

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Evidenčné číslo: SvF-5342-104364

NOVÉ NÁSTROJE NA MONITOROVANIE BIOTOPOV
NATURA2000 V SOFTVÉRI NATURASAT

Bakalárska práca

2022

Ivana Piačková

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Evidenčné číslo: SvF-5342-104364

NOVÉ NÁSTROJE NA MONITOROVANIE BIOTOPOV
NATURA2000 V SOFTVÉRI NATURASAT

Bakalárska práca

Študijný program: matematicko-počítačové modelovanie
Študijný odbor: matematika
Školiace pracovisko: Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie
Školiteľ: Ing. Michal Kollár, PhD.

Bratislava 2022

Ivana Piačková



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Ivana Piačková**
ID študenta: 104364
Študijný program: matematicko-počítačové modelovanie
Študijný odbor: matematika
Vedúci práce: Ing. Michal Kollár, PhD.
Vedúci pracoviska: Ing. Marek Macák, PhD.

Názov práce: **Nové nástroje na monitorovanie biotopov Natura2000 v softvéri NaturaSat**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Bakalárska práca sa zaoberá novými nástrojmi na monitorovanie biotopov Natura2000 v softvéri NaturaSat. Tieto nástroje slúžia na automatické monitorovanie zmien štatistických ukazovateľov vypočítaných z hodnôt z dostupných optických kanálov satelitnej snímky vytvorenej satelitmi Sentinel-2. Tieto zmeny sú monitorované vo vnútri kriviek, ktoré predstavujú vysegmentované oblasti zo sústavy chránených území Natura2000. Nástroj automatického monitorovania pomocou API pre Copernicus Open Access Hub automaticky sťahuje nové dostupné snímky pre vybranú oblasť a oznamuje užívateľovi informácie o výrazných zmenách vo vybraných optických kanáloch snímky. Druhou časťou bakalárskej práce je rozšírenie priestoru vlastností pre nástroje klasifikácie biotop Natura2000 v softvéri NaturaSat. Priestor vlastností predstavuje vektor štatistík vypočítaných pre vybranú krivku z optických kanálov vybranej snímky. Tento priestor je rozšírený o štatistiky, ktoré sú vypočítané z nadmorských výšok v bodoch satelitnej snímky a zo vzdialeností bodov vysegmentovanej krivky od riek a vodných plôch.

Termín odovzdania bakalárskej práce: 05. 05. 2022
Dátum schválenia zadania bakalárskej práce: 15. 12. 2021
Zadanie bakalárskej práce schválil: prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc. – garant študijného programu

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto záverečnú prácu vypracovala samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, s použitím literatúry uvedenej v zozname použitej literatúry.

Bratislava 5. 5. 2022

Ivana Piačková

Podakovanie

V prvom rade by som chcela poďakovať môjmu školiteľovi Ing. Michalovi Kollárovi, PhD. za odbornú pomoc, cenné rady a usmernenie pri písaní tejto práce. Takisto by som chcela poďakovať Ing. Anete Alexandre Ožvat za odbornú konzultáciu a Ing. Jurajovi Papčovi, PhD. za sprostredkovanie a úpravu dát, s ktorými sme pracovali. V neposlednom rade by som rada poďakovala svojej rodine a priateľovi za neustálu podporu a pomoc pri záverečnej kontrole tejto práce.

Bratislava 5. 5. 2022

Ivana Piačková

Abstrakt

Názov práce: Nové nástroje na monitorovanie biotopov Natura2000 v softvéri NaturaSat

Abstrakt: Práca sa zaoberá novými nástrojmi na monitorovanie biotopov Natura 2000 v softvéri NaturaSat. Tieto nástroje slúžia na monitorovanie zmien štatistických ukazovateľov vypočítaných z hodnôt z dostupných optických kanálov satelitnej snímky vytvorenej satelitmi Sentinel-2. Tieto zmeny sú monitorované vo vnútri kriviek, ktoré predstavujú vysegmentované oblasti zo sústavy chránených území Natura 2000. Nástroj automatického monitorovania využíva satelitné snímky stiahnuté cez Copernicus Open Access Hub a informuje užívateľa o výrazných zmenách vo vybratých optických kanáloch snímky. Druhá časť práce sa venuje rozšíreniu priestoru vlastností pre nástroje klasifikácie biotopov Natura 2000 v softvéri NaturaSat. Priestor vlastností predstavuje vektor štatistík vypočítaných pre vybranú krivku z optických kanálov vybranej snímky. Tento priestor je rozšírený o štatistiky, ktoré sú vypočítané z nadmorských výšok v bodoch satelitnej snímky. Priestor vlastností je možné rozšíriť aj o vzdialenosti bodov segmentačnej krivky od riek a vodných plôch, k čomu je potrebné vypočítať normalizovaný diferenčný vodný index.

Kľúčové slová: Sentinel-2, Natura 2000, scanline algoritmus, monitorovanie zmien, priestor vlastností, digitálny výškový model.

Abstract

Title: New monitoring tools for Natura2000 habitats in NaturaSat software

Abstract: The thesis deals with new monitoring tools for Natura 2000 habitats in NaturaSat software. These tools are used to monitor changes in statistical indicators calculated from values obtained from the optical channels from a satellite image obtained by Sentinel-2 satellites. These changes are monitored inside curves that represent segmented areas from the network of Natura 2000 protected areas. The automatic monitoring tool uses satellite images downloaded from the Copernicus Open Access Hub and informs the user about significant changes in the selected optical channels of the image. The second part of the thesis deals with the extension of the feature space for Natura 2000 habitats classification tools in NaturaSat software. The feature space represents the vector of statistics calculated for selected curves from the optical channels of the selected satellite image. This feature space is extended by statistics, which are calculated from elevations at the points of the satellite image. The feature space can be also extended by the distance of the points of the segmentation curve from rivers and water areas, for which the calculated normalized difference water index is needed.

Keywords: Sentinel-2, Natura 2000, scanline algorithm, changes monitoring, feature space, digital elevation model.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Sentinel-2	2
1.2	Natura 2000	4
2	Algoritmy programu NaturaSatMonitoring	5
2.1	Výpočet obálky krivky a načítanie príslušných dát	5
2.2	Výpočet masky krivky	8
2.2.1	Kontrola vnútorných pixelov	10
2.2.2	Modifikovaný scanline algoritmus	13
2.2.3	Porovnanie algoritmov	16
2.3	Výpočet štatistík	16
3	Užívateľské prostredie programu NaturaSatMonitoring	20
3.1	Načítanie satelitných snímok a segmentačných kriviek	21
3.2	Výpis štatistík	23
3.3	Porovnanie štatistík	24
4	Numerické experimenty	27
4.1	Vysoká pri Morave	27
4.2	Morušový luh	29
4.3	Pekná cesta - záhradkárska oblasť	31
4.4	Hvezdáreň, Modra	33
4.5	Slalomka, Rača	35
5	Rozšírenie priestoru vlastností pre klasifikáciu biotopov	37
5.1	Klasifikácia biotopov	37
5.2	Digitálny výškový model	38
5.3	Normalizovaný diferenčný vodný index - NDWI	40
6	Záver	44
	Bibliografia	45

1 Úvod

Pre zachovanie biodiverzity prírody na Zemi je dôležité chrániť a monitorovať biotopy, ktoré k nej prispievajú. Ich monitorovanie, ktoré sa v minulosti vykonávalo najmä terénnym prieskumom, je časovo aj finančne náročné. Z toho dôvodu sme sa rozhodli v našej práci preskúmať možnosti monitorovania biotopov pomocou družíc misie Sentinel-2, ktoré môžu prispieť ku kvalitnejšej kontrole týchto území a rýchlejšej reakcií na náhle zmeny (či už spôsobené klimatickou zmenou, ľudskou činnosťou alebo škodcami).

Naším cieľom bolo vyvinúť program NaturaSatMonitoring ako doplňujúci program k softvéru NaturaSat [13], ktorý dokáže takéto monitorovanie vykonávať a umožní užívateľom sledovať zmeny v prehľadnom zobrazení. Algoritmy a objektový návrh pre prácu so satelitnými snímkami a segmentačnými krivkami boli prevzaté zo softvéru NaturaSat a ďalej sme ich dopĺňali novými funkcionalitami pre monitorovanie, spracovanie štatistík a ich porovnanie.

V prvej kapitole s názvom Algoritmy programu NaturaSatMonitoring (2) popisujeme najdôležitejšie algoritmy, ktoré sme v programe implementovali. Najprv sa zaoberáme výpočtom obálky krivky pre načítanie dát, aby nebolo nutné pracovať s dátami celej satelitnej snímky. Ďalej sa venujeme maske krivky, pre ktorú sme implementovali dva rôzne algoritmy, ktoré sme následne porovnali a na konci kapitoly sa ešte zaoberáme spracovaním získaných hodnôt a výpočtom štatistík.

Druhá kapitola Uživatelské prostredie programu NaturaSatMonitoring (3) sa venuje grafickému užívateľskému prostrediu a samotnej práci s programom. Popisuje funkciu jednotlivých súčastí užívateľského prostredia a ich použitie na načítanie dát, zobrazenie štatistík a ich porovnávanie.

V tretej kapitole Numerické experimenty (4) sa zaoberáme experimentami, pri ktorých sme vykonávali monitorovanie vybraných biotopov na západe Slovenska vzhľadom na satelitné snímky z rokov 2017-2021 a popisujeme získané výsledky.

Druhou časťou práce bolo rozšírenie priestoru vlastností (angl. feature space) pre nástroje klasifikácie biotopov Natura 2000 v softvéri NaturaSat. Klasifikácia biotopov prebieha na základe vektora štatistík, ktoré boli pre danú segmentačnú krivku vypočítané zo všetkých optických kanálov satelitnej snímky.

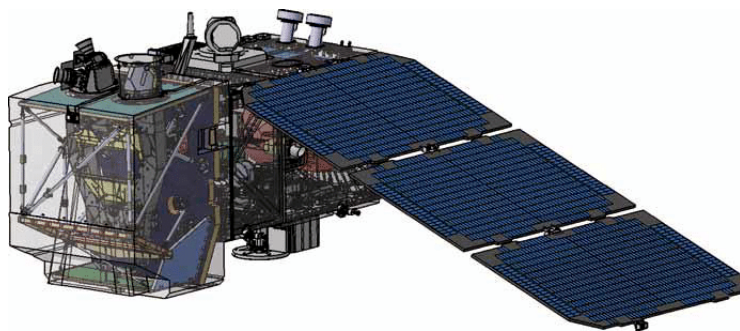
V poslednej kapitole Rozšírenie priestoru vlastností pre klasifikáciu biotopov (5) sa venujeme pridaniu ďalších relevantných informácií do priestoru vlastností. K štatistikám z optic-

kých kanálov dodávame nové hodnoty vypočítané z nadmorských výšok v bodoch satelitnej snímky. Týmto rozšírením vylepšujeme dáta, ktoré vstupujú do klasifikačného algoritmu implementovaného v aplikácii NaturaSat [10]. Rozšírený priestor vlastností zabezpečuje presnejšie priradenie nezaradených biotopov do správnej skupiny. Priestor vlastností je možné rozšíriť aj o vzdialenosti segmentačnej krivky od riek a vodných plôch, načo slúži vypočítaný normalizovaný diferenčný vodný index (NDWI).

1.1 Sentinel-2

Misia Sentinel-2 [14], ako aj ďalšie misie pod názvom Sentinel, spadajú pod program Európskej únie Copernicus, ktorý bol založený v roku 2014. Družice programu Sentinel boli vyvinuté Európskou vesmírnou agentúrou (ESA) a slúžia na diaľkový prieskum Zeme. Ich hlavným cieľom je produkovať kvalitné, aktuálne a voľne dostupné informácie v rôznych výskumných oblastiach. Zaoberá sa šiestimi hlavnými sférami: klimatické zmeny, monitorovanie zemského povrchu, atmosféry a morí, zaistenie bezpečnosti obyvateľstva a krízový manažment, napr. v prípade prírodných katastrof. V súčasnosti je aktívnych 7 misií, pričom každá sa zameriava na iný aspekt pozorovania Zeme.

V našej práci sme pracovali výhradne s dátami z misie Sentinel-2. Táto misia poskytuje multispektrálne snímky zemského povrchu a pobrežných vôd. Snímky zabezpečuje dvojica identických družíc - Sentinel-2A a Sentinel-2B (Obr. 1.1), ktoré boli vypustené na obežnú dráhu v rokoch 2015 a 2017. Tieto družice sa pohybujú vo výške 786 km na rovnakej dráhe s fázovým posunom 180° , vďaka čomu je dĺžka celého monitorovacieho cyklu 5 dní. Najdôležitejšou súčasťou družíc pre získavanie príslušných dát je multispektrálny senzor (MSI), ktorý zachytáva svetlo odrazené od Zeme a dokáže snímať až 13 optických kanálov (Tab. 1.1 hore) s rôznymi vlnovými dĺžkami. Rozlíšenie týchto optických kanálov sa pohybuje v rozmedzí 10, 20 alebo 60 metrov.



Obr. 1.1: Schématické znázornenie modelu družíc misie Sentinel-2 [16]

Misia poskytuje viaceré typy produktov, ktoré obsahujú už spracované optické dáta z družíc. Voľne dostupné pre užívateľov sú dva z nich, a to Level-1C, ktorý zodpovedá pozorovaniam z vrchnej časti atmosféry a Level-2A, ktorý naopak zodpovedá pozorovaniam

Kanál	Názov	Rozlíšenie (m)	Vlnová dĺžka (nm)
B1	Coastal aerosol (Detekcia pobrežného aerosólu)	60	443
B2	Blue (Modré viditeľné svetlo)	10	490
B3	Green (Zelené viditeľné svetlo)	10	560
B4	Red (Červené viditeľné svetlo)	10	665
B5	Vegetation classification - visible and near infrared (Klasifikácia vegetácie - viditeľné a blízke infračervené svetlo)	20	705
B6	Vegetation classification - visible and near infrared (Klasifikácia vegetácie - viditeľné a blízke infračervené svetlo)	20	740
B7	Vegetation classification - visible and near infrared (Klasifikácia vegetácie - viditeľné a blízke infračervené svetlo)	20	783
B8	Near infrared (Blízke infračervené svetlo)	10	842
B8a	Vegetation classification - narrow near infrared (Klasifikácia vegetácie - úzke pásmo blízkeho infračerveného svetla)	20	865
B9	Water vapour - short wave infrared (Vyparovanie vody - krátkovlnné infračervené svetlo)	60	940
B10	Cloud map - short wave infrared (Mapa oblačnosti - krátkovlnné infračervené svetlo)	60	1375
B11	Snow/ice/cloud discrimination - short wave infrared (Rozlišovanie snehu/ľadu/oblačnosti - krátkovlnné infračervené svetlo)	20	1610
B12	Snow/ice/cloud discrimination - short wave infrared (Rozlišovanie snehu/ľadu/oblačnosti - krátkovlnné infračervené svetlo)	20	2190
AOT	Aerosol optical thickness (Optická hrúbka aerosólov)		
SCL	Scene classification (Klasifikácia scenérie)		
SNW	Snow map (Snehová mapa)		
WVP	Scene-average water vapour map (Mapa priemerného vyparovania)		

Tabuľka 1.1: Optické kanály zaznamenané družicami misie Sentinel-2 (hore) a odvodené kanály produktu Level-2A (dole)

zo spodnej časti atmosféry. Navyše okrem priamo snímaných kanálov v tabuľke (Tab. 1.1 hore) obsahujú ďalšie dopočítané údaje (Tab. 1.1 dole), s ktorými tiež pracujeme. Oba tieto produkty sú distribuované v štvorcovej sieti, kde jeden štvorec siete má veľkosť 100x100 km v Mercatorovom konformnom valcovom zobrazení v transverzálnej polohe (UTM).

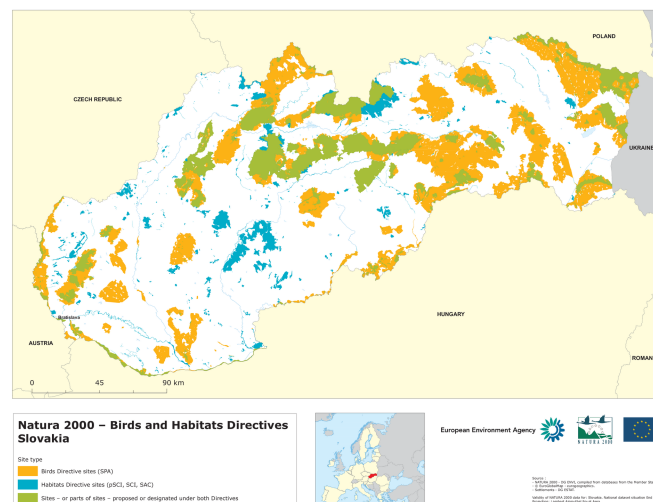
Dáta sa dajú získať z Copernicus Open Access Hub [2] vo forme komprimovaného priečinku obsahujúceho súbory v JP2 formáte, ktoré prislúchajú k jednotlivým optickým kanálom. Ku kanálu môže patriť viac súborov v rôznych rozlíšeniach, napr. pre červený optický kanál B4, ktorý má rozlíšenie 10x10 metrov, pripadajú okrem JP2 súboru v rozlíšení 10 metrov aj súbory s rozlíšením 20 a 60 metrov.

1.2 Natura 2000

Územie Európskej únie sa vyznačuje veľkou rôznorodosťou fauny aj flóry, ktorou oplýva aj samotné Slovensko vďaka polohe v oblasti Karpát a Panónskej nížiny. Natura 2000 je európska sústava chránených území, ktorej cieľom je zachovať a ochraňovať prírodné dedičstvo štátov Európskej únie. [17] Prostredníctvom nej sú chránené najvzácnejšie druhy rastlín, živočíchov a vybraných biotopov.

Sústava Natura 2000 pozostáva z chránených vtáčích území a území európskeho významu. V súčasnosti sa na území Európskej únie nachádza spolu 26 935 týchto oblastí, ku ktorým Slovensko prispelo 41 chránenými vtáčimi územiami a 642 územiami európskeho významu znázornenými na Obr. 1.2.

Členské štáty EÚ sú povinné sledovať stav chránených biotopov a druhov a zaznamenávať ich zmeny, či už priaznivé alebo nepriaznivé. Monitoring týchto území spadá pod Štátnu ochranu prírody SR, no keďže je Slovensko veľmi bohaté na prírodné dedičstvo, ide o náročnú úlohu. Riešením by mohol byť práve automatický monitoring prostredníctvom satelitných snímok z družíc Sentinel-2.



