice*, 8, 159–168.
- Roberts, R. (1957). Using new methods in highway location. *Photogrammetric Engineering*, 23, 563–569.
- Sander, H. A., Manson, S. M. (2007). Heights and locations of artificial structures in viewshed calculation: How close is close enough? *Landscape and Urban Planning*, 82, 257–270.
- Skidmore, A.K. (1989). A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information System*, 4, 323–334.
- Steinmann, K., Mandallaz, D., Ginzler, C., Lanz, A. (2013). Small area estimations of proportion of forest and timber volume combining lidar data and stereo aerial images with terrestrial data. *Scandinavian Journal For Forest Research*, 28, 373–385.
- Strand, E.K., Vierling, L.A., Smith, A.M.S., Bunting, S.C. (2008). Net changes in aboveground woody carbon stock in western juniper woodlands, 1946-1998. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113.
- Tang, L. (1989). Surface modelling and visualization based upon digital image processing techniques. *Optical 3-D Measurement Techniques*, 317–325.
- van Kreveld, M. (1996). Efficient methods for isoline extraction from a TIN. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, 523–540.
- Véga, C., St-Onge, B. (2008). Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1784–1794.
- Véga, C., St-Onge, B. (2009). Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves. *Forest Ecology Management*, 2009, 257, 951–959.
- Vierling, K.T., Vierling, L.A., Gould, W.A., Martinuzzi, S., Clawges, R.M. (2008). Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 90–98.

- Wallentin, G., Tappeiner, U., Strobl, J., Tasser, E. (2008). Understanding alpine tree line dynamics: An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218, 235–246.
- White, J., Wulder, M., Vastaranta, M., Coops, N., Pitt, D., Woods, M. (2013). The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests*, 4, 518–536.
- Yu, K. (1996). Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 36, 1-17.
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R.A., Angileri, V., Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99.