

VARIABILITA MNOŽSTVA DOLOMITICKÉHO VÁPENCA APLIKOVANÉHO VRTUĽNÍKOM

Michal Bošela, Vladimír Šebeň

Úvod

Vzhľadom na nepriaznivý vývoj zdravotného stavu smrekových porastov v ostatných rokoch sa začali navrhovať opatrenia, ktorých cieľom je spomaľovať proces hynutia smrečín a postupne nahradzovať monokultúrne smrečiny porastmi s prevahou listnatých drevín (PROGRAM REVITALIZÁCIE LESOV SLOVENSKA, 2006).

Navrhované opatrenia vychádzajú z podrobnej analýzy možností riešenia situácie vrátane návrhov definovaných v „Správe o zdravotnom stave lesov“ pre rokovanie Vlády SR a sú v súlade s uznesením Vlády Slovenskej republiky č. 990 z 21. novembra 2007 k správe o zdravotnom stave lesov.

V súvislosti so vzniknutou situáciou na NLC-LVÚ Zvolen vznikla úloha č. 26 „Komplexné hodnotenie realizovaných opatrení v súvislosti s implementáciou opatrení z uznesenia vlády SR č. 990/2007 pre zriaďovateľa, vrátane analýz účinnosti opatrení spojených s vyhodnotením ekologických prínosov a efektívnosti vynaložených finančných prostriedkov na základe podrobného terénneho monitoringu včasnosti, správnosti a dodržiavania metodologickej a technologickej disciplíny pri realizácii opatrení a založenie pravidelného monitoringu zdravotného stavu smrečín (vrátane Vysokých Tatier) a návrh ďalších revitalizačných opatrení“. V rámci tejto úlohy sa riešilo založenie monitorovacieho systému zameraného na zhodnotenie účinnosti realizovaných opatrení od zmien v chemických rozboroch pôdneho prostredia pred a po aplikácii, cez analýzy zmien v asimilačných orgánoch (ihličí), originálne riešenie zisťovania koncentrácie a množstva účinnej látky (mletý vápenec, hnojivá) až po zmeny v stave lesa (prírastok monitorovaných stromov, zmena zdravotného stavu, zmeny v obnove lesa).

Začiatkom roka 2008 boli navrhnuté projekty revitalizácie pre jednotlivé OZ LESY SR, š. p. Banská Bystrica. Cieľom projektov bola obnova produkčného potenciálu v lesoch poškodených komplexom škodlivých činiteľov, a to pomocou úpravy pôdneho prostredia, a tiež zlepšenie výživy stromov pomocou priamej listovej aplikácie. Použilo sa letecké prihnojovanie alebo vápnenie.

V tomto príspevku sa zaoberáme aplikáciou dolomitického vápenca pre úpravu pôdneho prostredia pomocou vrtuľníka typu MI-8. Výmera jednotlivých území určených pre aplikáciu dolomitického vápenca a tiež normované množstvo je uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Revitalizované územia a navrhnuté revitalizačné opatrenia vo forme vápnenia (PAVLENDA *et al.* 2008)

Odštepny závod	Revitalizované územie	Výmera [ha]	Normované množstvo dolomitického vápenca [t.ha ⁻¹]
Čadca	Čadca	241,14	4
Čadca	Makov	523,94	4
Liptovský Hrádok	Liptovská Teplička	685,52	2,5
Žilina	Rajecké Teplice	585,76	4
Košice	Smolník	174,61	4
Košice	Stará voda	257,73	4