Obr. 1.2: Územia chránené sústavou Natura 2000 na Slovensku [3]

2 Algoritmy programu NaturaSatMonitoring

Program NaturaSatMonitoring je podporný program pre aplikáciu NaturaSat, ktorý uľahčuje a automatizuje monitorovanie biotopov Natura 2000. Semi-automatické a automatické segmentácie oblastí biotopov vo forme uzavretých polygónov (segmentačné krivky) boli získané programom NaturaSat [12, 11]. Monitorovanie biotopov pozostáva z analýzy jednotlivých optických kanálov poskytovaných snímkami z misie Sentinel-2 vo vnútri zvolených segmentačných kriviek v rôznych časoch a porovnania vypočítaných štatistík. V prípade výrazných rozdielov v ich hodnotách môžeme predpokladať, že v biotope došlo k značným zmenám.

Tento program je implementovaný v jazyku C++ a grafické užívateľské prostredie bolo vytvorené pomocou knižníc Qt pre vývoj aplikácií s grafickým užívateľským rozhraním. V programe boli použité aj knižnice GDAL [4] a OpenJpeg [5] na prácu s JP2 súbormi a knižnica GeographicLib [8] pre transformácie geodetických súradnicových sústav.

2.1 Výpočet obálky krivky a načítanie príslušných dát

Monitorovanie biotopov priamo závisí od oblasti, v ktorej sa nachádzajú. Štvorcová sieť, v ktorej sú distribuované satelitné snímky, má definované kódové označenie pre každý štvorec siete. Preto je potrebné si ako prvé zvoliť kód lokácie, v ktorej chceme pracovať [15]. To je možné načítaním satelitnej snímky v komprimovanom formáte priamo z počítača užívateľa.

Biotopy, ktoré chceme monitorovať, vstupujú do programu v podobe uzavretých segmentačných kriviek. Príkladom je krivka znázornená na Obr. 2.1, ktorá zodpovedá biotopu lužných vrbovo-topoľových a jelšových lesov 91E0 neďaleko obce Vysoká pri Morave. Tieto krivky sú dané zoznamom definovaným GPS polohami bodov (zemepisná šírka a dĺžka vo WGS84 súradnicovom systéme). V programe tento súradnicový systém predstavuje 2D karteziánsky súradnicový systém (x, y) satelitnej snímky. Momentálne je v programe implementované načítanie segmentačných kriviek v KML formáte, ale je možné ho ďalej rozšíriť aj o iné formáty. V jednom KML súbore sa môže nachádzať aj viacero kriviek, ktoré spolu vyznačujú nespojitú vysegmentovanú oblasť. Z tohto dôvodu využívame v objektovom návrhu



Obr. 2.1: Segmentačná krivka biotopu 91E0 neďaleko Vysokej pri Morave

programu dve triedy **Curve** a **CurveSet**, v ktorých rozlišujeme jednotlivé krivky a skupiny kriviek, ktoré k sebe prislúchajú. Pre každý KML súbor, ktorý obsahuje ľubovoľný počet kriviek, vytvoríme objekt triedy **CurveSet**, ktorý v sebe ďalej bude mať zoznam objektov triedy **Curve** pre každú krivku v súbore.

Trieda **Curve** obsahuje súradnice krivky v originálnych GPS súradniciach, ako aj v pretransformovaných UTM súradniciach. Na transformáciu pôvodných GPS súradníc do UTM formátu používame knižnicu GeographicLib, ktorá slúži na transformácie medzi rôznymi typmi súradnicových sústav. Konkrétna segmentačná krivka vždy prislúcha do oblasti danej načítanou satelitnou snímku, a preto je možné transformovať jej súradnice do novej súradnicovej sústavy s počiatkom v ľavom hornom bode satelitnej snímky a upraviť ich do cieľového 10-metrového rozlíšenia.

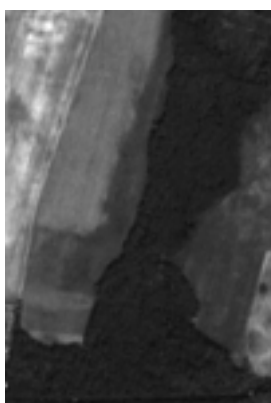
Aby sme vedeli vypočítať štatistiky vo vnútri týchto kriviek, potrebujeme pracovať s dátami zo satelitných snímok. Tie sú však veľmi veľké, a preto je v našom prípade nepraktické pracovať s celými dátami snímky. Nás zaujímajú oblasti, ktoré sú zväčša malé v porovnaní s rozmerom celej snímky. Z tohto dôvodu sa zameriavame len na obálku krivky a dáta v nej.

Obálka krivky (resp. skupiny kriviek) predstavuje najmenší obdĺžnik, daný minimom a maximom v oboch súradnicových smeroch, obsahujúci celú krivku. Súradnice ľavého horného bodu obálky ($envMinX$, $envMinY$) a pravého dolného bodu obálky ($envMaxX$, $envMaxY$) v upravených UTM súradniciach, ako aj súradnice týchto bodov v zemepisnej šírke a dĺžke, počítame priamo pri načítaní krivky pomocou funkcie *setEnvelope* a ukladajú sa do premenných tried **Curve** a **CurveSet**. Výpočet súradníc bodov obálky pozostáva z hľadania minimálnych a maximálnych hodnôt x -ovej a y -ovej súradnice medzi všetkými bodmi krivky. Majme krivku zloženú z n bodov, kde i -ty bod má súradnice (x_i, y_i) pre $i = 0, 1, \dots, n - 1$.

Potom pre ľavý horný a pravý dolný bod obálky vypočítame súradnice ako

$$\begin{aligned} envMinX &= \min_{0 \leq i < n} (x_i), \\ envMinY &= \min_{0 \leq i < n} (y_i), \\ envMaxX &= \max_{0 \leq i < n} (x_i), \\ envMaxY &= \max_{0 \leq i < n} (y_i). \end{aligned}$$

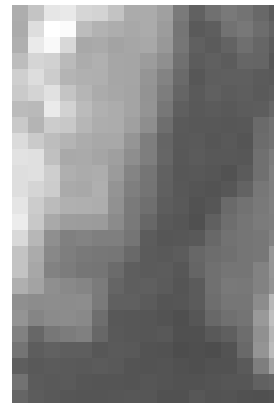
Pre počítanie štatistík potrebujeme originálne nepreškálované dáta z JP2 súborov pre jednotlivé kanály. Nie každý kanál má však rovnaké rozlíšenie, preto je potrebné pred načítaním dát upraviť súradnice a rozmery obálky do správneho rozlíšenia. Na to nám slúži premenná *resRatio* daná pre každý kanál, ktorá zodpovedá pomeru reálneho rozlíšenia kanálu a cieľového 10-metrového rozlíšenia. Pomocou tejto premennej potom vieme dodatočne upraviť súradnice obálky do správneho rozlíšenia vzhľadom na konkrétny kanál. Načítané dáta pre tú istú krivku v rôznych rozlíšeniach môžeme vidieť na Obr. 2.2.



(a) Kanál B04 (rozlíšenie 10m)



(b) Kanál B05 (rozlíšenie 20m)



(c) Kanál B01 (rozlíšenie 60m)

Obr. 2.2: Dáta vo vnútri obálky krivky pre biotop vo Vysokéj pri Morave z optických kanálov s rôznym rozlíšením

Načítanie dát vybraného optického kanála vo vnútri obálky zabezpečuje funkcia *getDataInsideCurve*. Vstupujú do nej informácie, o ktorú konkrétnu satelitnú snímku a jej kanál ide, údaje o obálke a referencia na pole *outputData*, do ktorého dáta ukladáme. Na čítanie dát používame knižnicu GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), ktorá slúži na čítanie a zápis rastrových a vektorových GIS súborov.

Ako prvé je potrebné spraviť už spomínanú transformáciu do rozlíšenia optického kanála. Vypočítame si odsadenie obálky od ľavého horného bodu satelitnej snímky vzhľadom na x -ovú a y -ovú súradnicu (*offsetX*, *offsetY*), ako súradnice ľavého horného bodu obálky transformované pomocou *resRatio* do príslušného rozlíšenia, podľa rovnice (2.1). Keďže pracujeme s rastrovými dátami, tak musíme upraviť tieto hodnoty na celé čísla. Pri výpočte odsadenia zaokrúhľujeme nadol, aby sme zabezpečili o jeden rad, resp. stĺpec pixelov navyše

a nespôsobili useknutie dát, a tým skreslenie výsledných štatistík. Ďalej potrebujeme určiť veľkosť dát, resp. veľkosť obálky, v oboch súradnicových smeroch $sizeX$ a $sizeY$. Zaokrúhlime hodnoty súradníc pravého dolného bodu obálky nahor pre jednoznačné zachytenie všetkých dát vo vnútri krivky a spravíme rozdiel týchto hodnôt s odsadením, čím dostaneme správne rozmery obálky, ako je znázornené v rovniciach (2.2).

$$offsetX = \lfloor \frac{envMinX}{resRatio} \rfloor \quad (2.1)$$

$$offsetY = \lfloor \frac{envMinY}{resRatio} \rfloor$$

$$sizeX = \lceil \frac{envMaxX}{resRatio} \rceil - offsetX \quad (2.2)$$

$$sizeY = \lceil \frac{envMaxY}{resRatio} \rceil - offsetY$$

Na samotné načítanie dát použijeme funkciu *RasterIO* z knižnice GDAL, ktorá umožňuje čítať ľubovoľne veľký výrez z dát zo súboru. Ako parametre do nej vstupujú údaje o obálke krivky (aká veľká časť dát má byť čítaná) a údaje o vstupnom poli pre zápis, do ktorého chceme dáta načítať:

- *GDALRWFlag* - vyjadruje, či ide o čítanie alebo zápis do súboru,
- odsadenie v smere osi x (*offsetX*),
- odsadenie v smere osi y (*offsetY*),
- šírka výrezu v pixeloch (*sizeX*),
- výška výrezu v pixeloch (*sizeY*),
- pole, do ktorého sa načítajú dáta (*outputData*),
- šírka výstupného poľa,
- výška výstupného poľa,
- typ dát vo výstupnom poli.

Veľkosť výrezu načítaných dát a veľkosť výstupného poľa nemusí byť rovnaká, čo spôsobuje interpoláciu dát. V našom prípade chceme pracovať s originálnymi dátami, preto má výstupné pole rovnakú veľkosť ako obálka krivky. Pole *outputData*, ktoré z funkcie *RasterIO* vystupuje, budeme ďalej používať pri výpočte štatistík.

2.2 Výpočet masky krivky

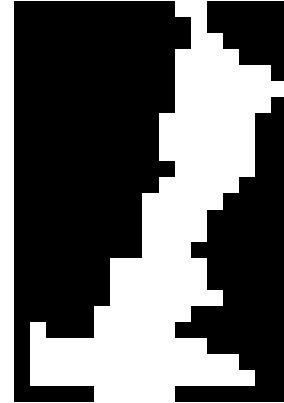
Pojem maska obrázka je často používaný v spracovaní obrazu. Používa sa na určenie, ktoré pixely dát majú byť pri aplikovaní rôznych nástrojov vynechané, resp. zahrnuté. Pixely,



(a) Maska pre kanál B04 (rozlíšenie 10m)



(b) Maska pre kanál B05 (rozlíšenie 20m)



(c) Maska pre kanál B01 (rozlíšenie 60m)

Obr. 2.3: Maska krivky vytvorená modifikovaným scanline algoritmom pre rovnaký biotop a optické kanály ako na Obr. 2.2

ktoré chceme spracovať alebo použiť pri výpočte štatistík, označíme 1 (biela farba) a tie, ktoré vynechávame, označíme 0 (čierna farba). Preto môžeme o maske povedať, že ide o čiernobiely obrázok s rozmermi rovnakými ako dáta (Obr. 2.3), z ktorých budeme štatistiky počítať.

V našom prípade máme dáta z optického kanála, ktorý zodpovedá celej obálke krivky. Štatistiky, ktoré nás zaujímajú, však chceme vypočítať len z hodnôt vo vnútri krivky, preto je pre nás dôležité zostaviť masku o rovnakej veľkosti, ktorá bude znázorňovať, ktoré pixely sa nachádzajú vo vnútri krivky a ktoré sú naopak mimo nej. Pixel považujeme za vnútorný, ak sa jeho stred nachádza vo vnútri krivky.

Na vytvorenie masky sa dá použiť viacero prístupov. Implementovali sme najprv jednoduchší, no časovo náročnejší postup a ďalej sme sa snažili nájsť efektívnejší spôsob, v ktorom sme použili modifikáciu grafického algoritmu scanline pre vyplňanie polygónov. Oba tieto prístupy sú založené na práci s priamkami a ich priesečníkmi, preto si k nim najprv zavedieme základnú teóriu.

Priamku môžeme definovať pomocou dvoch bodov, ktorými prechádza alebo priamo pomocou predpisu. Môžeme ju vyjadriť všeobecnou rovnicou $ax + by + c = 0$, parametrickou rovnicou $X = A + t\vec{u}$ alebo v smernicovom tvare rovnice $y = kx + q$.

Dve priamky môžu byť navzájom rovnobežné totožné, rovnobežné rôzne a rôznobežné (Obr. 2.4) vzhľadom na to, koľko majú spoločných bodov. Rovnobežné totožné priamky sú identické, zhodujú sa vo všetkých bodoch. Prienikom rovnobežných rôznych priamok je prázdna množina, nepretínajú sa, preto neexistuje ich priesečník. Nakoniec rôznobežné priamky sa pretínajú v jednom bode - priesečníku P , ktorého súradnice nás zaujímajú.

Priesečník dvoch priamok analyticky určíme pomocou ich rovníc. Ide o bod, ktorý leží súčasne na oboch priamkach, preto ak prvá priamka má rovnicu $y = kx + q$ a druhá priamka $y = ax + b$, tak priesečník určíme z rovnosti

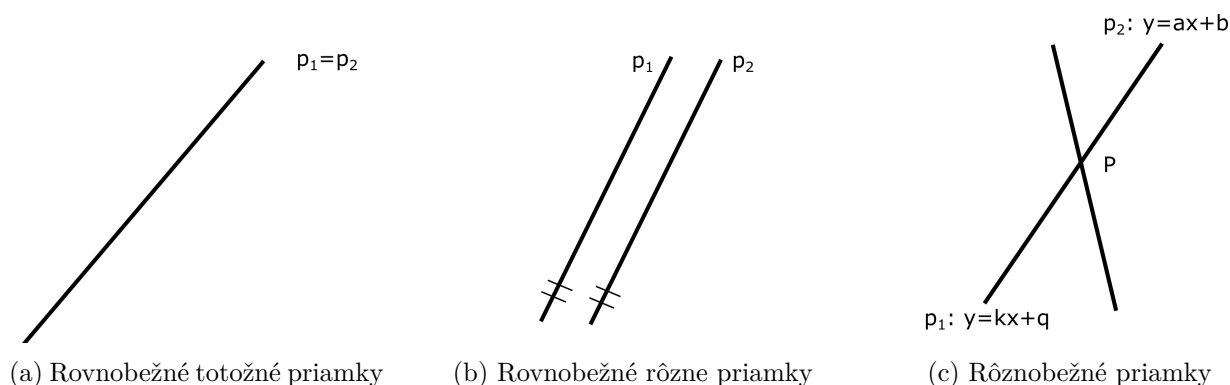
$$kx + q = ax + b. \quad (2.3)$$

Vyjadříme si x -ovú súradnicu a jej dosadením do jednej z rovníc dopočítame y -ovú súradnicu priesečníka.

$$(k - a)x = b - q$$

$$x = \frac{b - q}{k - a} \Rightarrow y = k \frac{b - q}{k - a} + q$$

Pri vytváraní masky budeme hľadať priesečník horizontálnej priamky prechádzajúcej stredom pixelu, resp. celého riadku, s krivkou.



Obr. 2.4: Vzájomná poloha dvoch priamok v rovine

2.2.1 Kontrola vnútorných pixelov

Prvý algoritmus, ktorý sme implementovali, kontroluje každý jeden pixel, či sa nachádza vo vnútri krivky. Celý algoritmus je založený na tom, že pixel považujeme za vnútorný, ak horizontálna priamka, ktorá ním prechádza, má s krivkou naľavo aj napravo od neho nepárny počet priesečníkov. To znamená, že stačí kontrolovať počet priesečníkov len na jednu stranu od pixelu, pričom v našej implementácii sme si zvolili kontrolovať priesečníky napravo.

Vypočítajú sa stredy pixelov (x_{px}, y_{px}) postupne v cykle cez $i = 0, \dots, sizeX * sizeY - 1$ ako

$$x_{px} = i \bmod sizeX + \frac{1}{2},$$

$$y_{px} = i \div sizeX + \frac{1}{2},$$

kde \div predstavuje operáciu celočíselného delenia a následne sa pre aktuálny pixel prechádzajú všetky body tvoriace krivku transformované do rozlíšenia optického kanála, ktorému maska prislúcha. V každej iterácii cyklu sa vezmú dva po sebe nasledujúce body krivky, ktoré definujú priamku. Pre nás sú dôležité tie dvojice bodov (x_1, y_1) a (x_2, y_2) , pre ktoré platí $y_1 \leq y_{px} \leq y_2$, t.j. úsečka medzi týmito bodmi krivky má priesečník s horizontálnou priamkou prechádzajúcou stredom aktuálneho pixelu. Keď vieme, že priesečník existuje, zostáva nám zistiť jeho x -ovú súradnicu, aby sme mohli určiť, či ide o priesečník napravo od nášho pixelu. To spravíme pomocou princípu z rovnosti (2.3).

Najprv je potrebné určiť rovnice priamok, ktorých priesečník hľadáme. Aby sme mohli zostaviť smernicový tvar rovnice priamky $y = kx + q$ danej dvomi po sebe nasledujúcimi bodmi zo segmentačnej krivky, potrebujeme určiť jej smernicu. Majme priamku danú bodmi $A = (x_1, y_1)$ a $B = (x_2, y_2)$, kde $x_1 < x_2$ a $y_1 < y_2$. Potom smernica k bude mať tvar $k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$. Ďalej potrebujeme určiť neznámu q , a to tak, že do rovnice dosadíme jeden z bodov priamky, napr. bod A a vyjadríme z nej q .

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 + q \\ q &= y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 \end{aligned}$$

Výsledný tvar rovnice je

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x + y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x + x_1) + y_1.$$

Rovnica horizontálnej priamky prechádzajúcej stredom aktuálneho pixela má rovnicu $y = y_{px}$.

Priesečník $P = (\tilde{x}, \tilde{y})$ vypočítame ako spoločný bod týchto priamok. Pre y -novú súradnicu \tilde{y} platí $\tilde{y} = y_{px}$, preto nám stačí vyjadriť neznámu x -ovú súradnicu \tilde{x} .

