

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Cedilnik, R., 2015. Določanje temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Oštir, K., somentor Kokalj, Ž.): 45 str.

Datum arhiviranja: 02-06-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Cedilnik, R., 2015. Določanje temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Oštir, K., co-supervisor Kokalj, Ž.): 45 p.

Archiving Date: 02-06-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA**

Kandidat:

ROK CEDILNIK

**DOLOČANJE TEMPERATURE TAL IZ SATELITSKIH
POSNETKOV LANDSAT**

Magistrsko delo št.: 1/II.GIG

**DETERMINATION OF LAND SURFACE
TEMPERATURE FROM LANDSAT SATELLITE
IMAGERY**

Graduation – Master Thesis No.: 1/II.GIG

Mentor:

izr. prof. dr. Krištof Oštir

Predsednik komisije:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

dr. Žiga Kokalj

Ljubljana, 23. 4. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

STRAN Z IZJAVAMI

Podpisani Rok Cedilnik izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Določanje temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 2. 4. 2015

Rok Cedilnik

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: 502.3:528.7/.8(497.4)(043.3)
Avtor: Rok Cedilnik
Mentor: izr. prof. dr. Krištof Oštir
Somentor: dr. Žiga Kokalj
Naslov: Določanje temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat
Tip dokumenta: magistrsko delo
Obseg in oprema: 45 str., 9 preg., 24 sl., 41 en., 2 pril.
Ključne besede: temperatura tal, mestni toplotni otok, Landsat, emisivnost, srednja temperatura atmosfere, atmosferska transmisija

Izvleček

Satelitski posnetki, zajeti v termičnem infrardečem delu spektra, se danes pogosto uporabljajo pri raziskavah sprememb na svetovni ravni. Mednje se uvršča tudi pojav mestnega toplotnega otoka. Pričujoča magistrska naloga v prvem delu obravnava teoretično ozadje določitve temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat. Opisani so dejavniki, ki vplivajo na elektromagnetno valovanje v termičnem delu spektra ter metode, ki omogočajo njihovo določitev ali oceno. Podrobno so predstavljeni algoritmi za določitev temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat in njihova dosežena natančnost. Drugi del temelji na raziskavi pojava mestnega toplotnega otoka v Ljubljani. Prioritetno so bili uporabljeni posnetki satelita Landsat 8, v analizo pa smo vključili tudi posnetke satelita Landsat 5 in 7, ki so omogočili kronološki pregled temperature tal v Ljubljani. Rezultati analiz potrjujejo prisotnost mestnega toplotnega otoka in izpostavijo območja v mestu, ki se pogosto pregreva.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 502.3:528.7/.8(497.4)(043.3)
Author: Rok Cedilnik
Supervisor: Assoc. prof. Krištof Oštir, Ph. D.
Co-advisor: Žiga Kokalj, Ph. D.
Title: Determination of land surface temperature from Landsat satellite imagery
Document type: Master thesis
Scope and tools: 45 p., 9 tab., 24 fig., 41 eq., 2 ann.
Keywords: Land surface temperature, urban heat island, Landsat, emissivity, mean atmospheric temperature, atmospheric transmittance

Abstract

Satellite images acquired in the thermal infrared part of electromagnetic spectrum are often used in studies of environmental changes, including the phenomenon of an urban heat island effect. The first part of this master thesis deals with theoretical background of land surface temperature determination from Landsat satellite images. Factors that affect the electromagnetic waves in the thermal part of spectrum and methods that allow their determination or assessment are described. Algorithms and their accuracy for determination of land surface temperature from Landsat images are presented in detail. The second part describes the study of an urban heat island in Ljubljana. Data from Landsat 8 was used primarily, but we also included Landsat 5 and 7 images. This enabled a chronological overview of land surface temperature in Ljubljana. Results confirm the presence of the urban heat island and highlight the often overheated areas in the city.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju izr. prof. dr. Krištofu Oštirju, ki mi je odprt vrata v svet daljinskega zaznavanja in mi bil veskozi pripravljen nuditi strokovno pomoč. Iskrena zahvala gre tudi somentorju dr. Žigu Kokalju iz Inštituta za antropološke in prostorske vede, ki me je s koristnimi nasveti in konstruktivnimi predlogi usmerjal in mi pomagal pri nastajanju magistrske naloge.

Zahvalil bi se rad tudi Teji za vso podporo in pomoč tako pri študiju, kot tudi pri nastanku magistrske naloge. Posebej bi se rad zahvalil staršem za vso finančno in moralno podporo tekom študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
STRAN Z IZJAVAMI	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Namen magistrske naloge	2
1.2 Cilj magistrske naloge	2
1.3 Delovni hipotezi	2
2 PROGRAM LANDSAT	3
2.1 Razvoj satelita Landsat	3
3 DOLOČITEV TEMPERATURE TAL	7
3.1 Določitev emisivnosti površja	8
3.2 Določitev atmosferskih popravkov	12
3.2.1 Določitev srednje temperature atmosfere	13
3.2.2 Določitev atmosferske transmisije	15
3.3 Metode določitve temperature tal	16
3.3.1 Algoritem enega okna	17
3.3.2 Algoritem enega kanala	18
3.3.3 Algoritem deljenega okna	19
4 SATELITSKO TERMIČNO SNEMANJE LJUBLJANE	22
4.1 Uporabljeni podatki	23
4.2 Razdelitev območja in priprava podatkov	24
4.3 Analiza po conah	25
4.4 Analiza pozidanih zemljišč	26
4.5 Analiza profilov	32
4.6 Analiza spremljanja temperaturnega trenda v Ljubljani	36
4.7 Uporaba algoritma za določitev temperature tal	39
5 ZAKLJUČEK	41
5.1 Ugotovitve	41
VIRI	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Detektorji in število kanalov na satelitih Landsat.....	6
Preglednica 2: Emisivnost prsti in bujnega rastja za 10. in 11. kanal satelita Landsat 8.....	9
Preglednica 3: Razmerje med skupno vodno paro in vodno paro v posameznih plasteh atmosfere (Rw).	14
Preglednica 4: Stopnja znižanja temperature v atmosferi (Rt).....	14
Preglednica 5: Ocena atmosferske transmisije (τ).	15
Preglednica 6: Koeficienta a in b za različen razpon svetilne temperature	17
Preglednica 7: Regresijska koeficienta za različne temperaturne razpone in natančnost njune določitve.....	20
Preglednica 8: Pridobljeni in obdelani posnetki satelitov Landsat 5, 7 in 8 na območju Ljubljane. ...	23
Preglednica 9: Mestne četrtne skupnosti razporejene glede na delež pozidanih zemljišč znotraj cestnega obroča in njihove temperature.	26