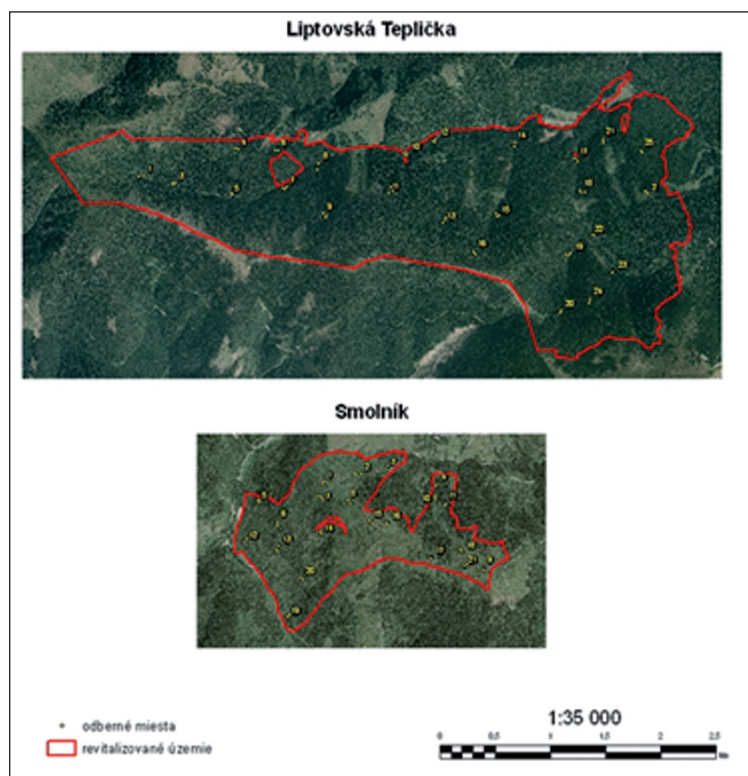
Metodika

Zájmové územia a výberový dizajn

Pre sledovanie kvality leteckej aplikácie dolomitického vápenca (ďalej len DV) vrtuľníkom sa vybrali dve lokality a to na území Liptovská Teplička (ďalej LT) a Smolník (ďalej SM). Podrobná analýza všetkých revitalizovaných území je zverejnená v práci ŠEBEŇ *et al.* (2008). Výmera lokality na území LT bola 665 hektárov a lokality na území SM 174 ha. Nadmorská výška v rámci lokality LT sa pohybovala v rozpätí od 1 150 do 1 457 m n. m. a na lokalite

SM to bolo od 620 do 945 m n. m. Na oboch územiach je celkové prevýšenie porovnateľné (307 v prípade LT a 325 v prípade SM).

Na oboch územiach sa založili výberové plochy pomocou 2-stupňového postupu (ŠEBEŇ *et al.* 2009). Najskôr sa dané územie rozdelilo na pravidelné štvorce, ktorých veľkosť a počet závisel od veľkosti územia a predpokladanej variability dopadnutého množstva DV (20 %). V prvom stupni sa v každom štvorci vybrali miesta, ktoré neboli pokryté korunami stromov, aby sa zabezpečilo priame zachytenie DV počas jeho aplikácie v odbernej nádobe položenej na zemi. Následne sa v rámci každého miesta inštalovali 3 odberné nádoby vo vzájomnej vzdialenosti 15 – 50 m. Tieto sa inštalovali pre zachytenie lokálnej (mikro) variability. Na lokalite Liptovská Teplička sa tak založilo 25 odberných miest (75 odberných nádob) a na lokalite Smolník 22 miest s 66 odbernými nádobami (obr. 1).



Obrázok 1. Poloha odberných miest pre zisťovanie množstva dopadnutého DV

Štatistické spracovanie

Po leteckej aplikácii DV sa z odobratých vzoriek odberných nádob stanovilo množstvo dopadnutého DV a vzhľadom na výmeru odbernej nádoby sa prepočítalo na hektárové hodnoty. Bodové údaje sa priestorovo vyhodnotili pomocou jednoduchšej (jednorozmernej) metódy krigingu v prostredí ArcMap 10. Je to metóda na priestorovú interpoláciu údajov z výberového súboru na základný na základe priestorovej autokorelácie skúmanej premennej.

Keďže sa zistilo, že množstvo DV dopadnutého na povrch terénu úzko súviselo nielen s nadmorskou výškou, ale aj s geografickou polohou (najmä s osou x v systéme S-JTSK) pre regresné analýzy sa využila metóda geograficky váženej regresie (FOTHERINGHAM *et al.* 1998, 2002). Táto metóda sa využila aj z dôvodu sledovania úrovne priestorovej autokorelácie. Poskytuje lokálny model premennej v každom bode v priestore pomocou regresnej funkcie. Pri tejto metóde sa pre každý bod skonštruuje samostatná funkcia zahrnutím závislej premennej a vysvetľujúcich premenných, ktoré sa nachádzajú v rámci zvoleného takzvaného „bandwidth“ cieľového bodu (objektu). Tvar a veľkosť „bandwidth“ závisí od používateľom zvoleného Kernelovho typu, bandwidth metódy, vzdialenosti a počtu susedných bodov. Počet susedných bodov sa v našom prípade nastavil na 5 a zvolil sa adaptívny Kernelov typ. Adaptívny Kernelov typ znamená, že konečný počet susedných bodov použitých pre odvodenie lokálneho modelu bude závisieť od hustoty bodov v okolí daného bodu. Geograficky vážená regresia má teda tvar:

$$y(x,y) = \beta_0(x,y) + \beta_1(x,y)x_1 + \varepsilon(x,y)$$

kde x a y predstavujú súradnice polohy bodov v priestore a z_i je nezávislá premenná. Kým parametre funkcie pre lineárny regresný model metódou najmenších štvorcov za získajú riešením:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Pri geograficky váženej regresii má funkcia tvar:

$$\beta(g) = (X^T W(g) X)^{-1} X^T W(g) Y$$

Pritom váhy sú stanovené tak, že tie merania, ktoré sa nachádzajú bližšie daného bodu v priestore majú vyšší vplyv na výsledok ako tie, ktoré sú v priestore ďalej. Váha sa počítala pomocou Gaussovej schémy:

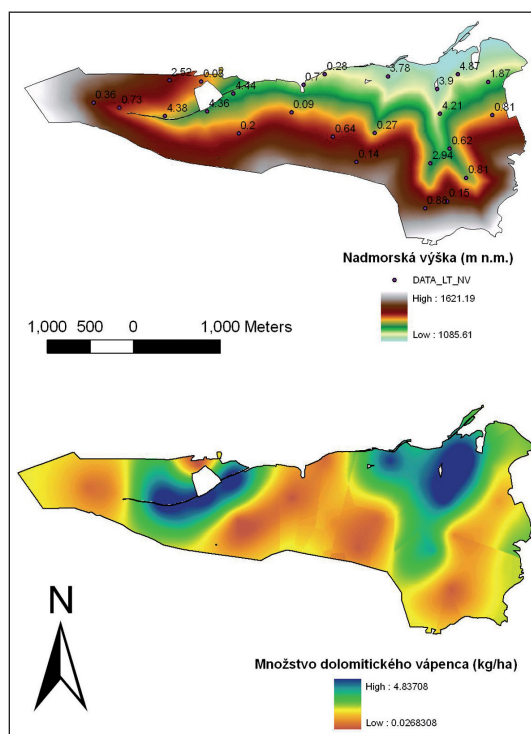
$$w_i(g) = \exp(-d/h)^2$$

kde d je Euklidovská vzdialenosť medzi meraním i a polohou g a h je veličina známa ako „bandwidth“.