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (\tilde{x} + x_1) + y_1 \\ \tilde{x} &= (\tilde{y} - y_1) \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} - x_1 \\ &\vdots \\ \tilde{x} &= \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{y_2 - y_1} - \tilde{y} \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Vypočítanú x -ovú súradnicu priesečníka nakoniec stačí už len porovnať s x -ovou súradnicou pixelu. Vopred sme si určili, že sa budeme zaujímať o počet priesečníkov napravo od nášho pixelu, preto zisťujeme, či platí $x_{px} < \tilde{x}$.

Celý algoritmus je zhrnutý v Algoritme 1, kde

- *state* je boolean premenná, ktorá má hodnotu true, ak sa napravo od x nachádza nepárny počet priesečníkov,
- *curveCoordX1*, *curveCoordY1* sú súradnice prvého bodu krivky (x_1, y_1) ,
- *curveCoordX2*, *curveCoordY2* sú súradnice druhého bodu krivky (x_2, y_2) ,
- *denominator* je menovateľ vystupujúci v (2.4),
- *xIntersection* je x -ová súradnica priesečníka (\tilde{x}) ,

Algoritmus 1: Výpočet masky - kontrola vnútorných pixelov

Vstup: stred pixela (x_{px}, y_{px}) , súradnice obálky krivky, pomer rozlíšenia $curveRatio$, krivka c ako objekt triedy **CurveSet**

```
1 state ← false;
2 curveCoordX1, curveCoordY1, curveCoordX2, curveCoordY2 ← 0;
3 denominator ← 0;
4 xIntersection ← 0;
5 coords ← coordinates of each curve in c;
6 for j = 0 to number of curves in c do
7   for i = 0 to size of coords[j] do
8     curveCoordX1 ←  $\frac{coords[j][i][0]}{curveRatio} - envMinX$ ;
9     curveCoordY1 ←  $\frac{coords[j][i][1]}{curveRatio} - envMinY$ ;
10    curveCoordX2 ←  $\frac{coords[j][i+1][0]}{curveRatio} - envMinX$ ;
11    curveCoordY2 ←  $\frac{coords[j][i+1][1]}{curveRatio} - envMinY$ ;
12    if curveCoordX1 == curveCoordX2 and curveCoordY1 == curveCoordY2 then
13      continue;
14    end
15    if (curveCoordY1 ≥ y) ≠ (curveCoordY2 ≥ y) then
16      denominator ← curveCoordY2 - curveCoordY1;
17      if denominator ≠ 0 then
18        xIntersection ←  $\frac{curveCoordX1 * curveCoordY2 - curveCoordX2 * curveCoordY1}{denominator} - y_{px} * \frac{curveCoordX1 - curveCoordX2}{denominator}$ ;
19        if  $x_{px} < xIntersection$  then
20          state ← !state;
21        end
22      end
23    end
24  end
25 end
```

- $coords$ je dvojrozmerné pole súradníc jednotlivých kriviek v CurveSete.

Výstupom je hodnota premennej $state$, na základe ktorej priradíme pixelu vo vektore masky správnu hodnotu - ak $state = true$, zapíšeme 1 a ak $state = false$, zapíšeme 0.

Tento algoritmus je založený na jednoduchom princípe, preto je ľahko zostaviteľný, avšak nie je efektívny. Jeho nevýhodou je, že musíme prechádzať každý pixel výrezu dát a pre každý z nich prejsť všetky body krivky. Pre dáta z malej oblasti je algoritmus efektívny, ale ak chceme pracovať s viacerými, prípadne aj veľkými krivkami, ktoré majú veľké obálky, tak je vytvorenie masky výpočtovo náročné.

Preto sme ďalej chceli nájsť efektívnejší algoritmus, ktorý bude pracovať rýchlejšie.

2.2.2 Modifikovaný scanline algoritmus

Druhý algoritmus, ktorý sme implementovali, bol modifikovaný scanline algoritmus, ktorým sme chceli zefektívniť vytváranie masky. Pixely by mohli byť v prípade neupraveného scanline algoritmu identifikované nesprávne, ak sú body krivky tak nahusto, že v rámci jedného pixela sa ich nachádza viac. To bol aj prípad kriviek, na ktorých sme algoritmus testovali. Preto sme navrhli modifikáciu klasického scanline algoritmu, ktorá tento problém vyrieši a ošetrí aj identifikáciu okrajových pixelov. Výsledné masky vytvorené týmto algoritmom pre konkrétny biotop sú znázornené na Obr. 2.3.

Scanline algoritmus [1] slúži na jednofarebné vyplnenie oblasti s polygoniálnou hranicou. Vypĺňa oblasť postupne po riadkoch pixelov zhora nadol, a to tak že určí minimálnu y-ovú súradnicu predstavujúcu prvý riadok, nájde priesečníky daného riadku s hranicou a pixely medzi dvojicou po sebe nasledujúcich priesečníkov vyplní. Potom sa presunie na ďalší riadok, a to sa opakuje až po posledný riadok.

Do modifikovaného scanline algoritmu vstupujeme s vynulovaným poľom pre masku a so zoznamom bodov tvoriacich hranicu oblasti. Polygoniálna hranica je zložená z hrán definovaných dvojicami po sebe nasledujúcich bodov. Aby sme mohli algoritmus použiť, je potrebné si najprv definovať a správne zoradiť tieto hrany. Každá hrana má svoj začiatkový bod (x_z, y_z) a koncový bod (x_k, y_k) . Určíme orientáciu hrán tak, aby smerovali zhora nadol, t.j. $y_z < y_k$ a vypočítame ich smernicu

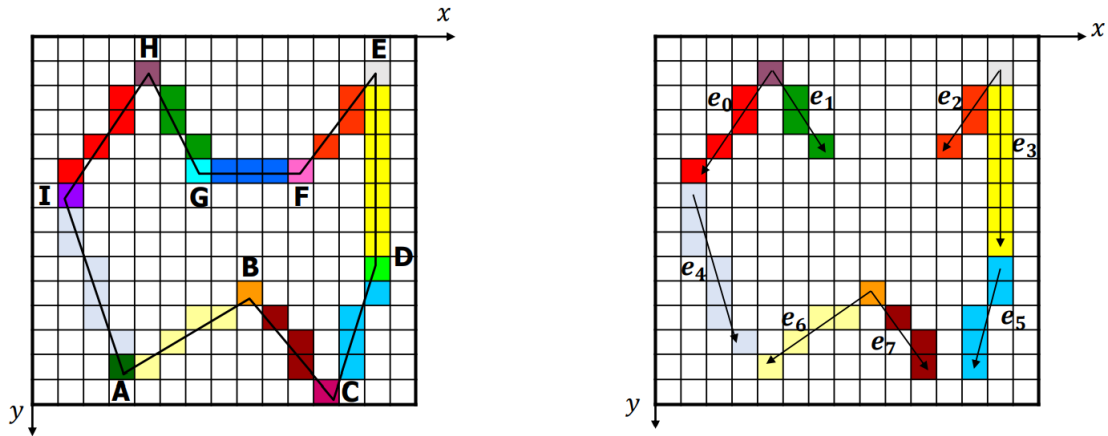
$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_k - y_z}{x_k - x_z}.$$

Následne každú hranu skrátime zdola o jeden pixel $y_k = y_k - 1$, aby nedošlo k nejednoznačnosťam, a vynecháme horizontálne hrany $y_z = y_k$. Takto pripravené hrany oblasti zoradíme vzostupne podľa y-ovej súradnice začiatkového bodu y_z . Celá príprava hrán je graficky zhrnutá na Obr. 2.5.

Scanline algoritmus pracuje s dvomi poľami:

- pole hrán o $y_{max} - y_{min}$ riadkoch, do ktorého sa každá hrana uloží do riadku s indexom $y_z - y_{min}$ a obsahuje o nich informácie o
 - počte riadkov, do ktorých zasahuje $\Delta y = y_k - y_z$,
 - x-ovej súradnici priesečníka s horizontálnou priamkou prechádzajúcou spodným okrajom aktuálneho riadku x ,
 - prevrátenej hodnote smernice, ktorá vyjadruje, k akému prírastku x-ovej súradnice dôjde pri prechode na ďalší riadok $w = \frac{1}{m}$,
- pole aktívnych hrán, v ktorom sa nachádzajú hrany, ktoré majú priesečník s aktuálnym riadkom a sú zoradené vzostupne podľa x-ovej súradnice priesečníka - hrana do tohto poľa vstupuje, ak v aktuálnom riadku začína a vystupuje, ak v aktuálnom riadku končí.

Do scanline algoritmu vstupujú vopred pripravené hrany oblasti. Príprava hrán s výpočtom ich smerníc a vytvorením poľa hrán je zhrnutá v Algoritme 2. Pole aktívnych hrán sa naplňa až priamo v scanline algoritme.



Obr. 2.5: Spracovanie a príprava hrán polygónu na vstup do scanline algoritmu

Keďže pre každú hranu poznáme jej okrajové body a smernicu, môžeme zostaviť jej smernicový tvar rovnice:

$$y = mx + y_z - mx_z = m(x - x_z) + y_z$$

a hľadať priesečník ako v rovnosti (2.3). Aktuálny riadok s rovnicou $y = y_a$ má s danou hranou x -ovú súradnicu priesečníka x_a

$$y_a = mx_a - mx_z + y_z,$$

$$x_a = \frac{y_a}{m} - \frac{y_z}{m} + x_z = wy_a - wy_z + x_z.$$

Nasledujúci riadok s rovnicou $y = y_a + 1$ bude mať x -ovú súradnicu priesečníka

$$x_{a+1} = w(y_a + 1) - wy_z + x_z = wy_a - wy_z + x_z + w = x_a + w, \quad (2.5)$$

t.j. x -ovú súradnicu nového priesečníka dostaneme pripočítaním prevrátenej hodnoty smernice hrany w .

Na začiatku zvolíme $y = y_{min}$ a v cykle postupne prechádzame poľom hrán. Ak sa v danom riadku nejaká hrana začína, vložíme ju do poľa aktívnych hrán. V našom prípade je polygoniálna hranica predstavovaná segmentačnou krivkou, ktorej body sú veľmi blízko pri sebe, preto v rámci jedného pixela môže byť viac hrán. Nás však zaujímajú len tie, ktoré majú priesečník s horizontálnou priamkou prechádzajúcou stredom pixela. Preto skontrolujeme

Algoritmus 2: Príprava hrán oblasti

Vstup: zoznam bodov hranice *vertices*

```
1  $e \leftarrow$  basic array of edges;
2 for  $i = 0$  to size of vertices do
3    $e[i].begin \leftarrow$  starting point of edge in orientation  $begin < end$ ;
4    $e[i].end \leftarrow$  ending point of edge in orientation  $begin < end$ ;
5    $m \leftarrow$  slope of edge;
6    $e[i].w \leftarrow \frac{1}{m}$ ;
7 end
8 remove horizontal edges ( $e[i].w == \infty$ ) from  $e$ ;
9 sort  $e$  by  $y$  coordinate of  $begin$ ;
10  $y_{min} \leftarrow e[0].begin.y$ ;
11  $y_{max} \leftarrow \max_{0 \leq i \leq \text{size of } vertices} (vertices[i].y)$ ;
12  $edgesTable \leftarrow$  array of edges of size  $y_{max} - y_{min} + 1$ ;
13 for  $i = 0$  to size of  $e$  do
14    $a.e \leftarrow \&e[i]$ ;
15    $a.dy \leftarrow \lfloor e[i].end.y \rfloor - \lfloor e[i].begin.y \rfloor$ ;
16    $a.x \leftarrow e[i].begin.x$ ;
17    $a.w \leftarrow e[i].w$ ;
18   to  $edgesTable[\lfloor e[i].begin.y \rfloor - y_{min}]$  append  $a$ ;
19 end
```

všetky hrany z poľa aktívnych hrán a vyberieme tie, pre ktoré platí

$$y + \frac{1}{2} \geq y_z \quad \wedge \quad y + \frac{1}{2} \leq y_k$$

a uložíme si ich do osobitného poľa *selectedAE*. Priesečníky budeme hľadať len pre hrany z tohto poľa.

Zoradíme hrany zo *selectedAE* vzostupne podľa x -ovej súradnice. V cykle prechádzame cez každú druhú hranu, lebo vyplňame úsek riadku medzi dvojicami priesečníkov. X -ové súradnice priesečníkov hrán prislúchajú priesečníkom hrán s horizontálnou priamkou prechádzajúcou spodným okrajom pixela. Pixely však identifikujeme na základe ich stredov, preto potrebujeme zistiť x -ové súradnice priesečníkov týchto hrán s priamkou prechádzajúcou stredom pixela (*xLeft, xRight*). Táto priamka má rovnicu $y = y_a + \frac{1}{2}$ a z toho vypočítame x -ovú súradnicu priesečníka ako

$$x_{a+\frac{1}{2}} = w \left(y_a + \frac{1}{2} \right) - w y_z + x_z = w y_a - w y_z + x_z + \frac{w}{2} = x_a + \frac{w}{2}.$$

Zistíme počet pixelov *number*, ktorý sa nachádza medzi dvojicou priesečníkov a ak je nenulový, tak všetkým pixelom medzi nimi, okrem okrajových, v maske priradíme hodnotu 1. Pre okrajové pixely, cez ktoré prechádzajú hrany zo *selectedAE*, porovnáme x -ovú súradnicu

priesečníka hrany a stredu pixela. Pixel identifikujeme ako vnútorný, ak

- $x + \frac{1}{2} \geq xLeft$ pre ľavý okrajový pixel,
- $x + number + \frac{1}{2} \leq xRight$ pre pravý okrajový pixel,

kde x je index ľavého okrajového pixela. Ak $number = 0$, tak sa oba priesečníky nachádzajú v tom istom pixeli a ak platí, že x -ová súradnica stredu sa nachádza medzi nimi, tak je vnútorný a priradíme mu hodnotu 1.

Nakoniec sa upraví hodnoty hrán, ktoré sa nachádzajú v poli aktívnych hrán. Ak počet riadkov, do ktorých momentálne zasahujú Δy je nulový, tak hranu odstránime z poľa. V opačnom prípade Δy znížime o jedna a určíme priesečník x s novým riadkom pripočítaním prevrátenej hodnoty smernice, ako je vyjadrené v rovnici (2.5). Zväčšíme y o jedna a začína sa nová iterácia tohto cyklu. Modifikovaný scanline algoritmus je zobrazený v Algoritme 3.

2.2.3 Porovnanie algoritmov

Pomocou časovača ponúkaného knižnicou Qt sme nakoniec tieto dva algoritmy porovnali. Odmerali sme čas behu samotného algoritmu vytvorenia masky v nanosekundách pre jednu krivku a pre optické kanály s rôznymi rozlíšeniami.

Na meranie sme si vybrali jednu z kriviek zodpovedajúcich väčšiemu biotopu. Čas behu samotného algoritmu závisí od veľkosti oblasti a aj od rozlíšenia daného optického kanálu. Pre rozlíšenie 60 metrov, kedy obálka krivky obsahuje najmenší počet pixelov, sme pozorovali rozdiel rádovo 10^1 v prospech modifikovaného scanline algoritmu. Pri rozlíšeníach 10 a 20 metrov sme mohli vidieť už rozdiel rádovo 10^2 . V prípade väčšieho množstva väčších kriviek sa môže rádivý rozdiel medzi trvaním týchto algoritmov ešte zväčšiť.

2.3 Výpočet štatistík

Na výpočet štatistík vo vnútri zvoleného biotopu zo zvoleného optického kanála potrebujeme získať obálku dát *outputData* a masku krivky *mask*. Následne program ponúka možnosť vypočítať strednú hodnotu *mean*, smerodajnú odchýlku *std*, minimum *min* a maximum *max*. Užívateľ určuje priamo v užívateľskom prostredí, ktoré štatistiky chce z danej oblasti vypočítať pre vybrané optické kanály.

V triede **CurveSet** sa pre každý štatistický údaj nachádza dvojrozmerné pole. Prvý rozmer závisí od počtu načítaných satelitných snímok a druhý rozmer zodpovedá počtu optických kanálov snímky. K ich vyplneniu dôjde, keď užívateľ stlačí tlačidlo s nápisom *Show statistics*. Vo vonkajšom cykle sa prechádzajú všetky zvolené optické kanály a vo vnútornom všetky zvolené segmentačné krivky. Pomocou funkcie *computeStatistics*, do ktorej vstupuje referencia na objekt triedy **CurveSet** *cSet*, index súboru satelitnej snímky a index zvoleného

Algoritmus 3: Výpočet masky - modifikovaný scanline algoritmus

Vstup: pole hrán *edgesTable*, pole masky *mask* a šířka oblasti *width*

```
1  $y \leftarrow y_{min}$ ;
2 for  $i = 0$  to size of edgesTable do
3   if edgesTable[ $i$ ] is not empty then
4     | add edges in edgesTable[ $i$ ] to activeEdgesList;
5   end
6   for  $j = 0$  to size of activeEdgesList do
7     | if  $(y + 0.5 \geq \text{activeEdgesList}[j].e.begin.y)$  and  $(y + 0.5 < \text{activeEdgesList}[j].e.end.y)$ 
8       | then
9         | | add activeEdgesList[ $j$ ] to array selectedAE;
10      | end
11   end
12   sort selectedAE by  $x$  coordinate of intersection;
13   for  $j = 0$  to  $\frac{\text{size of selectedAE}}{2}$  do
14     |  $number \leftarrow \lfloor \text{selectedAE}[2 * j + 1].x \rfloor - \lfloor \text{selectedAE}[2 * j].x \rfloor$ ;
15     |  $x \leftarrow \lfloor \text{selectedAE}[2 * j].x \rfloor$ ;
16     |  $xLeft \leftarrow \text{selectedAE}[2 * j].x + \frac{1}{2} \text{selectedAE}[2 * j].w$ ;
17     |  $xRight \leftarrow \text{selectedAE}[2 * j + 1].x + \frac{1}{2} \text{selectedAE}[2 * j + 1].w$ ;
18     | if  $number \neq 0$  then
19       | | for  $1 \leq k < number$  do
20         | | |  $mask[y * width + x + k] = 1$ ;
21       | | end
22       | | if  $x + 0.5 \geq xLeft$  then
23         | | |  $mask[y * width + x] = 1$ ;
24       | | end
25       | | if  $x + number + 0.5 \leq xRight$  then
26         | | |  $mask[y * width + x + number] = 1$ ;
27       | | end
28       | | else if  $(x + 0.5 \geq xLeft)$  and  $(x + 0.5 \leq xRight)$  then
29         | | |  $mask[y * width + x] = 1$ ;
30       | | end
31     | end
32   for  $j = 0$  to size of activeEdgesList do
33     | if activeEdgesList[ $j$ ].dy == 0 then
34       | | remove edge activeEdgesList[ $j$ ] from activeEdgesList;
35     | end
36     | reduce activeEdgesList[ $j$ ].dy by 1;
37     | add activeEdgesList[ $j$ ].w to activeEdgesList[ $j$ ].x
38   end
39    $y ++$ ;
40 end
```

optického kanála, vypočítame všetky štatistické údaje a uložíme ich do poľa na príslušnú pozíciu.