KAZALO SLIK

Slika 1: Prvotna (levo) in preoblikovana (desno) zasnova sistema RBV.....	3
Slika 2: Večspektralni skener.....	4
Slika 3: Potek izračuna temperature tal iz termičnega kanala satelita Landsat.....	7
Slika 4: Vpliv atmosfere na elektromagnetno valovanje.....	12
Slika 5: Potek dela.....	22
Slika 6: Prisotnost oblakov nad Ljubljano na dan 18.6.2013 (levo) in 31.10.2013 (desno).....	23
Slika 7: Prikaz delitve Ljubljane na cone skupaj z izbranimi območji pozidanih zemljišč za primerjavo in glavnim profilom v smeri sever-jug in zahod-vzhod.....	24
Slika 8: Odstopanje med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo.....	25
Slika 9: Delež rabe tal po četrtini skupnosti znotraj cestnega obroča.....	27
Slika 10: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh pozidanih zemljišč.....	27
Slika 11: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh zemljišč v vseh treh conah.....	28
Slika 12: Območja pozidanih zemljišč, ki v toplejšem delu leta od povprečne temperature ostalih pozidanih zemljišč odstopajo za 5 °C ali več.....	29
Slika 13: Primerjava temperatur nekaterih zanimivejših območij.....	30
Slika 14: Primerjava povprečnih temperatur nekaterih zanimivejših območij v Ljubljani in izbranih bližnjih mest.....	31
Slika 15: Profili za ugotavljanje vpliva različne rabe na temperaturo tal.....	32
Slika 16: Povprečna temperatura tal v poletnem obdobju.....	33
Slika 17: Profil čez toplarno, Ljubljanico in del Štepanjskega naselja (levo). Profil čez del stanovanjske soseske v Trnovem, Ljubljanico in del stanovanjske soseske na Rudniku (desno). Zajeto na dan 20.7.2013.....	34
Slika 18: Profil čez Rožnik (zgoraj), park Zvezda (na sredini) in Argentinski park (spodaj). Zajeto na dan 20.7.2013.....	35
Slika 19: Trend odstopanja med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo.....	36
Slika 20: Odstopanje od povprečne temperature po conah v poletnem času.....	37
Slika 21: Trend odstopanj povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh pozidanih zemljišč.....	38
Slika 22: Razlika med svetilno temperaturo in temperaturo tal na dan 12.8.2001 (levo) in 8.3.2014 (desno).....	39
Slika 23: Odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal pozidanih zemljišč po mestnih četrtih ter povprečno odstopanje svetilne temperature in temperature tal med pozidanimi zemljišči na dan 12.8.2001.....	40
Slika 24: Odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal pozidanih zemljišč po mestnih četrtih ter povprečno odstopanje svetilne temperature in temperature tal med pozidanimi zemljišči na dan 8.3.2014.....	40

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: Karte odstopanj med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo

A.1: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh pozidanih zemljišč

A.2: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh zemljišč v vseh treh conah

PRILOGA B: Grafi temperatur po profilih v smeri sever-jug in zahod-vzhod

1 UVOD

Najbolj viden aspekt urbanizacije je vedno večja nadomestitev naravnega okolja z antropogenim. Zaradi visokega deleža pozidanosti prihaja v mestih do spremenjenega lokalnega podnebja, ki vpliva na tamkajšnje prebivalce. Spremenjena raba tal (asfaltne in betonske površine, stavbe iz opeke in kamna) bistveno vpliva na energijsko bilanco mesta, ker pozidane površine hitreje prevajajo toploto kakor naravna tla, kjer je toplotna prevodnost manjša zaradi prisotnosti zraka v prsti [1]. Beton ima v primerjavi z vlažnimi tlemi tudi do šestkrat večjo konduktivnost¹ in dvakrat večjo toplotno kapaciteto² [2], zato se ponoči počasi ohlaja in v toplejšem delu leta pogosto pregreva.

Človek spreminja energijsko bilanco tudi z vsakodnevno dejavnostjo (industrija, promet), ko v ozračje vnaša energijo in materijo; slednjo predvsem v obliki prašnih delcev, saj, aerosolov in drugih škodljivih snovi. S tem se znižuje delež direktnega, večja pa delež difuznega sončnega obsevanja. Omenjeni antropogeni dejavniki so vzrok za nastanek specifičnih podnebnih razmer v mestu, zaradi katerih prihaja do pojava mestnega toplotnega otoka. To je mikroklimatski pojav, ki ga je prvič opisal britanski kemik Luke Howard leta 1833 [3], zanj pa so značilne višje povprečne temperature v mestu kot v njegovi okolici.

Intenzivnost mestnega toplotnega otoka je odvisna predvsem od lege mesta, ki vpliva na tip vremena, velikosti mesta ter strukture pozidave. Visoke zgradbe in ozke ulice zmanjšujejo pretok zraka skozi mesto in ga tako podvržejo k hitrejšemu segrevanju. K temu pripomore tudi pomanjkanje zelenih površin kjer je evapotranspiracija³ večja, kar pomeni večji pretok latentne energije in s tem večje energijske izgube. To prispeva k zmanjšani akumulaciji energije čez dan in k nižjim temperaturam, zato so v poletnih dneh zelene mestne površine klimatsko ugodnejše [1]. Zaradi naraščanja deleža mestnega prebivalstva bo pojav v prihodnjih letih izrazitejši in pogostejši, kar bo vplivalo tudi na podnebne spremembe. Spremenijo se lahko lokalni zimski vzorci, poveča se število nevihtnih dni in s tem tudi stopnja padavin in naravnih katastrof.