Výsledky

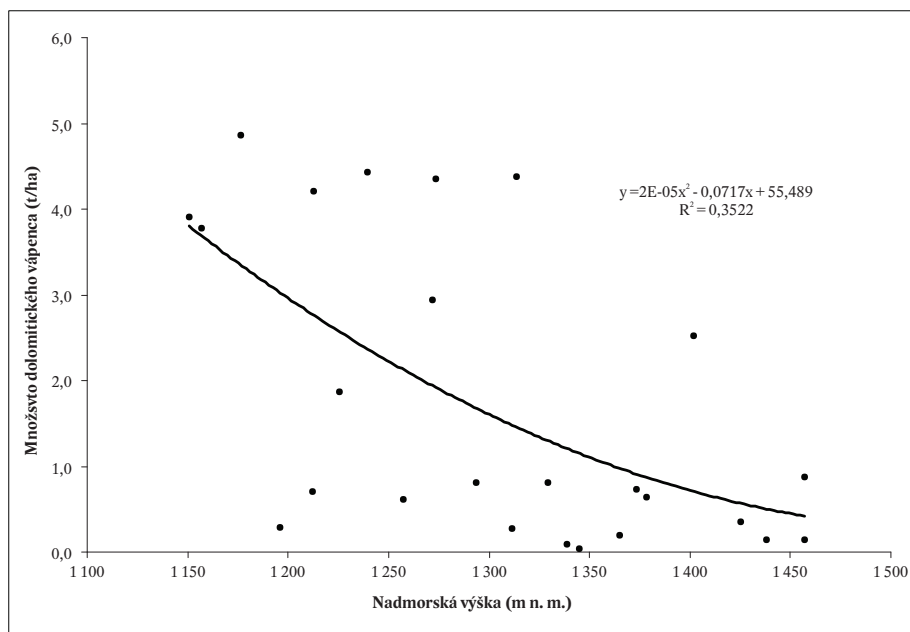
Lokalita Liptovská Teplička

Na tomto území sa množstvo dopadnutého DV po leteckej aplikácii pohybovalo od 0,04 t.ha⁻¹ do 4,9 t.ha⁻¹. Normované množstvo bolo nižšie ako iných lokalitách a to na úrovni 2,5 t.ha⁻¹. Celková variabilita v rámci odberných miest (z 3 odberných nádob) bola na úrovni 100 % a priemerná variabilita medzi jednotlivými odbernými nádobami v rámci odberných miest až takmer 140 % (BOŠELA, ŠEBEŇ 2010), čiže 5 – 7-násobne vyššia ako očakávaná. Z toho vyplýva, že celková variabilita dopadnutého množstva DV je obrovská. Ak sa pozrieme na obrázok 2 vidíme, že množstvo dopadnutej látky do určitej miery súvisí s reliéfom terénu. Treba si všimnúť, že najvyššie zistené dopadnuté množstvo sa vyskytuje na miestach, ktoré ležia blízko hlavnej doliny. Oproti tomu najnižšie množstvá sa zaznamenali najmä v hrebeňových polohách vo vyšších nadmorských výškach.



Obrázok 2. Digitálny model terénu (hore) a krigingová mapa množstva DV (dole) na lokalite Liptovská Teplička

Ako už bolo spomenuté, zistené množstvo DV sa do určitej miery mení taktiež so zmenou nadmorskej výšky. V ďalšom sme preto analyzovali vzťah dopadnutého množstva látky s nadmorskou výškou. Výsledky ukázali mierne pokles látky ($R^2 = 0,35$; $p < 0,05$) s pribúdaním nadmorskej výšky (obr. 3). Avšak variabilita okolo krivky je veľká, čo naznačuje vplyv ďalších faktorov. Pritom nadmorská výška nemusí hrať úlohu vysvetľujúcej premennej, no keďže stúpa smerom od hlavnej doliny, naznačuje to pokles látky týmto smerom.



Obrázok 3. Zmena množstva dopadnutého DV so zmenou nadmorskej výšky (lokality Liptovská Teplička)

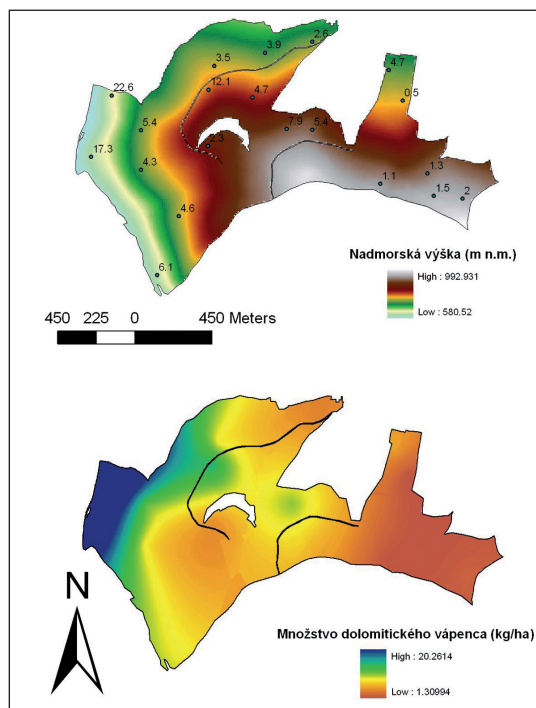
Pre zhodnotenie veľkosti priestorovej závislosti zisteného množstva DV po leteckej aplikácii sa využila geograficky vážená regresia, ktorej úlohou bolo zistiť mieru priestorovej autokorelácie údajov. Výsledky sú uvedené v tabuľke 2. Na začiatku sa zvolil počet najbližších susedných hodnôt na úrovni 6. Avšak už pri zvýšení tohto počtu na 8, regresia poklesla z 0,98 na 0,56 a pri znížení počtu na 10 až na 0,36. Toto naznačuje, že autokorelácia sa výrazne znižuje už pri relatívne nízkej vzdialenosti. Aj stredná chyba regresného modelu je v prípade použitia 6 najbližších bodov na úrovni 0,34 t/ha a v prípade použitia 10 bodov táto chyba stúpne výrazne na 4,6 t/ha, čo je dvojnásobne viac ako je normovaná dávka.