Niektoré štatistické údaje môžu byť pri stlačení tlačidla s nápisom *Show statistics* už vypočítané, preto sa ich výpočet preskakuje. V opačnom prípade voláme funkciu *getDataInsideCurve*, ktorá načíta obálku dát do poľa *outputData* a následne funkciu *createMask*, ktorá v sebe obsahuje modifikovaný scanline algoritmus pre vytvorenie poľa masky *mask*. Potom dochádza k postupnému výpočtu štatistík.

Dáta, ktoré zodpovedajú vnútru segmentačnej krivky, predstavujú štatistický súbor. Štatistický súbor sa skladá zo štatistických jednotiek, ktorými sú u nás jednotlivé hodnoty optického kanála. Väčšinou sa nepracuje s celým štatistickým súborom, lebo býva veľmi veľký, ale len s náhodným výberom – reprezentatívnou vzorkou súboru. V našom prípade ide o úplne šetrenie, lebo sa zaujímate o konkrétnu oblasť a uvažujeme všetky hodnoty v jej vnútri. Merania, ktoré vytvárajú obsah štatistického súboru, môžu byť spojitaj alebo diskretnaj (nespojitej) povahy, podľa toho, aký charakter hodnôt nadobúdajú. Od tohto rozdelenia často závisí aj výpočet rôznych charakteristík. Dáta zo satelitnej snímky, s ktorými pracujeme, sú diskretné.

Stredná hodnota je charakteristika, ktorá predstavuje vážený priemer hodnôt náhodnej premennej. Pre diskretný štatistický súbor s hodnotami x_i , $i = 0, \dots, N$ sa stredná hodnota vypočíta ako

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i.$$

Na jej výpočet slúži funkcia *mean*. Smerodajná odchýlka vyjadruje, ako sa hodnoty štatistického súboru líšia od strednej hodnoty. Vypočítame ju pomocou funkcie *std* ako

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Minimum a maximum sú jednoduché popisné charakteristiky, ktoré určíme prechádzaním cez všetky hodnoty a ich porovnávaním. Dajú sa počítať súčasne, preto sú spoločne zhrnuté vo funkcii *minmax*, ktorá vracia dvojicu hodnôt. Pre všetky tieto štatistiky sa v cykle prechádza každý prvok masky a ak je rovný 1, tak sa zoberie príslušná hodnota z dát *outputData* a použije sa pri ich výpočte. Ak je prvok masky rovný 0, tak sa daná hodnota z *outputData* ignoruje.

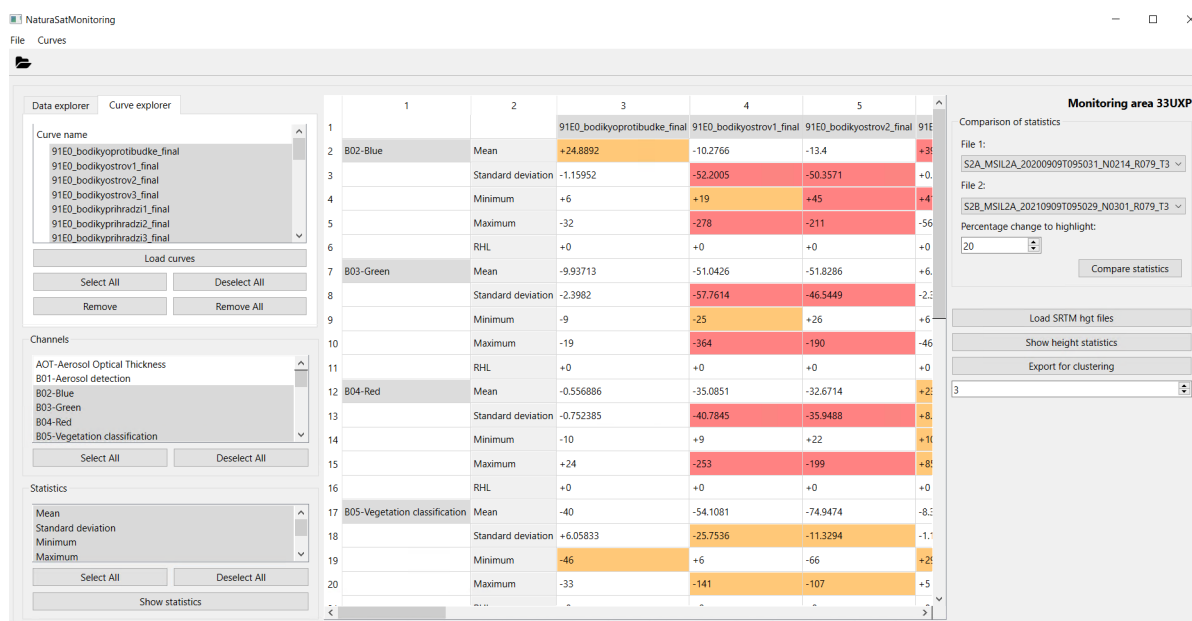
Pri monitorovaní biotopov nás zaujímajú zmeny v štatistikách, ku ktorým v priebehu času dochádza. Porovnanie hodnôt štatistických údajov pre satelitné snímky z rôznych časov nám môže napovedať, že v danej oblasti došlo k určitej zmene. Môže ísť o rôzne typy zmien, napr. vplyvom ľudskej činnosti (výrub) či napadnutím rastlínstva škodcami. Hodnoty štatistík sa však môžu meniť výrazne aj so zmenou ročného obdobia, čo je typické práve pre naše zemepisné šírky. Preto je vhodné porovnávať satelitné snímky z podobných období, napríklad

monitorovanie oblasti v ročnej perióde, aby nedošlo k chybným záverom.

V programe sa porovnáva vždy novšia snímka vzhľadom ku štatistikám staršej snímky a počíta sa rozdiel a aj percentuálna zmena ich štatistických hodnôt. Na základe vysokej percentuálnej zmeny (predvolená hodnota je nastavená na 20%) sa vo výpise príslušné bunky zvýraznia.

3 Uživatelské prostredie programu NaturaSatMonitoring

Grafické uživatelské prostredie programu NaturaSatMonitoring bolo zostavené pomocou knižnic Qt pre vývoj aplikácií s uživatelským prostredím. Naším cieľom bolo spraviť prehľadné a jednoducho ovládateľné prostredie, ktoré užívateľovi umožní vykonať požadované monitorovanie a zobraziť si jeho výsledky.



Obr. 3.1: Grafické uživatelské prostredie programu NaturaSatMonitoring

Okno programu (obr. 3.1) je rozdelené na tri časti:

- ľavý výber, ktorý obsahuje:
 - zoznam dostupných satelitných snímok *Data Explorer*,
 - zoznam načítaných segmentačných kriviek *Curve Explorer*,
 - zoznam všetkých optických kanálov snímok *Channels*,
 - výber štatistík *Statistics*,

a umožňuje vybrať z týchto zoznamov prvky, ktorých štatistiky chceme vypísať,

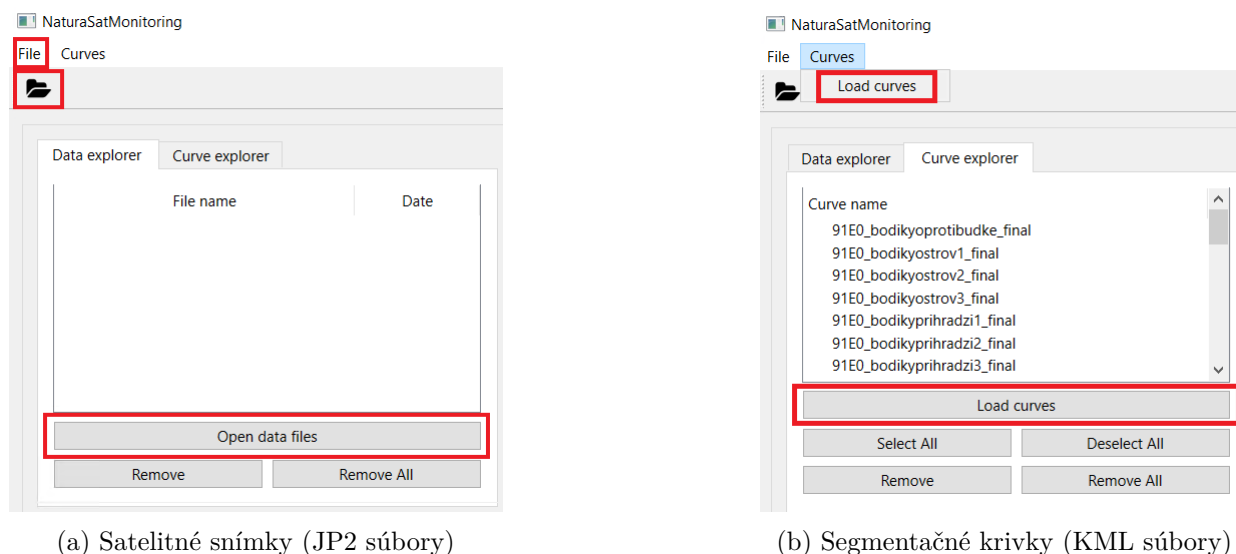
- tabuľka, ktorá slúži na zobrazenie zvolených štatistík,
- pravý výber, ktorý sa zameriava na porovnávanie štatistických hodnôt dvoch vybraných satelitných snímok.

3.1 Načítanie satelitných snímok a segmentačných kriviek

Aby bolo možné počítat a porovnávať štatistiky, je potrebné na začiatku načítať do programu dátový súbor zodpovedajúci satelitnej snímke. Načítanie sa dá spraviť tromi rôznymi spôsobmi:

1. cez menu v hornej lište v rozbalovacej ponuke *File*, kde sa nachádza možnosť *Open data files*,
2. kliknutím na ikonu priečinku v hornej lište,
3. pomocou tlačidla s nápisom *Open data files*, ktoré sa nachádza v časti *Data Explorer*.

Tieto možnosti sú vyznačené na obrázku 3.2a.



Obr. 3.2: Spôsoby načítania satelitných snímok a segmentačných kriviek do programu

Po interakcii s jednou z týchto možností dochádza k otvoreniu dialógového okna pre výber súborov z počítača. Následne zoznam mien zvolených súborov vstupuje do funkcie *openDataFiles*.

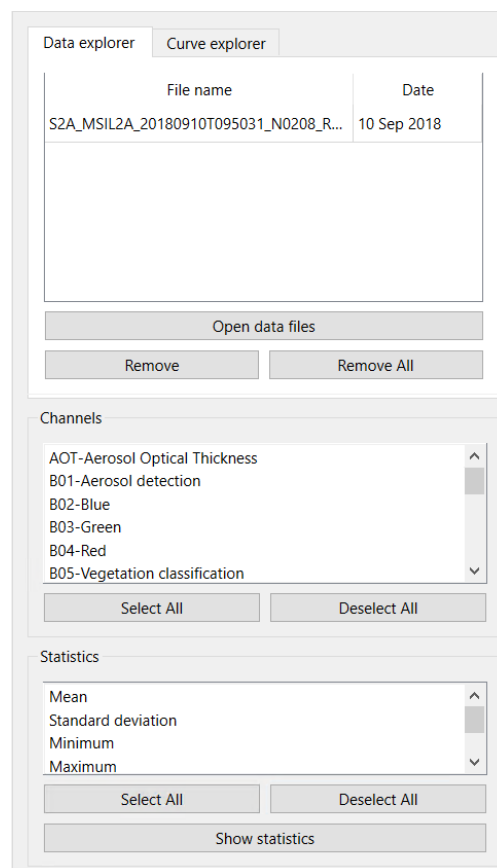
Funkcia *openDataFiles* prechádza postupne cez všetky súbory a pre každý vytvorí objekt triedy **JP2ZipFile** s jeho základnými údajmi. Momentálne program podporuje monitorovanie jednej oblasti naraz, preto pri načítaní dochádza ku kontrole georeferencie súboru. Ak

georeferencia nesedí s už načítanými súbormi, program otvorí upozorňujúce dialógové okno a tento súbor preskočí. Potom je súbor vložený do poľa súborov *files* a jeho názov a dátum vytvorenia príslušnej satelitnej snímky sa ako nový prvok pridajú do *Data Exploreru*. Ďalej sa do zoznamu *Channels* vložia názvy optických kanálov načítaných satelitných snímok (Obr. 3.3), v pravej hornej časti sa vypíše kód monitorovanej oblasti a odblokujú sa všetky ostatné funkcionality programu.

V *Data Exploreri* je možné zoznam načítaných súborov upravovať. Pomocou tlačidla s nápisom *Remove* sa odstránia aktuálne zvolené súbory v tabuľke. Druhé tlačidlo s nápisom *Remove All* odstráni všetky načítané súbory.

Pre výpočet štatistík potrebujeme do programu vložiť segmentačné krivky. Tie užívateľ nahrá buď cez menu a akciu *Load curves* v rozbaľovacej ponuke *Curves* alebo stlačením tlačidla s nápisom *Load curves*, ktoré sa nachádza v *Curve Exploreri* (Obr. 3.2b). *Curve Explorer* sa nachádza spoločne s *Data Explorerom* v ľavej časti užívateľského prostredia, kde každému prislúcha jedna z kariet. V oboch prípadoch sa otvorí dialógové okno, ktoré umožní vybrať z počítača KML súbory a volá sa funkcia *openCurveFiles*. Táto funkcia načítava zo súborov súradnice ich bodov a ukladá ich do objektov triedy **CurveSet**. Pred uložením týchto objektov do poľa kriviek *curveSets* sa skontroluje, či sa krivka naozaj nachádza v oblasti danej načítanými satelitnými snímkami. Ak sa v tejto oblasti nenachádza, otvorí sa upozorňujúce dialógové okno a táto krivka sa vynechá. V opačnom prípade krivku vložíme do poľa *curveSets* a jej názov zapíšeme do *Curve Exploreru*.

Curve Explorer zahŕňa zoznam mien načítaných kriviek a tlačidlá pre prácu s nimi. Okrem tlačidla pre načítanie kriviek môže užívateľ odstrániť zvolené krivky pomocou tlačidla s nápisom *Remove*, odstrániť všetky krivky pomocou tlačidla s nápisom *Remove All* a označiť všetky krivky ako zvolené, resp. ich všetky odznačiť pomocou tlačidiel s nápismi *Select All* a *Deselect All*.



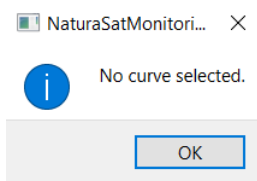
Obr. 3.3: Načítaním JP2 súboru sa jeho názov a dátum pridá do *Data Exploreru* a zoznam *Channels* sa naplní názvami optických kanálov tohto súboru.

3.2 Výpis štatistík

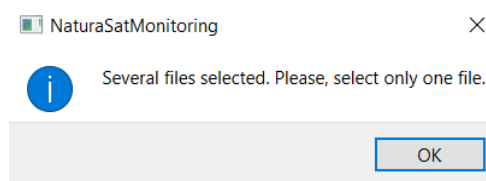
Stredná časť užívateľského prostredia slúži na zobrazenie tabuľky so štatistickými hodnotami. Užívateľ si môže navoliť, z ktorej snímky a pre ktoré krivky a kanály chce štatistiky zobraziť. Taktiež si môže navoliť, ktoré konkrétne štatistiky ho zaujímajú. Pre zjednodušenie zvolenia všetkých prvkov v týchto zoznamoch sa v *CurveExploreri*, v zozname kanálov *Channels* a zozname štatistík *Statistics* nachádzajú tlačidlá:

- s nápisom *Select All* pre zaznačenie všetkých prvkov daného zoznamu,
- s nápisom *Deselect All* pre odznačenie všetkých prvkov daného zoznamu.

Stlačením tlačidla s nápisom *Show statistics* pod zoznamom štatistík *Statistics* dochádza k výpisu štatistík. Najprv sa skontroluje, či sú vhodné vstupné dáta (polia zvolených súborov, kriviek, kanálov a štatistík). Ak v niektorom z týchto zoznamov nie je vyznačený žiaden prvok, otvorí sa okno upozorňujúce na chýbajúce informácie (Obr. 3.4a) alebo ak je zvolených viacero súborov, okno upozorní, že môže byť zvolený naraz len jeden súbor (Obr. 3.4b).



(a) Nebola zvolená žiadna krivka pre výpočet štatistík.



(b) Boli zvolené viaceré súbory - štatistiky sa dajú vypísať len pre jeden súbor naraz.

Obr. 3.4: Okná upozorňujúce na chýbajúce alebo nevhodne zvolené možnosti

V tomto momente dochádza k výpočtu štatistík. Vo vonkajšom cykle sa prechádza cez všetky zvolené optické kanály a vo vnútornom cez všetky zvolené segmentačné krivky. Pre každú krivku sa volá funkcia, v ktorej sa skontroluje, či štatistiky pre tento kanál nie sú už vypočítané. Ak nie sú, tak sa vypočítajú a uložia do polí pre štatistiky na miesto prislúchajúce danému optickému kanálu. Keď sú všetky zvolené štatistické hodnoty dopočítané, prečistí sa tabuľka (pre prípad, že sme v nej mali predtým vypísané hodnoty) a volá sa funkcia *showStatistics*.

Funkcia *showStatistics* má za úlohu naplniť tabuľku (Obr. 3.5). Najprv vytvorí hlavičky tabuľky. Každý zvolenej krivke bude prislúchať jeden stĺpec so štatistickými hodnotami, preto prvý riadok bude obsahovať názvy zvolených kriviek. Do prvého stĺpca sa vypíšu názvy zvolených optických kanálov a pre každý kanál sa do buniek druhého stĺpca zapíšu názvy vybraných štatistík. Do zvyšných buniek tabuľky sa zapíšu príslušné štatistické hodnoty.