Običajno pojav toplotnega otoka merimo z meteorološkimi opazovanji, ki so pogosto izvedena samo na eni lokaciji tako v mestu kot na podeželju. Določen je kot razlika med temperaturo zraka zajeto dva metra nad zemeljskim površjem v urbani regiji in temperaturo zraka zajeto dva metra nad zemeljskim površjem v bližnji ruralni regiji. Vendar mikroklima v mestu zaradi različne rabe tal ni povsod enaka, zato meteorološka opazovanja ne morejo zajeti celotne razsežnosti toplotnega otoka oziroma ne izražajo pravega stanja za celotno mesto.

¹ Toplotna konduktivnost pove količino toplote, ki preteče skozi enoto površine v enoti časa.

² Toplotna kapaciteta snovi pove koliko toplote mora snov sprejeti/oddati, da se segreje/ohladi za 1 K.

³ Evapotranspiracija je prehajanje vode v obliki vodne pare z zemeljske površine in skozi listne reže rastlin v ozračje.

Z razvojem umetnih zemeljskih satelitov se je uveljavila tehnologija daljinskega zaznavanja, ki omogoča široko pokritost in redno spremljanje zemeljskega površja. Glede na vir elektromagnetnega valovanja ločimo aktivne in pasivne detektorje. Pasivni detektorji lahko zaznavajo in zapisujejo lastno termično sevanje različnih predmetov na Zemlji, ki ga lahko ob uporabi sevalne prenosne enačbe⁴ pretvorimo v temperaturo tal. Temperatura tal je zaradi povezanosti z rabo tal izrazito prostorsko variabilna, kar je v nasprotju s temperaturo zraka, ki se prostorsko mnogo manj spreminja. Temperatura tal tako podaja ključne informacije o energijski bilanci površja in danes predstavlja osnovni podatek za spremljanje pojava mestnega toplotnega otoka iz satelitskih posnetkov.

1.1 Namen magistrske naloge

Natančna določitev temperature tal iz satelitskih posnetkov je kljub številnim raziskavam vse prej kot enostavna naloga. V času zajema je prisotnih veliko fizikalnih dejavnikov, ki jih moramo razumeti in pri izračunu tudi upoštevati. Namen magistrske naloge je podrobno predstaviti postopek in metode določitve temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat ter tako postaviti izhodišče za morebitne nadaljne raziskave.

1.2 Cilj magistrske naloge

Za Ljubljansko urbano regijo je značilna monocentrična prostorska struktura, v kateri je Ljubljana prevladujoče zaposlitveno središče. Velja za najbolj razvito in gospodarsko najmočnejše mesto v Sloveniji, zato se poraja vprašanje kakšne so temperaturne anomalije od povprečij v mestu in okolici in ali je vpliv toplotnega otoka mogoče zaznati tudi pri nas. Cilj magistrske naloge je bil poiskati primerne posnetke za vse štiri letne čase na območju Ljubljane, določiti temperaturo tal in izvesti številne analize, ki bi potrdile ali ovrgle pojav mestnega toplotnega otoka. Raziskali smo kako dejanska raba tal vpliva na spremembo temperature in stopili nekaj let nazaj ter ugotavljali, ali se temperatura tal v Ljubljani stopnjuje, miruje ali morda pada.

1.3 Delovni hipotezi

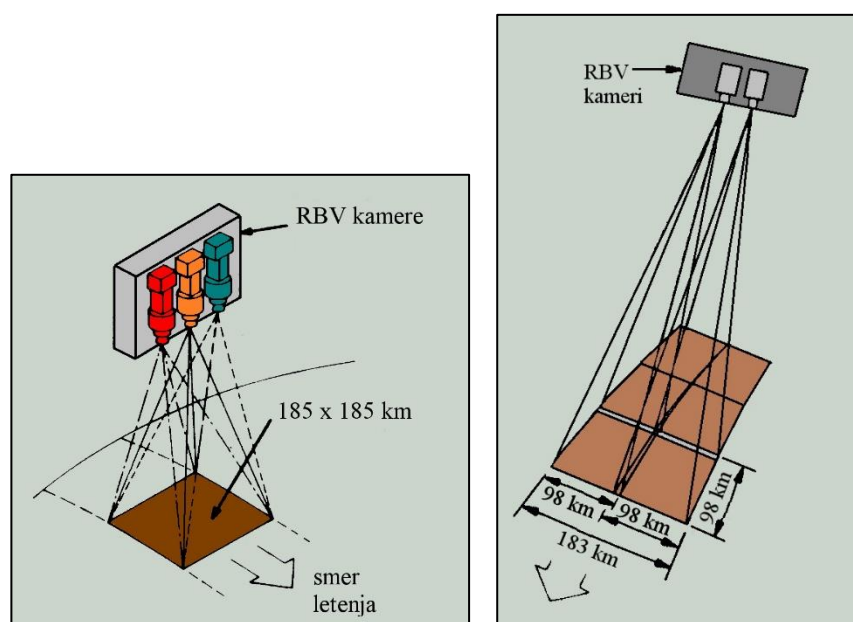
Pojav mestnega otoka in njegovo jakost v Ljubljani lahko izmerimo s satelitskimi posnetki Landsat. Mestni toplotni otok Ljubljane se krepi.

⁴ Sevalna prenosna enačba matematično opisuje prenos energije v obliki elektromagnetnega sevanja.

2 PROGRAM LANDSAT

2.1 Razvoj satelita Landsat

Zametki programa Landsat so nastali že v času prvega odhoda človeka na Luno. 23. julija 1972 je ameriška agencija NASA⁵ izstrelila prvega v seriji satelitov Landsat, sprva znanega pod imenom ERTS⁶, čigar namen je bil izključno preučevanje in opazovanje našega planeta. Informacije o Zemljinem površju sta zagotavljala primarni detektor RBV⁷ in sekundarni MSS⁸. Prvotna konfiguracija detektorja RBV (slika 1) je vsebovala tri kamere, usmerjene na isto območje, ki so izvajale sočasen zajem v treh različnih spektralnih kanalih (preglednica 1) [4]. Zajem visoko ločljivih fotografij je temeljil na uporabi Braunove elektronike oziroma bolj poznane katodne cevi, ki je vsebovala prevodno in na svetlobo občutljivo ploščo ter elektronski top, ki je iz nje razbral sliko. Zajeti podatki so bili prvotno analogni, nato digitalizirani ter radiometrično in geometrično popravljani [5]. Sistem RBV je bil leta 1978 z izstrelitvijo satelita Landsat 3 preoblikovan v dve neodvisni kameri, ki sta druga ob drugi za enako spektralno območje omogočali bodisi posamezne posnetke bodisi neprekinjeno snemanje [4].