Tabuľka 2. Výsledky geograficky vázenej regresie kde závislou premennou je množstvo DV a vysvetľujúcou premennou je nadmorská výška (lokality Liptovská Teplička)

Závislá premenná Vysvetľujúca premenná	Množstvo DV (t·ha ⁻¹) Nadmorská výška		
	6	8	10
Počet susedných hodnôt	6	8	10
PŠ _{rez}	0,12	7,38	21,04
R ²	0,98	0,56	0,36

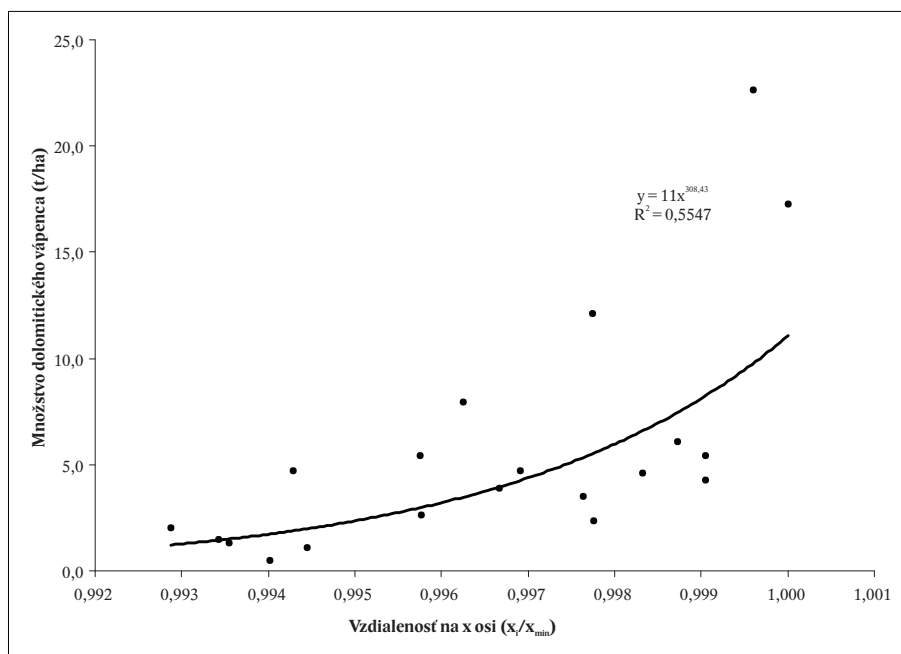
Lokalita Smolník

Na lokalite Smolník bola normovaná dávka DV v množstve 4 t·ha⁻¹. Podobne ako na lokalite Liptovská Teplička, celková variabilita dopadnutého množstva DV bola na úrovni 100 % a priemerná variabilita medzi jednotlivými odbernými nádobami v rámci odberných miest bola až 150 % (BOŠELA, ŠEBEŇ, 2010), rovnako ako na Smolníku niekoľkonásobne viac ako sa očakávalo. Z tohto vyplýva obrovská nerovnomernosť aplikácie, ktorá v konečnom dôsledku má významný vplyv aj na potenciálny účinok pre zlepšenie pôdneho prostredia. Na obrázku 4 je zrejmé, že množstvo dopadnutého DV súvisí s pozíciou v priestore. To znamená, že množstvo klesá smerom na severozápad. Navyše sa týmto smerom mení tiež nadmorská výška. Z týchto dôvodov sa pre ďalšie analýzy použila geograficky vážená regresia.