1	2	3	4	5
1		91E0_bodikyoprotibudke_final	91E0_bodikyostrov1_final	91E0_bodikyostrov2
2	AOT-Aerosol Optical Thickness	Mean	100	100
3		Standard deviation	0	0
4		Minimum	100	100
5		Maximum	100	100
6	B01-Aerosol detection	Mean	217.583	309
7		Standard deviation	57.4651	38.1139
8		Minimum	136	274
9		Maximum	325	362
10	B02-Blue	Mean	194.275	276.872
11		Standard deviation	49.0881	76.6416
12		Minimum	80	89
13		Maximum	336	527
14	B03-Green	Mean	385.021	490.837
15		Standard deviation	97.137	116.78
16		Minimum	155	161
17		Maximum	625	796
18	B04-Red	Mean	229.078	320.801
19		Standard deviation	63.9755	85.3618
20		Minimum	78	100
21		Maximum	410	494

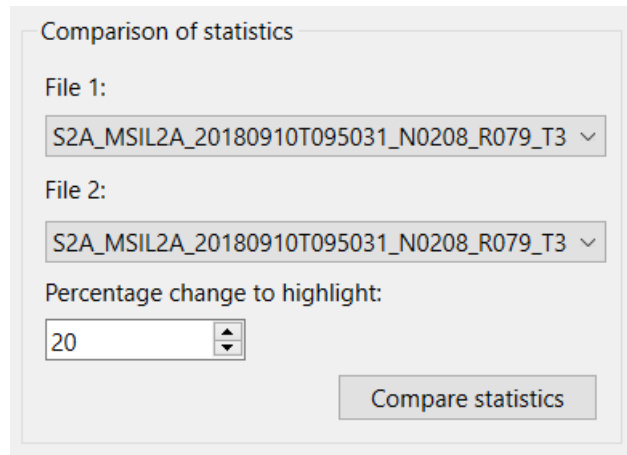
Obr. 3.5: Tabuľka so štatistickými hodnotami

3.3 Porovnanie štatistík

Na porovnávanie štatistík medzi dvomi satelitnými snímkami je vyhradená pravá časť užívateľského prostredia *Comparison of statistics*, ktorá je zobrazená na Obr. 3.6. Nachádzajú sa tu dva rozbalovacie zoznamy, ktoré sa pri načítaní JP2 súborov naplnia názvami satelitných snímkov. V týchto zoznamoch vyberieme súbory, ktoré chceme porovnať, pričom nezáleží na tom, či ich zvolíme chronologicky. Program bude vždy počítať zmenu štatistík novšej snímky vzhľadom na staršiu snímku. Aby došlo k porovnaniu, musia byť v zoznamoch zvolené rôzne súbory. V opačnom prípade nás na tento problém program upozorní a požiada o zvolenie dvoch rôznych súborov.

Na porovnanie a vypísanie štatistík slúži tlačidlo s nápisom *Compare statistics*. Po jeho stlačení sa najprv skontrolujú všetky vstupy. Ako pri vypisovaní štatistík jedného súboru, aj tu je potrebné zvoliť si krivky, optické kanály a štatistické hodnoty, ktoré chceme porovnať. Ak by z niektorého z týchto zoznamov nebol vybraný žiaden prvok, upozornilo by na to informačné okno. Ďalej sa dopočítajú štatistiky, ktoré zatiaľ neboli vypočítané a nakoniec sa použije funkcia *compareStatistics*.

Do tejto funkcie ako prvé vchádzajú dva súbory, ktoré chceme porovnať, v chronologickom poradí. Prvý vstupuje starší súbor a až po ňom novší, preto pred volaním tejto funkcie robíme porovnanie dátumov, v ktorých boli vytvorené satelitné snímky. Priamo vo funkcii dochádza k výpočtu rozdielov aj naplneniu tabuľky. Najprv sa vytvoria hlavičky rovnako ako v prípade funkcie *showStatistics* a potom sa pre každú bunku vypočíta rozdiel štatistických



Obr. 3.6: Box *Comparison of statistics* určený na porovnávanie štatistík

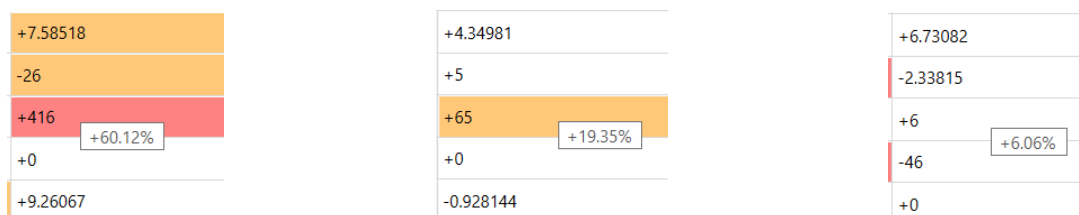
hodnôt *value* ako

$$value = statNewer - statOlder,$$

kde *statOlder* je štatistika pre aktuálnu krivku a kanál zo staršieho súboru a *statNewer* z novšieho súboru. Vypočíta sa aj ich percentuálny rozdiel *percent* ako

$$percent = \frac{value}{statOlder}.$$

Pri niektorých optických kanáloch bývajú hodnoty nulové (napr. SNW - snehová mapa), preto môže dôjsť k deleniu nulou. V prípade, že aj *value* je nulová, tak $\frac{0}{0}$ sa do premennej uloží ako `nan(ind)`. Tento prípad je ošetrený nastavením *percent* = 0, lebo reálne nedošlo k žiadnej zmene. Ak *value* je nenulová, tak sa do premennej *percent* uloží ∞ , resp. $-\infty$. Percentuálne zmeny sa nevypisujú do tabuľky (Obr. 3.8), ale sú nastavené tak, aby sa znázornili pri prechode myšou cez bunku (Obr. 3.7).



Obr. 3.7: Ukážka zobrazenia percentuálnych zmien pre výrazné, mierne a malé zmeny

Pri monitorovaní biotopov nás zaujímajú výrazné zmeny, ku ktorým medzi vznikom zvolených satelitných snímok došlo. Percentuálne zmeny vyššie ako zvolená hranica sa v tabuľke farebne zvýraznia. Predvolená hodnota je nastavená na 20%, ale užívateľ si ju môže kedykoľvek zmeniť. Farebné zvýraznenie má dve úrovne. Majme nastavenú hodnotu *borderValue*. Bunky s hodnotami percentuálnej zmeny, ktoré sú väčšie ako *borderValue*, sa zvýraznia červenou farbou a bunky, pre ktoré je percentuálna zmena väčšia ako $\frac{borderValue}{2}$ a menšia ako *borderValue*, sa vyfarbia oranžovou farbou.

1	2	3	4	5		
1		91E0_bodikyprotibudke_final	91E0_bodikyostrov1_final	91E0_bodikyostrov2_final	91E0_boc	
2	B02-Blue	Mean	-3.20359	+22.3617	+22.2429	-3.42329
3		Standard deviation	+4.34981	+36.7257	+33.9485	+8.72581
4		Minimum	+5	+15	+10	-22
5		Maximum	+65	+195	+137	+137
6		RHL	+0	+0	+0	+0
7	B03-Green	Mean	-0.928144	+41.9574	+30.2857	-0.30821
8		Standard deviation	+3.5154	+41.9928	+27.2859	+12.5337
9		Minimum	-14	+7	+49	-27
10		Maximum	+63	+258	+162	+113
11		RHL	+0	+0	+0	+0
12	B04-Red	Mean	+0.122754	+45.0496	+35.6143	+0.37808
13		Standard deviation	+2.06206	+32.5856	+25.8357	+12.2404
14		Minimum	+28	+1	+34	-12
15		Maximum	+21	+252	+173	+80
16		RHL	+0	+0	+0	+0
17	B05-Vegetation classification	Mean	+5.38636	+80.0811	+63.5789	+2.00548
18		Standard deviation	-10.7526	+0.478991	-4.45578	+13.2825
19		Minimum	-22	+70	+28	-71
20		Maximum	-20	+143	+83	+14
21		RHL	+0	+0	+0	+0

Obr. 3.8: Tabuľka s rozdielmi štatistických hodnôt so zvýraznenými bunkami, ktoré zodpovedajú veľkej alebo miernej zmene

4 Numerické experimenty

V tejto kapitole sa venujeme aplikácii programu NaturaSatMonitoring na hľadanie výrazných zmien vo vybraných biotopoch. Pracujeme so satelitnými snímkami z oblasti Západného Slovenska s kódom 33UXP. V tejto oblasti máme botanikmi z Centra biológie rastlín a biodiverzity SAV pomocou softvéru NaturaSat vysegmentovaných 124 chránených oblastí zodpovedajúcich jednému z piatich druhov biotopov [18]:

- **91E0** - lužné vrbovo-topoľové a jelšové lesy,
- **91F0** - lužné dubovo-brestovo-jaseňové lesy okolo nížinných riek,
- **91G0** - karpatské a panónske dubovo-hrabové lesy,
- **9110** - kyslomilné bukové lesy,
- **6510** - nížinné a podhorské kosné lúky.

Experimentálne monitorovanie prebieha na dátach z rokov 2017-2021. Aby monitorovanie nevedlo k nesprávnym záverom, bolo nutné spracovávať dáta z podobných období. Preto sme použili satelitné snímky zo septembra každého roku, čím sme sa chceli vyvarovať zmenám štatistík spôsobených ročnými obdobiami, či inými sezónnymi zmenami.

Program NaturaSatMonitoring aktuálne podporuje manuálne monitorovanie, kedy je nutné požadované satelitné snímky načítať z počítača užívateľa. Po ich vložení do programu sme pomocou funkcionality na porovnávanie štatistík z dvoch rôznych snímok hľadali biotopy, ktorých hodnoty sa výrazne zmenili.

Zmeny niektorých optických kanálov nie sú ľahko interpretovateľné a je dôležité ich prekonzultovať s odborníkmi z oblasti botaniky, preto sme sa zamerali najmä na pozorovanie tých kanálov, ktoré vieme hneď interpretovať (B2, B3, B4, ...). Biotopy, ktorých výsledné hodnoty naznačovali výrazné zmeny, sme následne porovnali v softvéri NaturaSat vizuálne a ak to bolo možné, vyhodnotili sme ich príčiny.

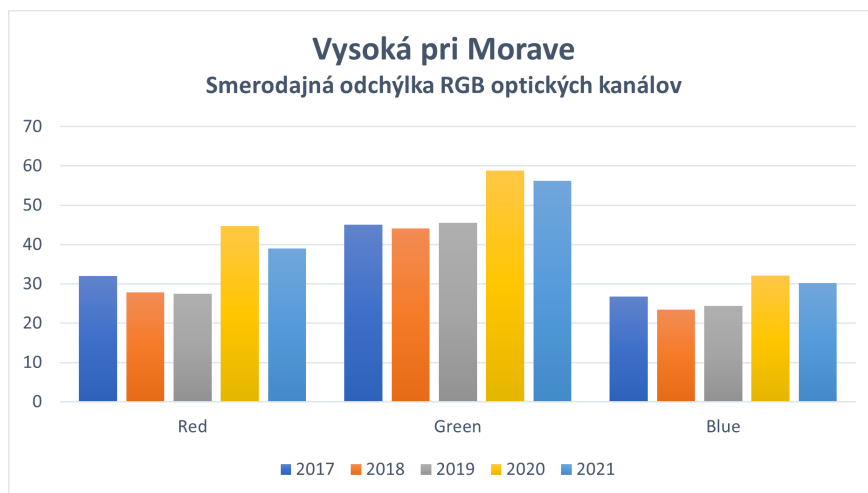
4.1 Vysoká pri Morave

Vysoká pri Morave je biotop typu 91F0 a patrí medzi viacero vysegmentovaných biotopov nachádzajúcich sa v okolí obce Vysoká pri Morave.

Medzi rokmi 2017 a 2018 dochádza k nárastu štatistických hodnôt modrého optického kanálu. Stredná hodnota stúpla o 29.61% a smerodajná odchýlka klesla o 12.56%. Nasledujúci rok opačne klesá stredná hodnota modrého kanálu o 12.55% a mierne klesá aj stredná hodnota červeného kanálu. K výraznejšej zmene dochádza medzi rokmi 2019 a 2020, kedy sa výrazne menia smerodajné odchýlky RGB kanálov. Smerodajná odchýlka modrého optického kanálu stúpla o 31.50%, zeleného optického kanálu o 29.36% a červeného optického kanálu o 62.76%. Taktiež ďalej klesá stredná hodnota modrého kanálu o 10.52%. V poslednom roku dochádza k nárastu strednej hodnoty modrého kanálu o 18.96% a zvyšné zmeny nie sú významné. Porovnanie strednej hodnoty a smerodajnej odchýlky pre RGB kanály v pozorovaných rokoch je znázornené na grafoch na Obr. 4.1.



(a) Porovnanie stredných hodnôt

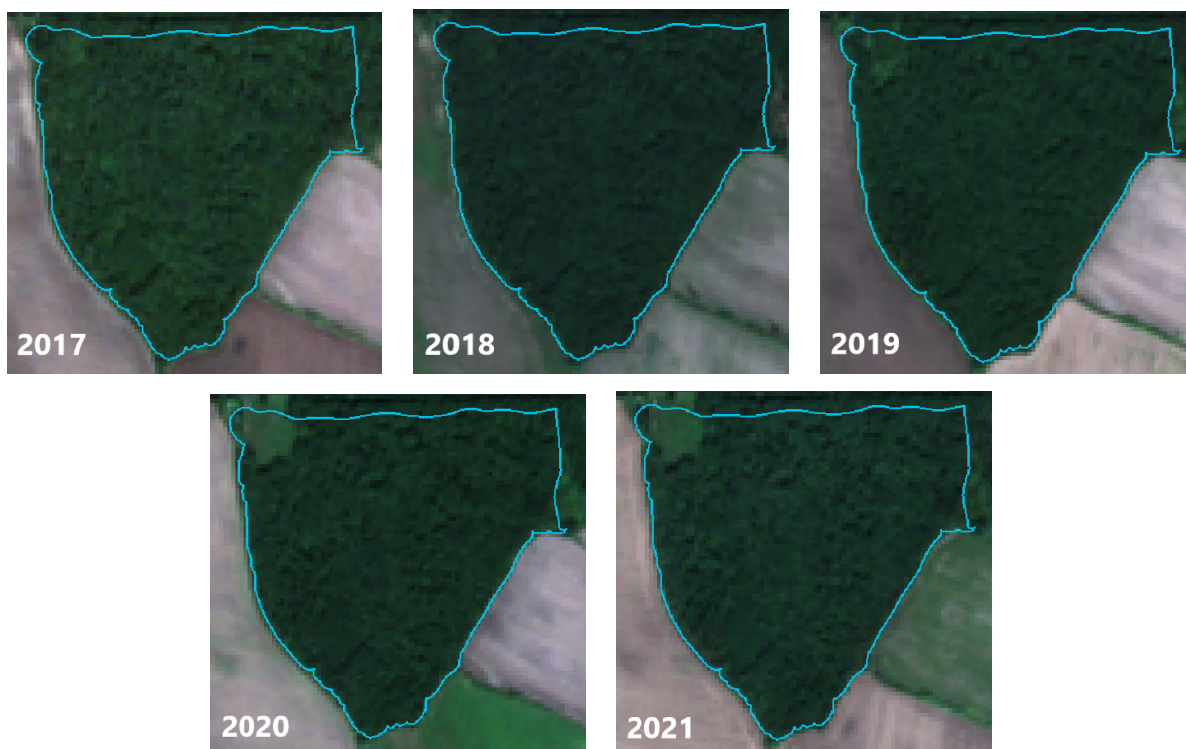


(b) Porovnanie smerodajných odchýlok

Obr. 4.1: Porovnanie štatistických hodnôt červeného, zeleného a modrého optického kanálu biotopu Vysoká pri Morave medzi rokmi 2017-2021

Vizualizácia satelitných snímok v monitorovaných obdobiach (Obr. 4.2) jasne ukazuje odlesnenie v ľavej hornej časti biotopu. Miznutie porastu začalo už v roku 2019 a výrub

pokračoval do finálnej podoby v roku 2020. Stav biotopu sa odvtedy ďalej výrazne nemenil.



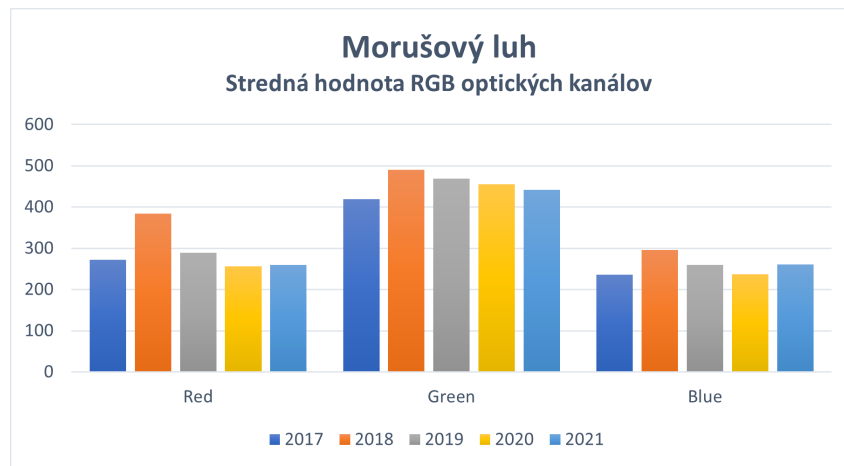
Obr. 4.2: Oblasť biotopu Vysoká pri Morave medzi rokmi 2017 a 2021 v chronologickom poradí

4.2 Morušový luh

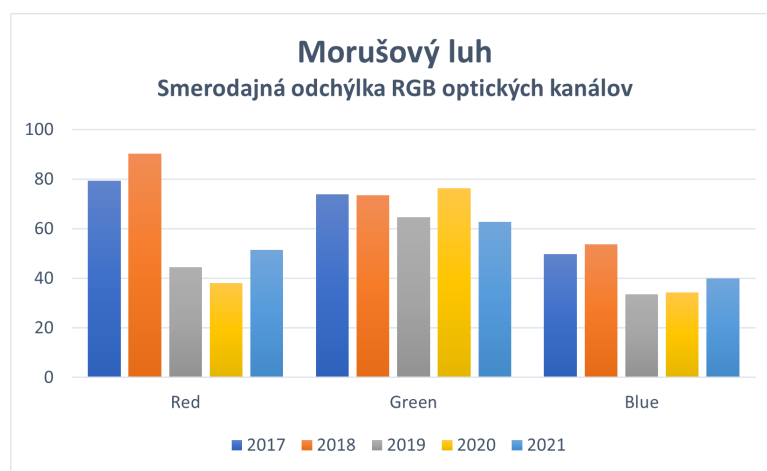
Morušový luh je biotop typu 91E0, ktorý leží pri Devínskej Novej Vsi na brehu rieky Morava. Jeho monitorovanie ukázalo viacero výrazných medziročných zmien červeného, zeleného a modrého optického kanálu (Obr. 4.3), ktoré sa dajú najľahšie overiť pomocou satelitných snímok.