Slika 1: Prvotna (levo) in preoblikovana (desno) zasnova sistema RBV [6].

MSS je sprva veljal za sekundarni in pretežno eksperimentalni vir pridobivanja informacij o Zemljinem površju, vendar so že prvi podatki pokazali njegovo izjemno uporabnost. Uvrščamo ga med prečne skenerje, saj uporablja nihajoče zrcalo, ki premika detektor iz ene strani na drugo ter tako

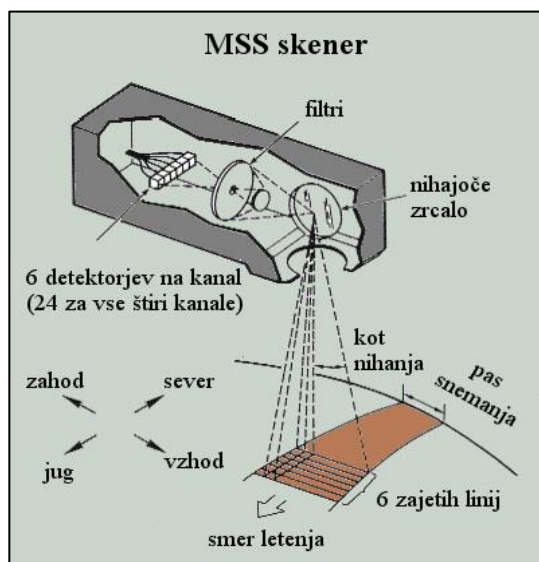
⁵ angl. National Aeronautics and Space Administration.

⁶ angl. Earth Resources Technology Satellite.

⁷ angl. Return Beam Vidicon.

⁸ angl. Multispectral Scanner.

v serijah izvaja prečni zajem pravokotno na smer gibanja platforme (slika 2). Svetloba, ki pade na detektor prečka optično lečo, s čimer se razdeli na štiri pasovno prepustne filtre, ki proizvedejo sliko v določenem spektralnem kanalu [4]. Po prehodu skozi posamezen filter elektromagnetno valovanje nazadnje doseže set šestih elektronskih detektorjev, ki zaznajo in izmerijo energijo, jo pretvorijo v električni signal in nato v digitalni zapis [7]. Vrednosti so glede na jakost impulza pri prvih treh kanalih podane v razponu med 0 in 128 (7-bitni zapis), pri četrtem kanalu pa med 0 in 64 (6-bitni zapis). Vidno polje in višina platforme določata ločljivost slikovnega elementa (piksela), ki jo premore detektor in s tem tudi prostorsko ločljivost posnetka. Slednja za prve tri satelite Landsat znaša 79 m vendar je zaradi prekrivanja prečnih snemalnih linij velikost piksela enaka 57 m x 79 m. Pas snemanja je pogojen z zasukom zrcala, ki znaša 11,56 °, kar na višini 917 km (Landsat 1-3) omogoča pokritost Zemljinega površja v širini 185 km [8].



Slika 2: Večspektralni skener [6].

Številne spremembe so prišle v veljavo leta 1982 z izstrelitvijo četrtega satelita Landsat. Zajem se je po novem izvajal 705 km nad morsk gladino, tako se je čas ponovnega obiska iz 18 dni skrajšal na 16 dni. Detektor RBV je bil opuščen, vpeljan pa je bil novi detektor TM⁹ s sedmimi spektralnimi kanali (preglednica 1). Slednji se prav tako uvršča med prečne skenerje z nihajočim zrcalom. Zaradi snemanja v obeh smereh je čas opazovanja istega območja daljši, kar posledično vpliva na boljše radiometrične lastnosti podob. Prostorska ločljivost kanalov je 30 m z izjemo šestega (termičnega) kanala, ki je nekoliko slabša; znaša 120 m. Izboljšana 8-bitna radiometrična ločljivost zapisuje vrednosti kanalov v razponu med 0 in 255, s čimer je omogočena podrobnejša določitev razlik v intenziteti odbite ali sevane energije [7]. Zaradi povečanega števila detektorjev se v netermičnem delu spektra istočasno izvaja šestnajst vrstični zajem, medtem ko se v termičnem delu spektra izvaja zajem v štirih vrsticah [8].

⁹ angl. Thematic Mapper.

Detektor TM, nameščen na satelitu Landsat 4 in 5, naj bi leta 1993 nadomestil detektor ETM¹⁰ na krovu satelita Landsat 6. Vendar je poškodba posode z raketnim gorivom preprečila delovanje pogonskih motorjev, zaradi česar je bilo utirjenje satelita neuspešno [4].

Naslednik izjemno uspešnega detektorja TM je prišel v veljavo leta 1999 z izstrelitvijo satelita Landsat 7. Zasnova, delovanje in spektralna porazdelitev detektorja ETM+¹¹ je ostala enaka kot pri njegovem predhodniku, dodan pa je bil še pankromatski kanal z ločljivostjo 15 m. Izboljšan je bil tudi kalibracijski sistem in prostorska ločljivost termičnega kanala, ki je znašala 60 m. Po štirih letih delovanja je prišlo do okvare korektorja snemalnih vrstic, kar se je na posnetku izražalo v skoraj četrtinski izgubi podatkov. Zaradi posledic nihanja snemalnega zrcala in gibanja platforme so namreč proti robu snemalnega pasu podatki v vedno večji meri podvojeni. Kljub okvari pa ostaja ETM+ aktiven še danes, saj so zajeti podatki predvsem na sredini posnetka še vedno uporabni.