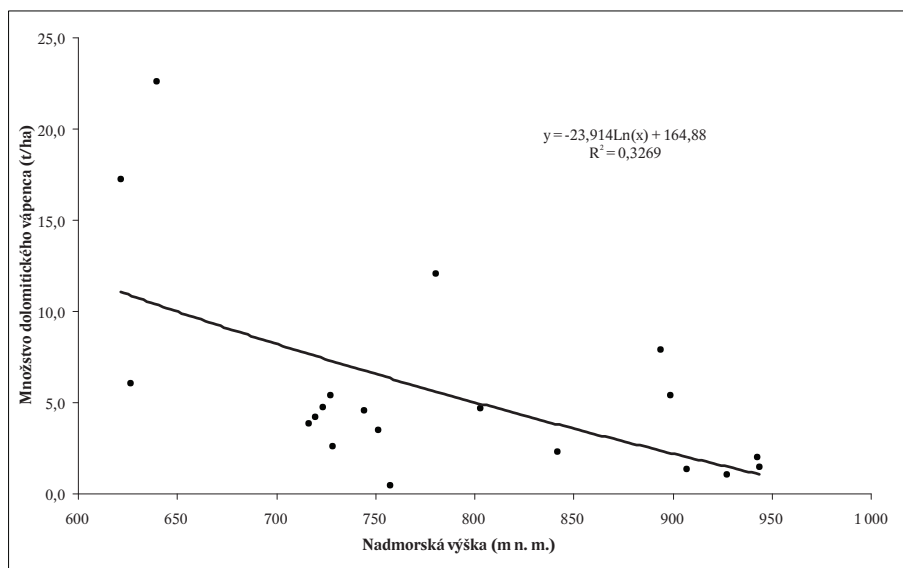


Obrázok 4. Digitálny model terénu (hore) a krigingová mapa množstva DV (dole) na lokalite Smolník

Na obrázku 5 je znázornená zmena dopadnutého množstva DV so zmenou pozície na osi x v rámci systému S-JTSK. Na obrázku os x reprezentuje relatívny podiel x -ovej hodnoty daného odberného miesta k počiatočnému bodu na osi x . Tento vzťah má exponenciálny tvar a vysvetlená variabilita je na úrovni 55 %. V ďalšom sa skúmala korelácia množstva DV s nadmorskou výškou. Vysvetlená variabilita je 33 %.



Obrázok 5. Zmena hodnôt DV s pozíciou odberného miesta na x -ovej súradnici systému SJTSK (lokalita Smolník)



Obrázok 6. Zmena hodnôt DV so zmenou nadmorskej výšky (lokality Smolník)

Výsledky geograficky váženej regresie sú uvedené v tabuľke 3. Prvým krokom bolo vytvorenie regresného modelu pre odhad hodnoty dopadnutého množstva DV pomocou 5-tich najbližších susedov, potom 6, 8, 10 a 15. Index determinácie (R^2) pri pridávaní susedných bodov mierne klesá až dosahuje hodnotu 0,63 pri regresnom modeli odvodenom z 15-tich najbližších bodov. Pri porovnaní s výsledkami na lokalite Liptovská Teplička je zrejme, že v tomto prípade tu existuje užší priestorový vzťah, čo naznačuje vyššiu priestorovú autokoreláciu. Avšak súčet štvorcov je štatisticky významne najnižší (3,62) pri regresii s využitím 5 najbližších bodov. Stredná chyba je v tomto prípade až 1,9 t/ha. Pri použití 6 bodov táto chyba stúpa na 4,1 t/ha a pri 10 bodoch je to už 8,6 t/ha, čo predstavuje dvojnásobok normovanej dávky. Avšak v tomto prípade je priemerná vzdialenosť bodov medzi sebou nižšia ako v prípade lokality Liptovská Teplička, čo je potrebné pri porovnaní zohľadniť.

Tabuľka 3. Výsledky geograficky váženej regresie kde závislou premennou je množstvo DV a vysvetľujúcou premennou je nadmorská výška (lokality Smolník)

Závislá premenná Vysvetľujúca premenná	Množstvo DV ($t \cdot ha^{-1}$)				
	Nadmorská výška				
Počet susedných hodnôt	5	6	8	10	15
$P\check{S}_{rez}$	3,62	16,83	54,06	74,35	222,25
R^2	0,97	0,96	0,89	0,86	0,63