Medzi rokmi 2017 a 2018 došlo k nárastu v stredných hodnotách týchto troch optických kanálov - červený mal navýšenie o 41.34%, zelený o 16.96% a modrý o 25.37%. Okrem toho došlo k poklesu strednej hodnoty optického kanálu B9, ktorý zodpovedá vyparovaniu vody, o 24.56%. To môže naznačovať, že v roku 2018 v sebe dokázal biotop zadržať viac vody.

Zmeny v RGB kanáloch pokračovali aj medzi rokmi 2018 a 2019. Stredná hodnota modrého kanálu klesla o 12.25% a stredná hodnota červeného kanálu až o 24.77%. Vidíme, že v priebehu tohto roka došla k opačnej zmene ako rok predtým. Výrazne poklesla aj smerodajná odchýlka všetkých troch RGB kanálov - pre červený kanál o 50.81%, pre zelený kanál o 11.94% a pre modrý kanál o 37.41%. Opačne sa správali aj hodnoty kanálu B9, ktoré v tomto období vykazujú nárast strednej hodnoty o 46.28%, teda môžeme predpokladať, že z biotopu sa vyparilo väčšie množstvo vody. Výrazne sa menili aj štatistiky optických kanálov pre klasifikáciu vegetácie.



(a) Porovnanie stredných hodnôt



(b) Porovnanie smerodajných odchýlok

Obr. 4.3: Porovnanie štatistických hodnôt červeného, zeleného a modrého optického kanálu biotopu Morušový luh medzi rokmi 2017-2021

Porovnanie rokov 2019 a 2020 viedlo k menším zmenám štatistických hodnôt. Medzi rokmi 2020 a 2021 pozorujeme mierny nárast stredných hodnôt modrého a červeného kanála a zmeny v smerodajných odchýlkach. Pre červený kanál došlo k nárastu o 35.07%, pre zelený kanál sme zaznamenali pokles o 17.82% a pre modrý kanál nárast o 16.38%.

Na vizualizácii satelitných snímok (Obr. 4.4) v roku 2017 vidíme po pravom okraji biotopu hnedé úseky, ktoré môžu zodpovedať nezarastenej ploche bez trávy. V roku 2018 pozorujeme viacero takýchto úsekov, čo naznačuje porušenie porastu vo vnútri biotopu. Výrub je málo pravdepodobný, lebo ten väčšinou prebieha rozsiahlejšie a na snímke z roku 2019 na týchto miestach opäť pozorujeme rôznorodú zeleň. Na snímkach z ďalších rokov vidíme postupné zlepšenie situácie a zazelenanie týchto oblastí, čo zodpovedá zníženiu strednej hodnoty červeného optického kanálu.



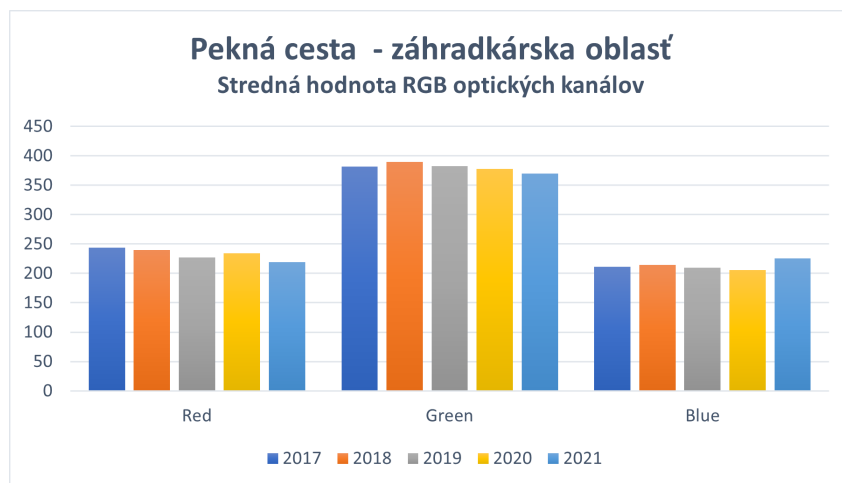
Obr. 4.4: Oblať biotopu Morušový luh medzi rokmi 2017 a 2021 v chronologickom poradí

4.3 Pekná cesta - záhradkárska oblať

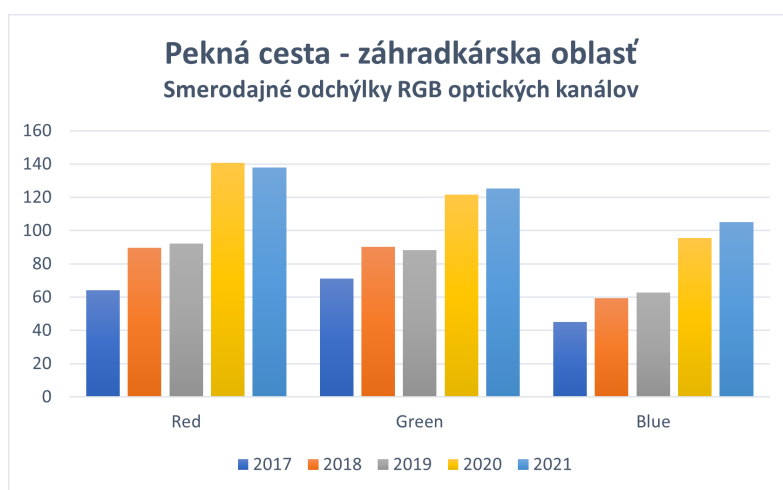
Tento biotop typu 91G0 sa nachádza pri Peknej ceste, Rača v blízkosti záhradkárskej oblasti. V priebehu monitorovaných rokov došlo k výrazným zmenám predovšetkým smerodajných odchýlok červeného, zeleného a modrého optického kanálu.

Štatistické hodnoty z roku 2018 naznačujú oproti roku 2017 výrazný nárast v smerodajných odchýlkach. Červený optický kanál zaznamenal nárast o 31,78%, zelený o 26,72% a modrý o 39,60%. V nasledujúcom roku došlo len k nevýznamným zmenám. Ďalšie značné rozdiely štatistik prinieslo porovnanie rokov 2019 a 2020, kde ešte výraznejšie narástli smerodajné odchýlky RGB optických kanálov - pre červený kanál o 51,99%, pre zelený o 37,56% a pre modrý o 52,67%. Posledný pozorovaný rok 2021 ukázal len malé a mierne zmeny. Zatiaľ čo sledujeme veľké zmeny v smerodajných odchýlkach, stredná hodnota sa v priebehu pozorovania výrazne nemenila, čo ukazujú aj grafy (Obr. 4.5).

Z vizualizácie satelitných snímok (Obr. 4.6) vidíme, že prudký nárast smerodajných odchýlok medzi rokmi 2019 a 2020 spôsobila výstavba v strednej časti tohto biotopu.

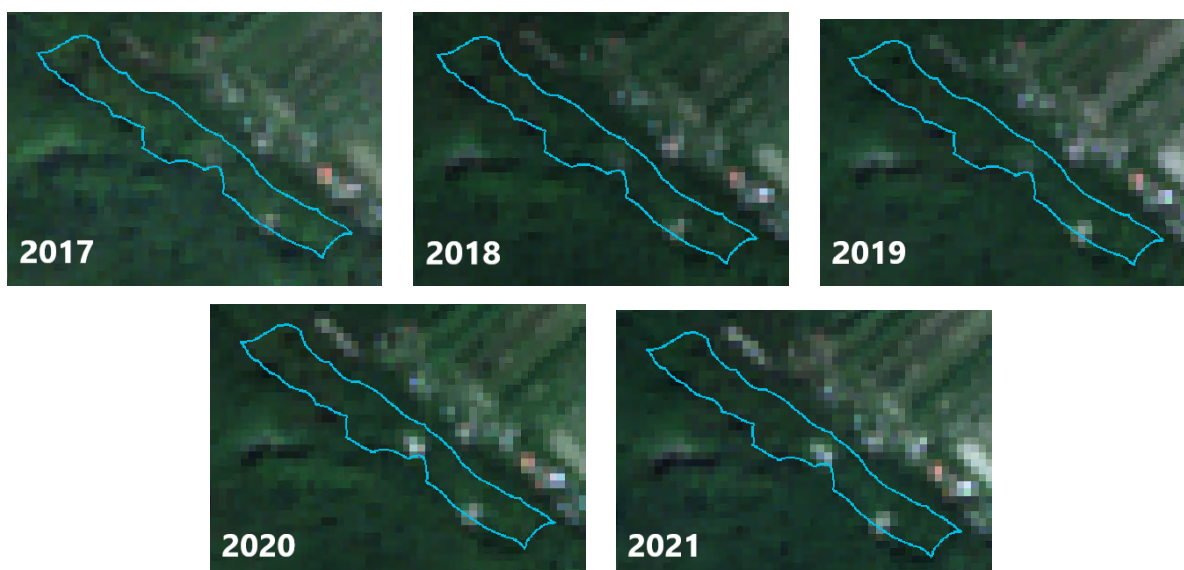


(a) Porovnanie stredných hodnôt



(b) Porovnanie smerodajných odchýlok

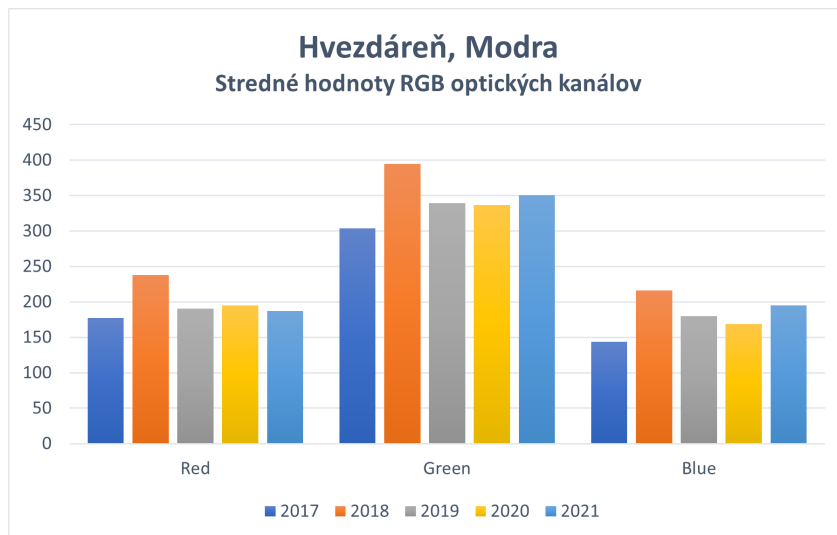
Obr. 4.5: Porovnanie štatistických hodnôt červeného, zeleného a modrého optického kanálu biotopu pri Peknej ceste medzi rokmi 2017-2021



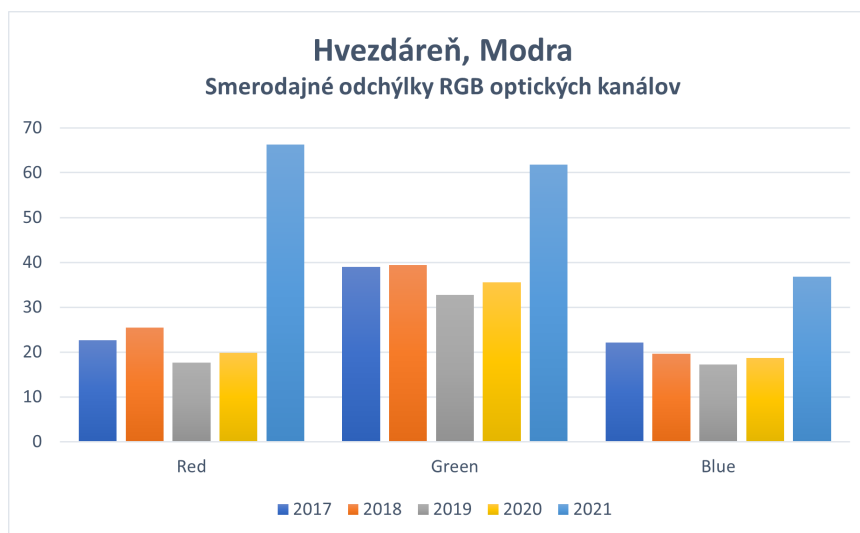
Obr. 4.6: Oblasť biotopu pri Peknej ceste medzi rokmi 2017 a 2021 v chronologickom poradí

4.4 Hvezdáreň, Modra

Tento biotop typu 9110 sa nachádza pri hvezdáрни SAV v obci Modra. Pri jeho monitorovaní došlo k viacerým výrazným zmenám, predovšetkým medzi rokmi 2020 a 2021.



(a) Porovnanie stredných hodnôt



(b) Porovnanie smerodajných odchýlok

Obr. 4.7: Porovnanie štatistických hodnôt červeného, zeleného a modrého optického kanálu biotopu Hvezdáreň v Modre medzi rokmi 2017-2021

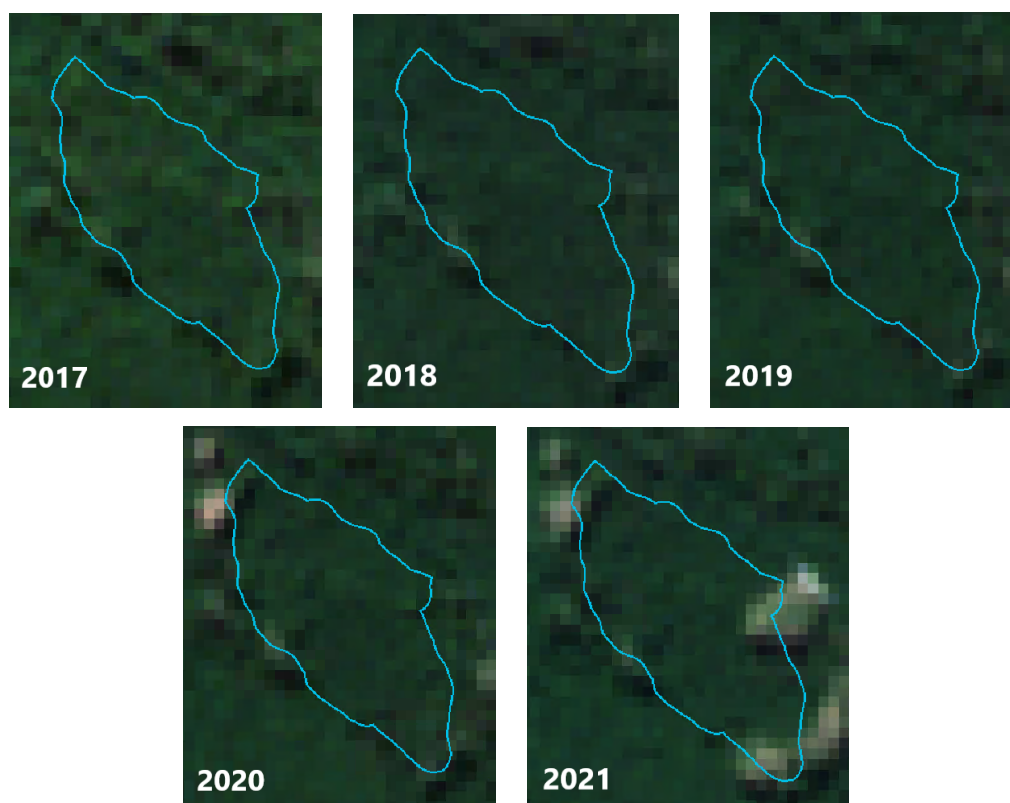
Porovnanie štatistických hodnôt v rokoch 2017 a 2018 ukázalo značný nárast stredných hodnôt. Pre červený optický kanál stúpila stredná hodnota o 33.98%, pre zelený optický kanál o 29.96% a pre modrý optický kanál až o 50.31%. Ďalej mierne stúpila smerodajná odchýlka červeného kanálu a naopak klesla pre modrý kanál. Takisto došlo aj k zvýšeniu strednej hodnoty pre kanál B9 o 17.60%, čo môže naznačovať, že v roku 2018 biotop nedokázal rovnako dobre zadržať vodu ako v roku 2017. Na druhej strane, biotop si mohol zachovať rovnakú schopnosť zadržať vodu a táto zmena strednej hodnoty mohla byť spôsobená prítomnosťou

väčšieho množstva vody v biotope, napr. kvôli intenzívnejším zrážkam v tejto oblasti.

Medzi rokmi 2018 a 2019 došlo naopak k poklesu stredných hodnôt - pre červený optický kanál o 19.94%, pre zelený o 13.99% a pre modrý o 16.90%. Rovnako klesali aj hodnoty smerodajných odchýlok. Smerodajná odchýlka pre červený kanál klesla o 30.83%, pre zelený o 17.09% a pre modrý o 12.18%. V nasledujúcom roku sme pozorovali len malé a mierne zmeny.

Veľmi výrazné zmeny sme zaznamenali medzi rokmi 2020 a 2021. Smerodajná odchýlka červeného optického kanálu stúpila až o 233.73%, zeleného optického kanálu o 73.83% a modrého optického kanálu o 96.64%. Navyše stúpila aj stredná hodnota modrého kanálu o 15.67%. V tomto porovnaní boli viditeľné veľké zmeny smerodajných odchýlok vo všetkých optických kanáloch satelitnej snímky. Na grafoch (Obr. 4.7) môžeme vidieť priebeh zmien strednej hodnoty a smerodajnej odchýlky pre RGB optické kanály.

Vizualizácia satelitných snímok (Obr. 4.8) v rokoch 2017-2021 nám umožňuje posúdiť príčiny zmien v štatistických hodnotách. Veľké zmeny, ku ktorým došlo medzi rokmi 2020 a 2021, sú priamo viditeľné na spodnom a pravom okraji biotopu. Pravdepodobne ide o výrub, možno o stavebnú činnosť. Zmeny v strednej hodnote, ku ktorým došlo medzi rokmi 2017 a 2018, však takto ľahko interpretovateľné nie sú. Môžeme pozorovať celistvé stmavnutie satelitného záberu, ktoré môžeme posúdiť ako vznik hustejšieho porastu, ale bez terénneho preskúmania je to len dohad.