11. februarja 2013 je bil izstreljen in utirjen na višino 705 km trenutno najnovejši satelit Landsat 8. Opremljen je z detektorjema OLI¹² in TIRS¹³, ki skupaj snemata v enajstih spektralnih kanalih (preglednica 1). Ti so nekoliko ožji kot pri prejšnjih serijah, kar omogoča lažjo primerjavo spektralnih podpisov in s tem boljšo ločevanje predmetov. Detektor OLI ohranja enako prostorsko ločljivost in razporeditev spektralnih kanalov kot detektor ETM+, dodana pa sta še temno modri kanal, ki je primeren za obalne in aerosolne študije ter kratkovalovni infrardeči kanal za detekcijo cirusov¹⁴. Detektor TIRS je opremljen z dvema spektralnima kanaloma, ki zaznavata termično infrardečo elektromagnetno valovanje v prostorski ločljivosti 100 m. Ti podatki so prevzorčeni na ločljivost 30 m, da se ujemajo z ločljivostjo večspektralnih kanalov detektorja OLI. Oba detektorja zagotavljata podatke v 12-bitni radiometrični ločljivosti, kar omogoča natančnejše študije.

¹⁰ angl. Enhanced Thematic Mapper.

¹¹ angl. Enhanced Thematic Mapper Plus.

¹² angl. Operational Land Imager.

¹³ angl. Thermal Infrared Sensor.

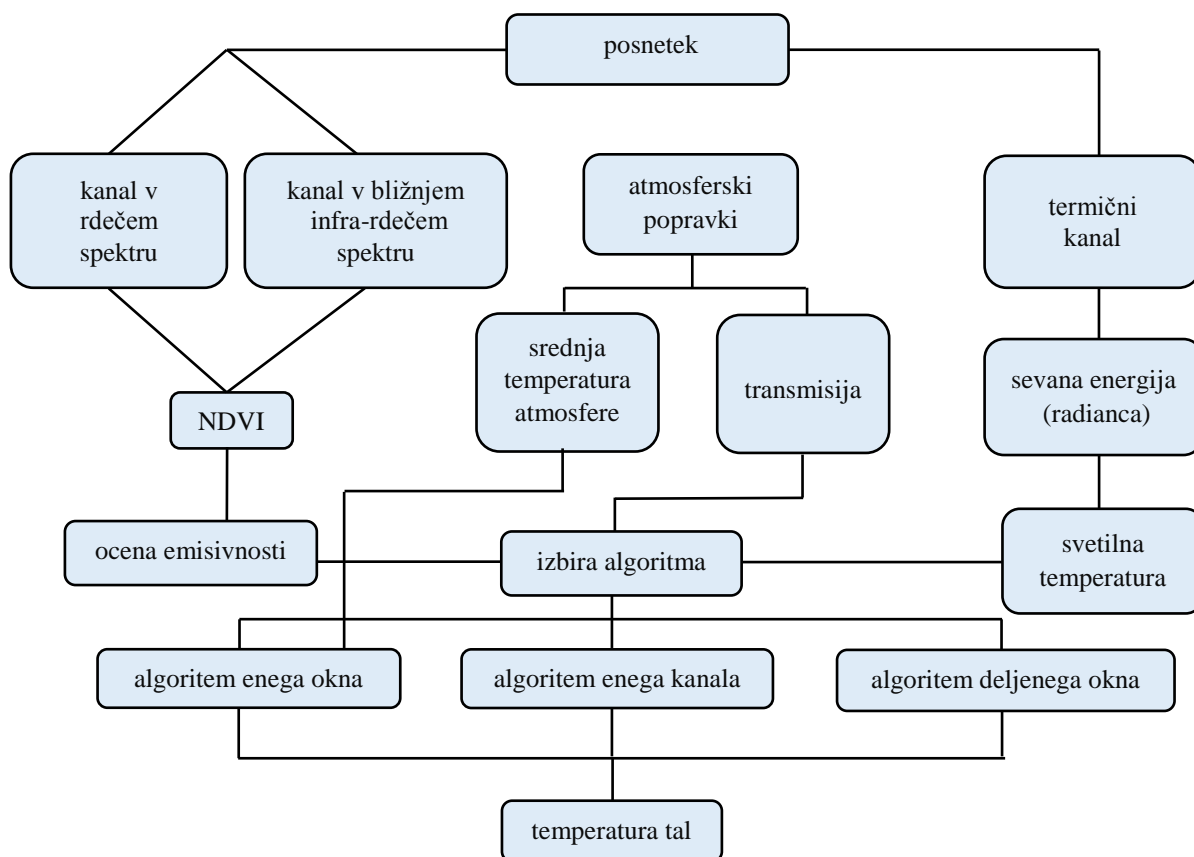
¹⁴ angl. Cirusi so visoki, tanki oblaki sestojeci iz ledenih kristalčkov.

Preglednica 1: Detektorji in število kanalov na satelitih Landsat

detektor	Landsat					valovna dolžina (μm)	ločljivost (m)	spektralni pas
	1-2	3	4-5	7	8			
RBV	1	1*				0,48-0,57 (*0,505-0,75)	80 (*40)	modra-zelena (*rumena-bližnja IR)
	2				0,58-0,68	80	oranžna-rdeča	
	3				0,70-0,83	80	rdeča-bližnja IR	
MSS	4	4	1			0,50-0,60	56x79	zelena
	5	5	2			0,60-0,70	56x79	rdeča
	6	6	3			0,70-0,80	56x79	bližnja IR
	7	7	4			0,80-1,10	56x79	bližnja IR
			8			10,4-12,6	240	termična IR
TM/ETM+			1	1		0,45-0,52	30	modra
			2	2		0,52-0,60	30	zelena
			3	3		0,63-0,69	30	rdeča
			4	4		0,76-0,90	30	bližnja IR
			5	5		1,55-1,75	30	kratkovalovna IR
			6	6*		10,4-12,5	120 (*60)	termična IR
			7	7		2,08-2,35	30	kratkovalovna IR
			8		0,50-0,90	15	pankromatsko	
OLI					1	0,43-0,45	30	temno modra
					2	0,45-0,51	30	modra
					3	0,53-0,59	30	zelena
					4	0,64-0,67	30	rdeča
					5	0,85-0,88	30	bližnja IR
					6	1,57-1,65	30	kratkovalovna IR
					7	2,11-2,29	30	kratkovalovna IR
					8	0,50-0,68	15	pankromatsko
					9	1,36-1,38	30	cirus
TIRS					10	10,60-11,19	100	termična IR
					11	11,50-12,51	100	termična IR