Záver

Z výsledkov analýz vyplýva zrejme obrovská variabilita dopadnutého množstva dolomitického vápenca po leteckej aplikácii pomocou vrtuľníka typu MI-8. Na kvalitu a rovnomernosť leteckej aplikácie vplyva veľké množstvo faktorov, medzi ktorými môžeme spomenúť napr. výšku letu, načasovanie počas dňa, počasie a iné. V prípade leteckej aplikácie dolomitického vápenca pomocou vrtuľníka by mali uvedené faktory strácať svoju váhu, pretože vrtuľník dokáže relatívne dobre kopírovať povrch porastu. Navyše ide o látku s veľkou hmotnosťou, na ktorú počasie a druh inverzie počas dňa nemá významný vplyv. V tomto prípade pravdepodobne najvýznamnejším faktorom je použitá technológia pre navigáciu a orientáciu v teréne a ľudský faktor. Aplikácia prebiehala vypustením látky z dávkovacieho koša v relatívne úzkom páse (približne 2 metre) a preto dokonalá orientácia v teréne a použitie moderných polohových systémov (GPS) je pri efektívnom rozmiestňovaní nevyhnutnosťou.

Uvedené výsledky vylučujú v súčasnej dobe naše odporúčanie pre rozsiahle prevádzkové uplatňovanie vápnenia na výmerách stoviek hektárov, ktoré by bolo efektívne z pomeru nákladov a účinkov. Prvotné objektívne výsledky zo založenia monitoringu sú veľmi nepresvedčivé a finančná náročnosť je veľmi vysoká. Veľkým problémom je najmä vysoká variabilita rozmiestnenej účinnej látky.

Poďakovanie

Tento príspevok bol vytvorený realizáciou projektu „Centrum excelentnosti biologických metód ochrany lesa“ (ITMS: 26220120008), na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- BOŠELA M., ŠEBEŇ V., 2010: Analysis of the aerial application of fertilizer and dolomitic limestone. In: *Journal of Forest Science*, **56**(2): 47–57.
- FOTHERINGHAM A. S., BRUNSDON C., CHARLTON M. E., 1998: Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. In: *Environment and Planning A*, **30**: 1905–1927.
- , BRUNSDON C., CHARLTON M. E., 2002: Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships, Wiley, Chichester.
- PAVLEND A P., ZÚBRIK M., PÓBIŠ I., ĎURKOVIČOVÁ J., RASÍ R., PRIWITZER T., PAVLENDOVÁ H., HLÁSNY T., VODÁLOVÁ A., LACIKA J., 2008: Projekt revitalizácie smrečín na OZ Liptovský Hrádok. Projekt revitalizácie smrečín na OZ Košice. Zvolen : NLC, 20 s.
- ŠEBEŇ V., BOŠELA M., 2008: Analýza technológie a výsledky terénneho zisťovania pri revitalizačných opatreniach prihnojovaním a vápnenním, 50 s. Dostupné na internete: http://www.nlcsk.sk/nlc_sk/download/zzbcsw/file/analyza_technologie.aspx.
- *et al.*, 2009: Metodika monitoringu revitalizačných opatrení, 22 s. Dostupné na internete: http://www.nlcsk.sk/nlc_sk/download/frkyqu/file/metodika_monitoringu_rl.aspx.
- *et al.*, 2009. Základná analýza revitalizovaných území navrhnutých na prihnojovanie a vápnenie, 67 s. Dostupné na internete: http://www.nlcsk.sk/nlc_sk/download/zzbcqu/file/zakladna_analyza_revitalizovanych_uzemi.aspx.
- ZÚBRIK M., PAVLEND A P., ŠEBEŇ V., HLÁSNY T., KUNCA A., JANKOVIČ J., ŠMELKO Š., VAKULA J., NIKOLOV C., GUBKA A., TUČEKOVÁ A., KONÓPKA B., HUDECOVÁ D., BRUTOVSKÝ D., LUPTÁK I., KONÓPKA J., TUTKA J., VLADOVIČ J., MECKO J., NOVOTNÝ J., GALKO J., VARÍNSKY J., KULLA L., KAJBA M., BOŠELA M., MALOVÁ M., KOVALČÍK M., ŠTOFKO P., LEONTOVÝČ R., PETRÁŠ R., BUCHA T., LONGAUEROVÁ V., SITKOVÁ Z. 2009.: Opatrenia na záchranu smrečín realizované v SR v roku 2008 a návrh ďalšieho postupu. In: KUNCA A. (ed.): *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2009*. Zborník referátov z medzinárodného seminára, ktorý sa konal 23. a 24. apríla 2009 v Novom Smokovci, Zvolen : Národné lesnícke centrum, s. 26–38, ISBN 978-80-8093-081-3.