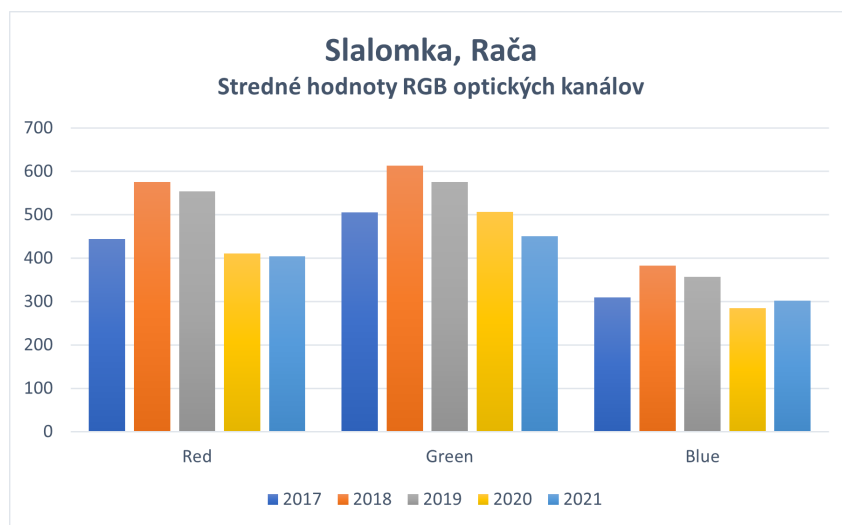


Obr. 4.8: Oblať biotopu Hvezdáreň v Modre medzi rokmi 2017 a 2021 v chronologickom poradí

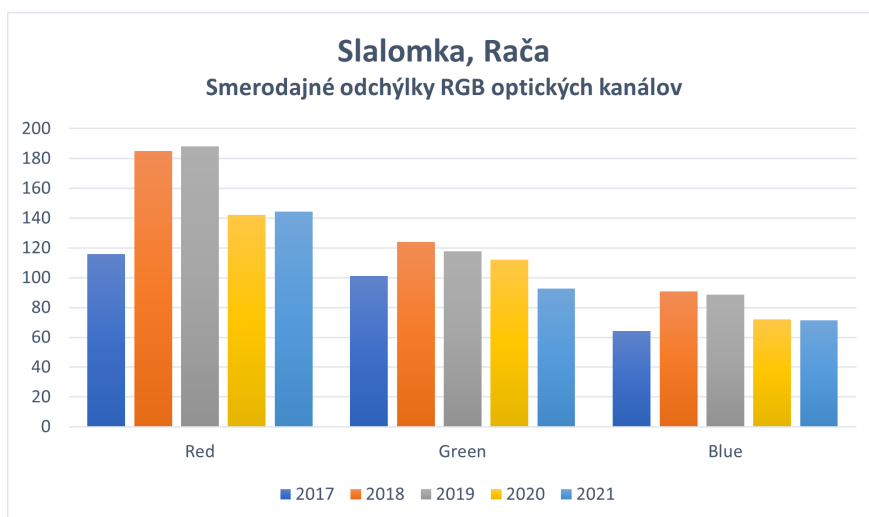
4.5 Slalomka, Rača

Tento biotop sa nachádza v oblasti Slalomka v mestskej časti Bratislava-Rača a patrí medzi biotopy typu 6510.

Monitorovaním tohto biotopu sme zaznamenali medzi rokmi 2017 a 2018 značné zmeny v stredných hodnotách aj smerodajných odchýlkach RGB kanálov. Červenému optickému kanálu vzrástla stredná hodnota o 29.70% a smerodajná odchýlka až o 59.48%. V zelenom optickom kanáli došlo k rastu strednej hodnoty o 21.38% a smerodajnej odchýlky o 22.87%. Modrému optickému kanálu stúpla stredná hodnota o 23.59% a smerodajná odchýlka o 41.12%. Pozorovali sme mierne zmeny aj vo všetkých ostatných optických kanáloch.



(a) Porovnanie stredných hodnôt



(b) Porovnanie smerodajných odchýlok

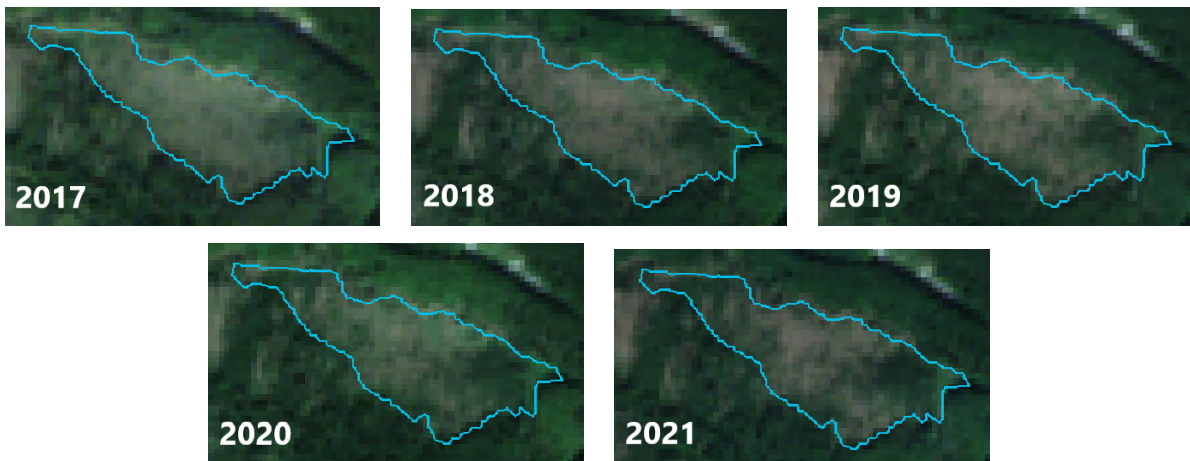
Obr. 4.9: Porovnanie štatistických hodnôt červeného, zeleného a modrého optického kanálu biotopu Slalomka v Rači medzi rokmi 2017-2021

V nasledujúcom roku nedošlo k žiadnym významným zmenám. To sa mení medzi rokmi

2019 a 2020, kedy došlo k miernym až výrazným poklesom v štatistických hodnotách. V červenom kanáli sme pozorovali klesnutie strednej hodnoty o 25.82% a smerodajnej odchýlky o 24.37%. Pre zelený kanál klesla stredná hodnota len mierne o 12.04% a pre modrý kanál klesla o 20.25%. Navyše pre modrý kanál poklesla aj smerodajná odchýlka o 18.46%.

Porovnaním rokov 2020 a 2021 sme našli mierne zmeny zeleného kanálu, ktorého stredná hodnota ďalej klesala o 10.95% a takisto aj smerodajná odchýlka o 17.43%. Ostatné zmeny boli nevýznamné. Opäť môžeme priebeh zmien pozorovať na grafoch (Obr. 4.9), na ktorých vidíme rast a pokles strednej hodnoty a smerodajnej odchýlky.

Na obrázku 4.10 vidíme zábery tohto biotopu zo satelitných snímok v chronologickom poradí. Môžeme na nich pozorovať medzi rokmi 2017 a 2018 zhnednutie, ktoré môže zodpovedať vysušeniu pôdy. V ďalších rokoch pozorujeme výrazné zarastanie tohto lúčneho biotopu, najmä medzi rokmi 2019 a 2020. Tento jav pokračuje aj v ďalšom roku.



Obr. 4.10: Oblasť biotopu Slalomka v Rači medzi rokmi 2017 a 2021 v chronologickom poradí

5 Rozšírenie priestoru vlastností pre klasifikáciu biotopov

V druhej časti práce sme sa venovali klasifikácii biotopov patriacich pod sústavu Natura 2000 v softvéri NaturaSat [10]. Klasifikácia biotopov prebieha na základe vektora štatistických hodnôt (stredná hodnota, smerodajná odchýlka, minimum, maximum) vypočítaných z jednotlivých optických kanálov satelitnej snímky. Naším cieľom bolo zlepšiť vstupné dáta pre klasifikačný algoritmus pridaním ďalších relevantných dát do priestoru vlastností, konkrétne pridaním štatistík vypočítaných z výškového modelu. V závere popisujeme normalizovaný diferenciálny vodný index, ktorý môže slúžiť na výpočet vzdialeností bodov segmentačnej krivky od riek a vodných plôch.

5.1 Klasifikácia biotopov

V softvéri NaturaSat je implementovaný algoritmus pre zaradenie biotopov na základe podstatných charakteristík dát do vhodnej skupiny biotopov. Toto triedenie je zabezpečené pomocou tzv. prirodzenej siete (angl. natural network) hlbokého učenia na báze dopredno-spätnej nelineárnej difúzie. To znamená, že tento algoritmus numericky rieši sústavu nelineárnych dopredno-spätných difúzných rovníc.

Pri klasifikácii dát používame k -rozmerný priestor črt. Tento priestor je tvorený jednotlivými štatistickými hodnotami pre všetky optické kanály satelitnej snímky. Snímky z družíc Sentinel-2 obsahujú 17 optických kanálov a pre každý počítame 4 štatistické ukazovatele, t.j. pracujeme so 68-rozmerným priestorom. Takto vysokorozmerný priestor je pre nás veľmi neintuitívny. Preto na tento priestor najprv aplikujeme analýzu hlavných komponentov (angl. principal component analysis - PCA), čím znížime dimenziu dát [7].

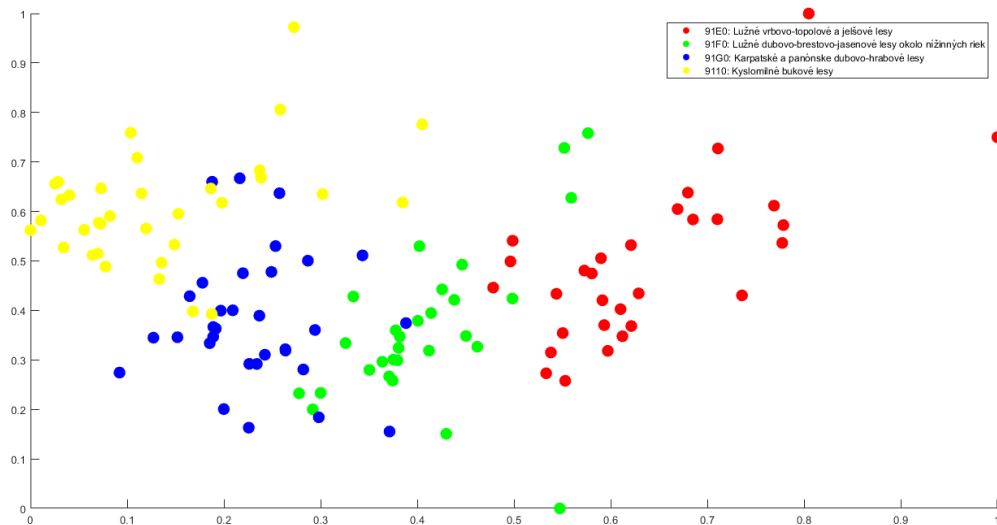
Analýza hlavných komponentov hľadá vhodné posunutie a natočenie pôvodného súradnicového systému. Nové smery súradnicového systému sú dané ako lineárna kombinácia pôvodných smerov a nazývame ich hlavnými komponentami. Prvý hlavný komponent vystihuje najväčšiu variabilitu dát, teda dáta majú v jeho smere maximálny rozptyl. Každý ďalší komponent je kolmý na osi predchádzajúcich komponentov a dáta majú v ich smere maximálny možný rozptyl. Významnosť komponentov má klesajúci charakter, preto nám

stačí pracovať len s prvými komponentami. Aplikovaním analýzy hlavných komponentov na pôvodný 68-rozmerný priestor sa zredukoval na dvojrozmerný priestor.

Na klasifikáciu dát je najprv potrebné prirodzenú sieť natrénovať. V našom prípade bolo použité kontrolované učenie, ktoré prebieha na učiacej vzorke, kde každý bod siete má vopred danú príslušnosť ku konkrétnej skupine biotopov [10].

Pri klasifikácii dát vložíme do natrénovanej prirodzenej siete nový bod, ktorého príslušnosť ku skupine biotopov nie je známa. V našom prípade chceme neznámy biotop zaradiť na základe jeho črt do jednej zo skupín, ktorá zodpovedá danému typu biotopu (91E0 - lužné vrbovo-topolové a jelšové lesy, 91F0 - lužné dubovo-brestovo-jaseňové lesy okolo nížinných riek, 91G0 - karpatské a panónske dubovo-hrabové lesy, 9110 - kyslomilné bukové lesy).

Na Obr. 5.1 vidíme, že body siete jednotlivých skupín biotopov sú blízko pri sebe, na niektorých miestach sú dokonca premiešané, a tak prirodzená sieť na báze dopredno-spätnej nelineárnej difúzie môže spôsobiť, že nezaradený biotop sa priradí do nevhodnej skupiny. Pridaním ďalších črt do priestoru črt vieme zlepšiť počiatočné pozície bodov jednotlivých skupín, a tak zabezpečiť úspešnejšie naladenie prirodzenej siete a následné priradenie nezaradeného biotopu do správnej skupiny.



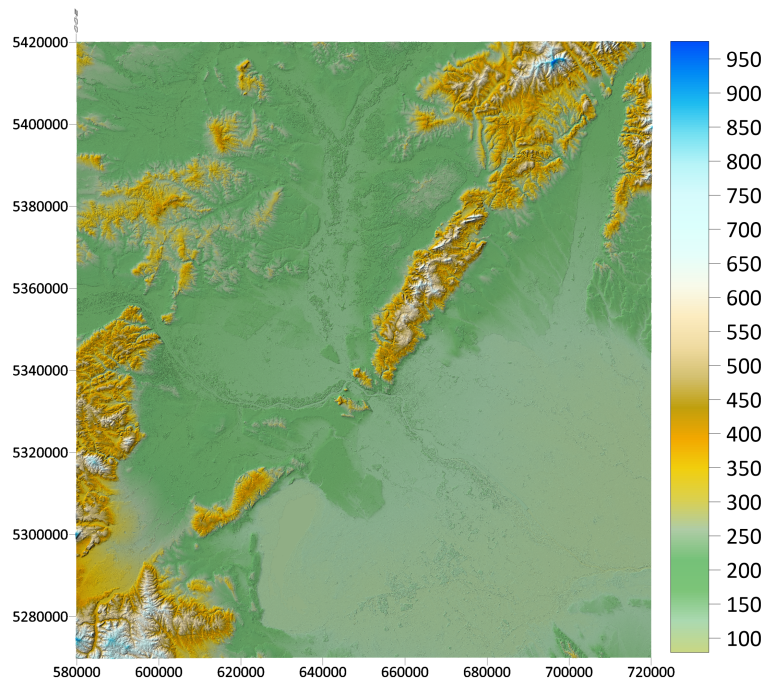
Obr. 5.1: Zobrazenie bodov siete patriacich do štyroch skupín biotopov (odlíšené farebne) v novom súradnicovom systéme získanom pomocou analýzy hlavných komponentov

5.2 Digitálny výškový model

Nadmorská výška je významný faktor pre výskyt fauny a flóry, a teda zásadne odlišuje rôzne typy biotopov. Preto bolo naším cieľom k štatistikám optických kanálov satelitnej snímky pridať navyše aj štatistiky zodpovedajúce nadmorskej výške.

Výškový model sme získali z medzinárodného projektu SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ktorý bol zastrešený vesmírnou agentúrou NASA [6]. Pracovali sme najmä s modelom pre celé Slovensko v 25-metrovom rozlíšení a s modelom zodpovedajúcim satelitnej snímke s kódom 33UXP (oblasť Západného Slovenska) v 10-metrovom rozlíšení (Obr. 5.2).

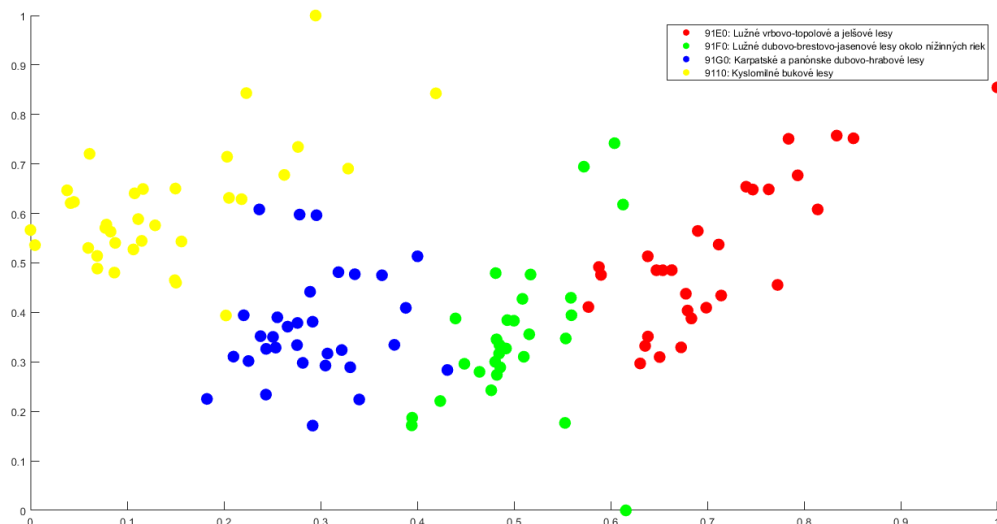
Priebeh výpočtu štatistík je rovnaký ako v prípade optických kanálov satelitnej snímky, dochádza len k menším úpravám. Najprv je potrebné načítať dáta vo vnútri obálky krivky. Keďže súradnice obálky krivky sme počítali vzhľadom na ľavý horný bod satelitnej snímky, tak pri použití nových dát by sme nenačítali správne dáta. Preto je potrebné vypočítať obálku krivky vzhľadom na ľavý horný bod výškového modelu. Načítanie dát ďalej prebieha rovnako.



Obr. 5.2: Výškový model pre oblasť Západného Slovenska

Maska krivky sa vypočíta jedným z popísaných algoritmov v kapitole 2. Jediným rozdielom je, že do algoritmu vstupujú body segmentačnej krivky prepočítane vzhľadom na ľavý horný bod výškového modelu. S takto pripravenými dátami a maskou vypočítame všetky štatistické ukazovatele.

Pridaním nadmorskej výšky do klasifikačného modelu rozšírime priestor vlastností, ktorý je tvorený štatistickými ukazovateľmi optických kanálov o štyri nové hodnoty. Pri klasifikácii budeme tentoraz pracovať so 72-rozmerným priestorom. Aplikáciou analýzy hlavných komponentov na tento priestor dostávame opäť dvojrozmerný priestor. Začiatkové pozície bodov siete v tomto priestore sú zobrazené na Obr. 5.3, na ktorom v porovnaní s predchádzajúcim obrázkom vidíme, že jednotlivé skupiny biotopov sú viac oddelené. Vďaka tomu môžeme predpokladať, že ladiaca fáza klasifikačného algoritmu by mala mať vyššiu úspešnosť a že nezaradený biotop bude ľahšie klasifikovateľný.