3 DOLOČITEV TEMPERATURE TAL

Poznamo številne metode, ki omogočajo določitev temperature tal iz termičnih satelitskih posnetkov, vendar se v literaturi, kjer so uporabljeni podatki satelita Landsat, srečamo le s peščico teh metod. Razlog je predvsem v tem, da so vsi sateliti Landsat, razen zadnjega, snemali termične podatke zgolj z enim dolgovalovnim infrardečim kanalom (TM, ETM+), ki ni omogočal neposrednih atmosferskih popravkov. Detektor TIRS, ki je nameščen na zadnjem satelitu, meri oziroma zaznava sevano energijo (radianco) zemeljskega površja, na katero vpliva ozračje. Pridobljena radianca z vrha atmosfere (TOA¹⁵) zato označuje mešani signal oziroma skupek različnih delov energije, ki se z uporabo Planckove¹⁶ enačbe lahko pretvori v svetilno temperaturo, v literaturi poznano tudi kot temperaturo črnega telesa [9]. Črno telo je zgolj teoretični koncept, ki predpostavlja, da je emisivnost površja enaka ena. Vendar v primeru naravnega površja temu ni tako, saj je emisivnost površja vedno večja od nič (popolni odboj) in manjša od ena (popolni oddajnik). Razlika med svetilno temperaturo in temperaturo tal se zato v spektralnem območju 10,5-12,5 μm lahko razlikuje od 1 do 5 $^{\circ}\text{C}$, odvisno od atmosferskih pogojev in vpliva emisivnosti površja [10]. Če želimo pridobiti natančne podatke o temperaturi tal, je zato treba poznati emisivnost površja in izvesti atmosferske popravke.



Slika 3: Potek izračuna temperature tal iz termičnega kanala satelita Landsat.

¹⁵ angl. Top of Atmosphere

¹⁶ Max Planck-nemški fizik

3.1 Določitev emisivnosti površja

Emisivnost (ε) je definirana kot brezrazsežna količina, ki podaja razmerje med radianco, ki jo odda naravno telo pri določeni temperaturi, valovni dolžini in kotu ter radianco, ki jo odda črno telo pri enakih pogojih [11]. Vsa telesa s temperaturo večjo od absolutne ničle oddajajo toplotno energijo. Črno telo lahko opredelimo kot popolni oddajnik ($\varepsilon = 1$), saj odda vso sprejeto energijo, medtem ko naravno telo ($\varepsilon < 1$) z enako temperaturo vedno odda manj energije [12]. Tako lahko ugotovimo intenziteto oddane toplotne energije naravnih materialov, ki je predvsem odvisna od sestave in strukture tal, organskih snovi, vsebovanega deleža vlage in lastnosti rastja [13]. Vendar je njena pridobitev iz zaznanih termičnih vrednosti vse prej kot preprosta, saj temperature in emisivnosti površja ni mogoče zajeti ločeno. Število neznank je vedno večje od števila meritev, kajti, če imamo detektor z N spektralnimi kanali, imamo potemtakem N enačb (eno za vsak kanal) in $N + 1$ neznank (N emisivnosti in temperaturo površja). Sistem enačb je torej nedoločen, zato moramo uporabiti nekatere predpostavke [14]. Tako pravzaprav ne moremo govoriti o določitvi emisivnosti površja, temveč le o njeni oceni. Poznamo številne metode, ki omogočajo oceno emisivnosti, vendar so le redke primerne za termične podatke pridobljene s satelitom Landsat. Večina jih je bila namreč razvitih za detektorje, ki so opremljeni z več termičnimi kanali. Obsežen nabor in podrobno razlago metod podajajo Li et al. [11], v nadaljevanju pa bomo opisali le metode, ki so primerne za satelitski sistem Landsat.

Normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI) je eden izmed številnih najbolj pogosto uporabljenih vegetacijskih indeksov, ki se uporabljajo za opazovanje stanja rastja. Vidno svetlobo v spektru od 0,4-0,7 μm močno absorbira klorofil, ki ga vsebujejo zelene rastline [15]. Bolj zdrava je rastlina, večja je prisotnost klorofila v listih, kar posledično pomeni večjo absorpcijo vidne (predvsem rdeče in modre) svetlobe. Nasprotno pa notranja zgradba zelenih listov močno odbija bližnjo infrardečo svetlobo v spektru od 0,7-1,1 μm , saj se s tem rastlina zavaruje pred poškodbami, ki bi nastale zaradi pregrevanja [15]. Ker je emisivnost površja poleg drugih dejavnikov odvisna tudi od karakteristik rastja, so bili razviti številni pristopi za ocenjevanje emisivnosti na podlagi vrednosti pridobljenih iz NDVI. V primeru podatkov detektorjev TM ali ETM+ satelitov Landsat, se NDVI izračuna kot:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (1)$$

kjer sta:

ρ_3 ... odbojnost merjena v rdečem delu spektra,

ρ_4 ... odbojnost merjena v bližnjem infrardečem delu spektra.

Za pridobitev odbojnosti posameznih kanalov iz meritev, uporabimo enačbo, ki jo predlaga priručnik Landsat 7 [16]:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (2)$$

kjer so:

L_{λ} ... spektralna radianca posameznega kanala,

d ... razdalja Zemlja - Sonce v astronomskih enotah,

$ESUN_{\lambda}$... srednje sončno eksoatmosfersko sevanje,

θ_s ... zenitni kot Sonca v stopinjah.

Razviti so bili številni pristopi za določitev ocene emisivnosti površja iz vrednosti NDVI. Van de Griend in Owe [17] sta na podlagi trimesečnih terenskih meritev različnih tipov prsti in rastja podala domnevo, da ima razmerje med emisivnostjo in NDVI značilnost naravnega logaritma. Slednjo sta podala tudi v matematični obliki, vendar so nadaljnje raziskave pokazale, da splošna povezava kot sta jo opisala Van de Griend in Owe ne obstaja, saj je vsako območje specifično tako glede strukture in porazdelitve rastja, kot odbojnih vrednosti rastja in prsti, merjenih na terenu [14]. Metodo zato redko uporabljajo, saj je dokaj posplošena in ne upošteva dejavnikov kot sta geometrična porazdelitev površja in delež rastja.

Zelo pogosto omenjena, pravzaprav trenutno edina primerna metoda za ocenjevanje emisivnosti površja iz satelitskih posnetkov Landsat se imenuje NDVI^{THM}¹⁷. Leta 2000 sta jo opisala Sobrino in Raissouni [18]. Razvita je bila za detektor AVHRR¹⁸, ki se nahaja na satelitih NOAA. Metoda NDVI^{THM} na osnovi mejnih vrednosti omogoča pikselno razlikovanje med prstjo in bujnim rastjem. Meja se za obravnavano območje lahko razbere iz histograma ali pa se privzame splošno vrednost 0,2 za prst in 0,5 za bujno rastje [19]. Piksli, ki presegajo vrednost 0,5 imajo emisivnost enako 0,990, medtem ko za piksele z vrednostjo manjšo od 0,2 ta znaša 0,960 [14]. V primeru satelita Landsat 8 se emisivnost za prst in bujno rastje nekoliko razlikuje v posameznem termičnem kanalu (preglednica 2).

Preglednica 2: Emisivnost prsti in bujnega rastja za 10. in 11. kanal satelita Landsat 8. [20]

kanal	prst	bujno rastje
10	0,9668	0,9863
11	0,9747	0,9896

¹⁷ angl. Normalised Difference Vegetation Index Thresholds Method.

¹⁸ angl. Advanced Very High Resolution Radiometer.

Mešani piksli oziroma piksli, ki vsebujejo tako prst kot rastje pa se določijo po naslednji enačbi:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{v_{\lambda}} \cdot P_v + \varepsilon_{s_{\lambda}} \cdot (1 - P_v) + C_{\lambda} \quad (3)$$

kjer so:

- $\varepsilon_v, \varepsilon_s$... emisivnost bujnega rastja in emisivnost prsti,
- P_v ... delež rastja,
- C_{λ} ... vpliv razgibanosti terena.

V primeru ravnega in homogenega terena (puščava, morje) lahko vpliv razgibanosti zanemarimo. Kadar pa je teren razgiban in heterogen (sem spadajo tudi kmetijska zemljišča), lahko vpliv končne rezultate pokvari tudi do 2 %. Z uporabo geometričnega modela, ki so ga predlagali avtorji v [21], se vpliv razgibanosti terena za mešano območje lahko določi po enačbi (4):

$$C_{\lambda} = (1 - \varepsilon_{s_{\lambda}}) \cdot \varepsilon_{v_{\lambda}} \cdot F' \cdot (1 - P_v) \quad (4)$$

kjer je F' oblikovni faktor odvisen od geometričnih parametrov, kot sta višina poljščin ali nasadov in razmik med njimi. Vrednost oblikovnega faktorja se giblje med 0 in 1, ker pa se ga iz termičnih posnetkov ne da neposredno določiti, je v praksi najpogosteje izbrana kar srednja vrednost ($F' = 0,55$). Delež rastja (P_v) se lahko oceni iz povezave z vrednostjo NDVI:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (5)$$

Metodo NDVI^{THM} lahko za boljše razumevanje in preglednost numerično povzamemo kot [19]:

$$\varepsilon_{\lambda} = \begin{cases} a_{\lambda} + b_{\lambda} \cdot \rho_3 & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{v_{\lambda}} \cdot P_v + \varepsilon_{s_{\lambda}} \cdot (1 - P_v) + C_{\lambda} & NDVI_s < NDVI < NDVI_v \\ \varepsilon_{v_{\lambda}} + C_{\lambda} & NDVI > NDVI_v \end{cases} \quad (6)$$

Vidimo lahko, da se razmerje med emisivnostjo in odbojnostjo v rdečem kanalu domneva kot linearno, kjer sta koeficienta a in b statistično določena na osnovi spektralnih lastnosti prsti. Glavna slabost metode NDVI^{THM} je, da vpliva razgibanosti terena ne moremo določiti za vrednosti $NDVI = NDVI_s$ in $NDVI = NDVI_v$. Omenjeni težavi lahko rešimo s posplošitvijo metode [19]:

$$\varepsilon_{\lambda} = \begin{cases} \varepsilon_{s_{\lambda}} & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{s_{\lambda}} + (\varepsilon_{v_{\lambda}} - \varepsilon_{s_{\lambda}})P_v & NDVI_s \leq NDVI \leq NDVI_v \\ \varepsilon_{v_{\lambda}} & NDVI > NDVI_v \end{cases} \quad (7)$$

Predpostavimo lahko, da je za vrednosti $NDVI = NDVI_s$ delež rasti enak nič ($P_v = 0$) in za vrednosti $NDVI = NDVI_v$ enak ena ($P_v = 1$). Za nizko ločljive detektorje s kanali v spektralnem območju 10,5-12,5 μm so razlike emisivnosti prsti majhne, zato lahko izberemo srednjo vrednost ($\epsilon_s = 0,960$) kot jo predlagata Valor in Caselles [14]. Območja v celoti porasla z rastjem niso problematična, saj imajo podobno lastnost kot črno telo. Prav tako je spekter za različne vrste rasti skoraj konstanten, zato lahko za tovrstna območja izberemo vrednost 0,990.

Zaradi preproste zasnove je metoda $NDVI^{THM}$ uspešno uporabljena pri številnih detektorjih kot so AVHRR, DAIS¹⁹, MODIS²⁰, TM, AATSR²¹ idr. Za uspešno delovanje je potreben samo bližnji infrardeči kanal, ki zaradi večje prostorske ločljivosti v primerjavi s termičnim kanalom omogoča natančnejšo določitev emisivnosti. Metoda omogoča dobro določitev deleža vegetacije (P_v) brez natančnih atmosferskih popravkov, potrebno pa je omeniti, da tako prvotna kot poenostavljena metoda $NDVI^{THM}$ ni primerna za ocenjevanje emisivnosti vode, snega in skalnatih zemljišč [19].