Obr. 5.3: Zobrazenie bodov siete patriacich do štyroch skupín biotopov (odlíšené farebne) v novom súradnicovom systéme získanom pomocou analýzy hlavných komponentov, ktorý navyše obsahuje štatistické vlastnosti z digitálneho výškového modelu

5.3 Normalizovaný diferenčný vodný index - NDWI

Vzdialenosť od vodných tokov a vodných plôch môže ovplyvňovať zloženie rastlinstva v biotopoch, preto predstavuje významný faktor pre identifikáciu typu biotopu. Z tohto dôvodu sme sa snažili nájsť spôsob ako identifikovať pixely satelitnej snímky, ktoré zodpovedajú riekam alebo vodným plochám.

Normalizovaný diferenčný vodný index (Normalized difference water index - NDWI) [9] sa používa pri diaľkovom pozorovaní na zvýraznenie obsahu vody vo vodných útvaroch a často sa porovnáva aj s indexom vlhkosti, ktorý navyše meria aj obsah vody v rastlinstve. NDWI sa počíta zo zeleného (B03) a blízkeho infračerveného optického kanálu (B08) ako:

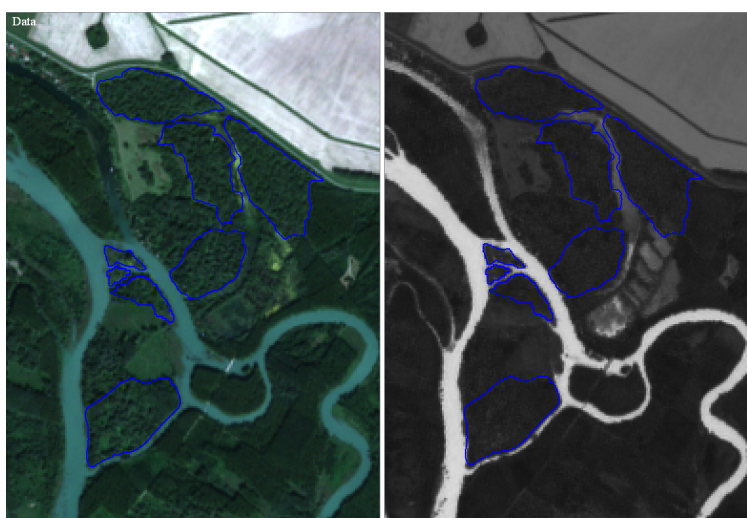
$$NDWI = \frac{B03 - B08}{B03 + B08}. \quad (5.1)$$

Výsledkom výpočtu je hodnota z intervalu $[-1,1]$, kde kladné hodnoty zodpovedajú vodným útvarom a záporné hodnoty prislúchajú pôde, vegetácii a zástavbe. Konkrétne môžeme získané hodnoty interpretovať nasledovne:

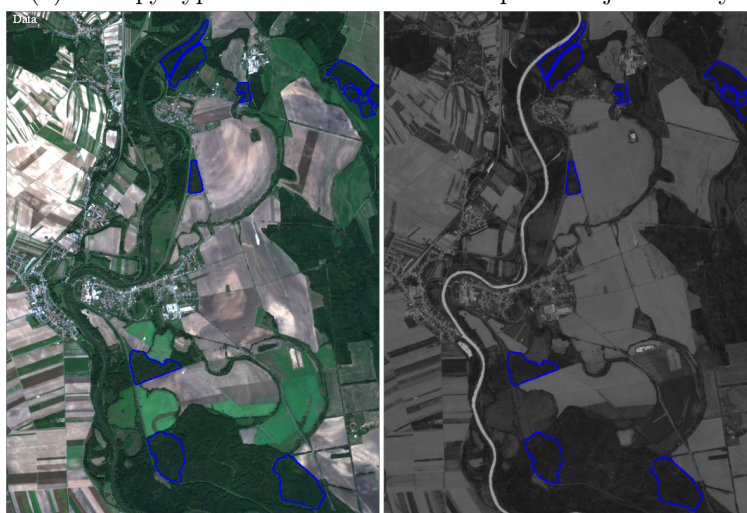
- $NDWI \in [0.2, 1]$ - vodné plochy,
- $NDWI \in [0, 0.2]$ - vlhké alebo zaplavené oblasti,
- $NDWI \in [-0.3, 0]$ - priemerne suché oblasti bez vody,
- $NDWI \in [-1, -0.3]$ - suché oblasti bez vody.

V programe sme po načítaní celých dát zodpovedajúcich optickým kanálom B03 a B08 vypočítali pre každý pixel satelitnej snímky hodnotu NDWI podľa vzťahu 5.1. Následne sme tieto hodnoty normovali do intervalu $[0,1]$ jednoduchým výpočtom $\frac{NDWI+1}{2}$. Takto vytvorené hodnoty sme vizualizovali a porovnali sme ich so satelitnou snímkou, ktorá zachytáva vybrané typy biotopov z oblasti Západného Slovenska (Obr. 5.4).

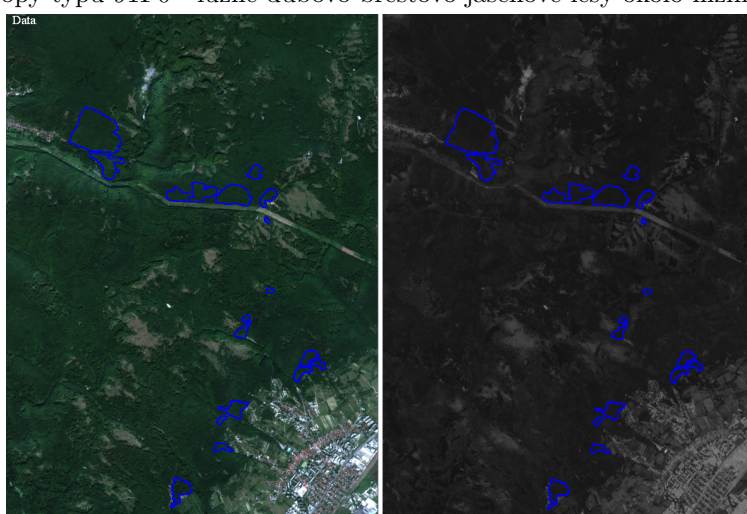
Pre presnejšie určenie bodov riek a vodných plôch budeme pracovať s upravenými NDWI hodnotami. Tieto hodnoty sme pre jasné identifikovanie vodných útvarov prahovali s prahom s hodnotou 0.5, teda v nich bude riekam a vodným plochám prislúchať hodnota 1. Podobne ako na Obr. 5.4 sme ich vizualizovali a porovnali so satelitnou snímkou pre rôzne typy biotopov (Obr. 5.5). Z týchto obrázkov vidíme, že biotopy typu 91E0 a 91F0 sa vyskytujú bližšie pri riekach, zatiaľ čo biotopy 91G0 a 9110 v svojom okolí žiadne blízke vodné útvary nemajú. Môžeme predpokladať, že pridanie informácie o vzdialenosti biotopov od vodných útvarov do priestoru vlastností by mohlo pomôcť k lepšiemu odseparovaniu jednotlivých skupín po analýze hlavných komponentov.



(a) Biotopy typu 91E0 - lužné vrbovo-topolové a jelšové lesy

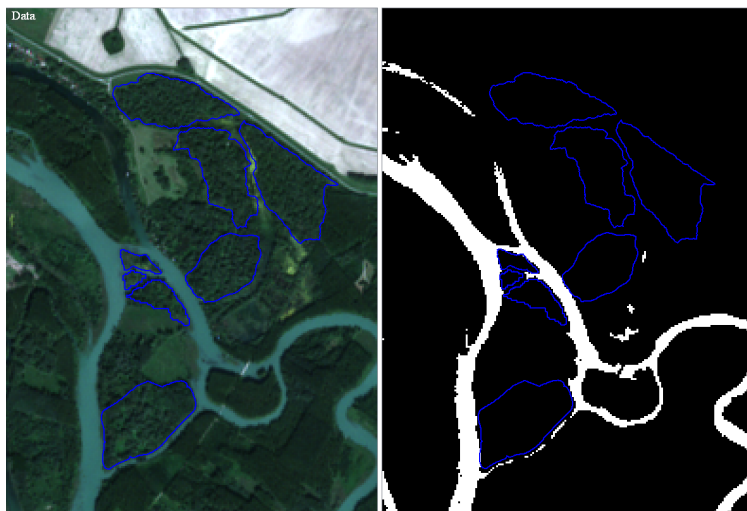


(b) Biotopy typu 91F0 - lužné dubovo-brestovo-jaseňové lesy okolo nížinných riek

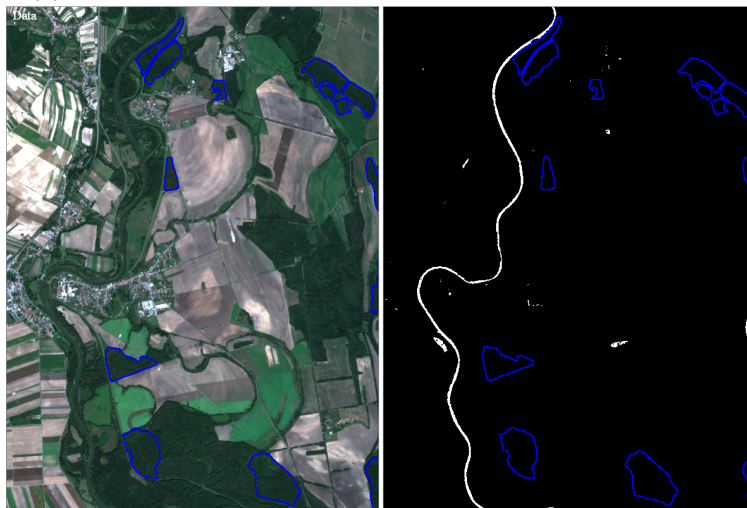


(c) Biotopy typu 91G0 - karpatské a panónske dubovo-hrabové lesy a typu 91I0 - kyslomilné bukové lesy

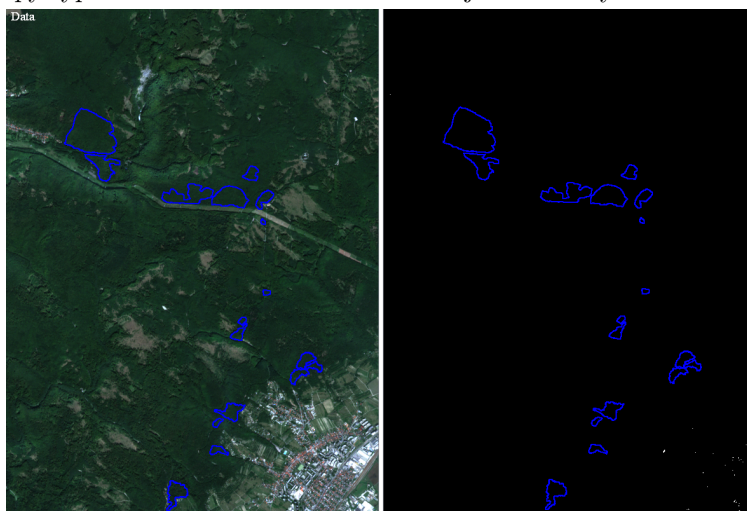
Obr. 5.4: Porovnanie satelitnej snímky (naľavo) a NDWI (napravo) pre rôzne typy biotopov



(a) Biotopy typu 91E0 - lužné vrbovo-topoľové a jelšové lesy



(b) Biotopy typu 91F0 - lužné dubovo-brestovo-jaseňové lesy okolo nížinných riek



(c) Biotopy typu 91G0 - karpatské a panónske dubovo-hrabové lesy a typu 91I0 - kyslomilné bukové lesy

Obr. 5.5: Porovnanie satelitnej snímky (naľavo) a prahovaných NDWI dát (napravo) pre rôzne typy biotopov

6 Záver

Naša bakalárska práca sa venovala využitiu satelitných snímok z družíc misie Sentinel-2 pri monitorovaní chránených biotopov. Na tento účel sme vytvorili program NaturaSatMonitoring, ktorý predstavuje doplnenie k softvéru NaturaSat. V tomto programe sme využili algoritmy pre efektívnu prácu s dátami zo satelitných snímok a vytvorili priateľské užívateľské prostredie. Pri spracovaní dát sme pracovali len s obálkou krivky, čím sme znížili pamäťové nároky, ktoré by pri práci s celou satelitnou snímokou boli veľmi vysoké. Pre vytvorenie masky krivky sme implementovali dva algoritmy - prvý pre kontrolu všetkých pixelov a druhý vo forme modifikovaného scanline algoritmu. Tieto algoritmy sme porovnali a podľa očakávania bol modifikovaný scanline algoritmus efektívnejší, a teda výhodnejší pre prácu s väčším množstvom kriviek zodpovedajúcich veľkým biotopom.

Následne sme program NaturaSatMonitoring odskúšali pri monitorovaní biotopov z oblasti Západného Slovenska. Našli sme viaceré biotopy, na ktorých sme pozorovali výrazné zmeny. Tieto zmeny sme zobrazili v podobe grafov a porovnaní záberov zo satelitných snímok. Nakoniec sme skúsili identifikovať príčiny týchto zmien.

V druhej časti práce sme sa venovali rozšíreniu priestoru vlastností pre klasifikáciu biotopov v softvéri NaturaSat. Do pôvodného priestoru sme pridali štatistiky vypočítané z digitálneho výškového modelu. Pridaním informácií o nadmorskej výške sme dostali lepšie oddelené skupiny bodov siete, z čoho sme predpokladali, že biotopy budú ľahšie klasifikovateľné. To potvrdilo aj ladenie trénovacej vzorky, kedy sa zvýšila úspešnosť ladiacej fázy a správne sa zaradilo 117 biotopov zo 125. Bez výškového modelu sa správne zaradilo len 105 biotopov. Na základe týchto výsledkov môžeme potvrdiť, že rozšírením priestoru vlastností pomocou výškového modelu sa zlepšili vlastnosti prirodzenej siete. Ďalšie rozšírenie priestoru vlastností je možné využitím vypočítaného normalizovaného diferenčného vodného indexu (NDWI). Na vizualizáciách prahovaných hodnôt NDWI spolu so satelitnou snímokou môžeme vidieť, že v blízkosti biotopov typu 91E0 a 91F0 sa vyskytujú detegované rieky a vodné plochy. Rozšírením priestoru vlastností o koeficient vzdialenosti segmentačnej krivky od týchto pixelov by malo byť možné zabezpečiť ešte lepšie pozície počiatočných bodov siete práve týchto dvoch skupín.

Na túto prácu sa dá nadviazať v ďalšom vývoji programu NaturaSatMonitoring. Tento program je možné doplniť o automatické monitorovanie, ktoré by v pravidelných intervaloch sťahovalo satelitné snímky z Copernicus Open Access Hub pre užívateľom vybranú oblasť.

Bibliografia

1. BOUKNIGHT, W.J. *An improved procedure for generation of half-tone computer graphics presentations*. 1969-09. University of Illinois, Coordinated Science Laboratory.
2. COPERNICUS. *Copernicus Open Access Hub* [<https://scihub.copernicus.eu>]. [B.r.]. Online; accessed March 2022.
3. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Natura 2000: Birds and Habitats Directives - Slovakia* [<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/natura-2000-birds-and-habitat-directives-12/slovakia>]. 2022. Online; accessed 8 April 2022.
4. GDAL/OGR CONTRIBUTORS. *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. 2022. Dostupné z DOI: [10.5281/zenodo.5884351](https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351).
5. ISPGROUP, UNIVERSITÉ DE LOUVAIN (UCL). *OpenJPEG* [<https://www.openjpeg.org>]. [B.r.]. Online; accessed April 2022.
6. JET PROPULSION LABORATORY, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Shuttle Radar Topography Mission* [<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm>]. [B.r.]. Online; accessed April 2022.
7. JOLLIFFE, I. T. *Principal Component Analysis*. 2nd. Springer-Verlag New York, 2002. ISBN 9780387954424. Dostupné z DOI: [10.1007/b98835](https://doi.org/10.1007/b98835).
8. KARNEY, C.F.F. *GeographicLib, Version 1.50* [<https://geographiclib.sourceforge.io/1.50/>]. 2019. Online; accessed March 2022.
9. MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996, roč. 17, č. 7, s. 1425–1432. Dostupné z DOI: [10.1080/01431169608948714](https://doi.org/10.1080/01431169608948714).
10. MIKULA, K.; KOLLÁR, M.; OŽVAT, A. A.; AMBROZ, M.; ČAHOJOVA, L.; JAROLÍMEK, I.; ŠIBÍK, J.; ŠIBÍKOVA, M. *Natural Numerical Networks for Natura 2000 habitats classification by satellite images*. arXiv, 2021. Dostupné z DOI: [10.48550/ARXIV.2108.04327](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2108.04327).

11. MIKULA, K.; URBÁN, J.; KOLLÁR, M.; AMBROZ, M.; JAROLÍMEK, I.; SIBIK, J.; ŠIBÍKOVÁ, M. An automated segmentation of NATURA 2000 habitats from Sentinel-2 optical data. *Discrete & Continuous Dynamical Systems - S*. 2021, roč. 14, s. 1017–1032. Dostupné z DOI: [10.3934/dcdss.2020348](https://doi.org/10.3934/dcdss.2020348).
12. MIKULA, K.; URBÁN, J.; KOLLÁR, M.; AMBROZ, M.; JAROLÍMEK, I.; SIBIK, J.; ŠIBÍKOVÁ, M. Semi-automatic segmentation of NATURA 2000 habitats in Sentinel-2 satellite images by evolving open curves. *Discrete & Continuous Dynamical Systems - S*. 2021, roč. 14, s. 1033–1046. Dostupné z DOI: [10.3934/dcdss.2020231](https://doi.org/10.3934/dcdss.2020231).
13. MIKULA, K.; ŠIBÍKOVÁ, M.; AMBROZ, M.; KOLLÁR, M.; OŽVAT, A. A.; URBÁN, J.; JAROLÍMEK, I.; ŠIBÍK, J. NaturaSat—A Software Tool for Identification, Monitoring and Evaluation of Habitats by Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*. 2021, roč. 13, č. 17. ISSN 2072-4292. Dostupné z DOI: [10.3390/rs13173381](https://doi.org/10.3390/rs13173381).
14. THE EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Sentinel-2* [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>]. [B.r.]. Online; accessed March 2022.
15. THE EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Sentinel-2 - Data Products* [<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>]. [B.r.]. Online; accessed March 2022.
16. THE EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Sentinel-2 Satellite* [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>]. [B.r.]. Online; accessed 5 April 2022.
17. ŠTÁTNA OCHRANA PRÍRODY SR. *Natura 2000 - Sústava chránených území členských krajín EÚ* [<http://www.sopsr.sk/natura>]. [B.r.]. Online; accessed March 2022.
18. ŠUBOVÁ, DANA A KOL. *Natura 2000 - Metodická príručka*. Liptovský Mikuláš: Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, 2010.