Kako kakovostna je metoda pove podatek o njeni natančnosti, ki se določi s terenskimi meritvami. Primerjava ni preprosta, saj prihaja do nesorazmerij v merilu. Terenske meritve se izvajajo na območju manjšem od 1 m^2 , medtem ko detektor TIR na satelitu zajema območje z ločljivostjo 3600 m^2 (Landsat 7) oziroma 10.000 m^2 (Landsat 8) [10]. Primerjava terenskih (točkovnih) in satelitskih (območnih) meritev je tako smiselna in uporabna samo kadar imamo homogeno testno polje v smislu temperature in emisivnosti, hkrati pa mora biti to polje večje od ločljivosti piksla. V praksi se za testno polje najpogosteje uporablja popolnoma gola območja (puščava) ali območja v celoti porasla z rastjem (razne poljščine) [22].

Sobrin et al. [19] so v svojem delu primerjali posplošeno metodo $NDVI^{THM}$ s terenskimi meritvami in ugotovili, da je koren povprečne kvadratne napake pod 0,5 % za območja v celoti porasla z rastjem in pod 1,5 % za območja kjer prevladuje samo prst. S svojimi ugotovitvami so dokazali, da je metoda primerna za ocenjevanje emisivnosti iz satelitskih posnetkov.

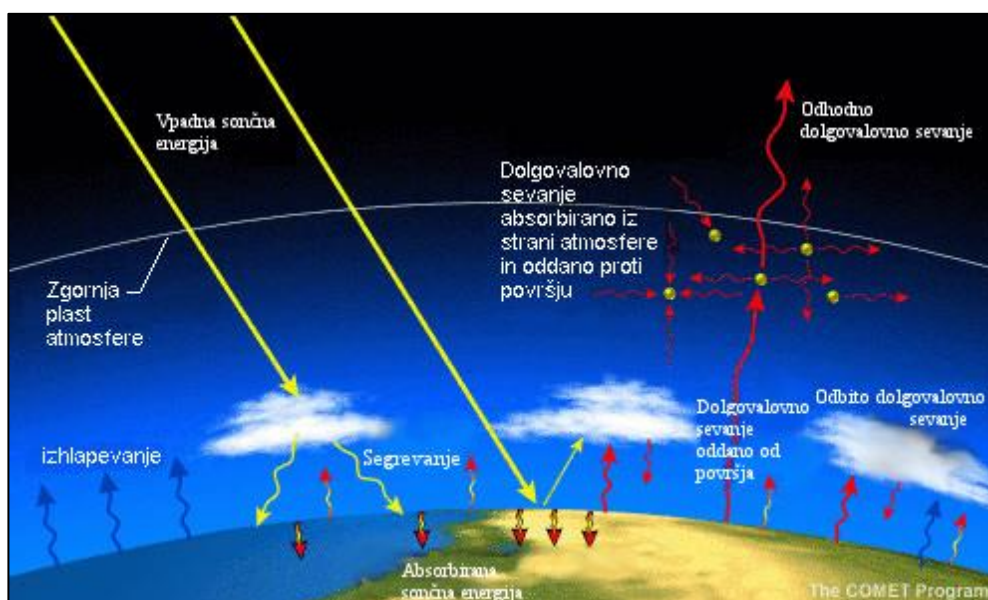
¹⁹ angl. Digital Airborne Imaging Spectrometer.

²⁰ angl. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

²¹ angl. Advanced Along-Track Scanning Radiometer

3.2 Določitev atmosferskih popravkov

Omenili smo že, da na satelitu zaznana radianca zaradi prehoda skozi atmosfero vsebuje napake. Nanjo v največji meri vplivata absorpcija, ki zmanjša intenziteto valovanja in atmosferska transmisija, ki se navezuje na zmožnost atmosfere, da oddaja elektromagnetno energijo. Transmisija je odvisna od zračne mase skozi katero potujejo žarki, prav tako pa je odvisna od deleža vodne pare in prahu v zraku. Njena vrednost je spremenljiva za sevanje v različnem delu spektra elektromagnetnega valovanja. Manjša kot sta atmosferska absorpcija in sipanje svetlobe, večja je atmosferska transmisija [23]. Atmosferski plini kot so ogljikov dioksid (CO_2), dušik (N_2) in ozon (O_3), so v ozračju dobro premešani in čeprav vplivajo na elektromagnetno valovanje, je njihov vpliv konstanten in zelo majhen ter zato zanemarljiv [24]. Tega ne moremo trditi za vodno paro, ki se v spodnjih plasteh ozračja zelo spreminja, poleg tega pa se dolgovalovno infrardečo sevanje v atmosferskem oknu 10,5-12,5 μm tudi močno absorbira [7]. Zato lahko termične lastnosti površja pridobivamo samo ob jasnem vremenu, saj v oblačnem vremenu ne pridobimo zanesljivih rezultatov. Značilna sestava atmosfere omogoča oddajanje sprejete radiance nazaj v vesolje, kot tudi proti Zemlji. Radianco oddano nazaj v vesolje bomo poimenovali odhodno dolgovalovno sevanje (»up-welling radiance«), radianco oddano od ozračja proti Zemlji pa odbito dolgovalovno sevanje (»down-welling radiance«). Za določitev atmosferskega vpliva v času snemanja satelita moramo poznati veliko atmosferskih parametrov, kot so emisivnost površja, odhodno in odbito dolgovalovno sevanje, transmisijo ter srednjo temperaturo atmosfere.



Slika 4: Vpliv atmosfere na elektromagnetno valovanje. Prirejeno po [25].

3.2.1 Določitev srednje temperature atmosfere

Za določitev srednje temperature atmosfere (T_a) so potrebne meritve temperature ozračja in vodne pare v različnih plasteh atmosfere. Ker so tovrstne meritve običajno nedostopne, uporabljamo enega od atmosferskih simulacijskih modelov kot so MODTRAN, LOWTRAN ali 6S²². Gre za komercialne računalniške programe, ki simulirajo pogoje v atmosferi do višine 100 km. Omogočajo simulacijo več standardnih atmosfer, ki vsebujejo številne standardno porazdeljene atmosferske veličine (temperatura, pritisk, vodna para, ogljikov dioksid, ogljikov monoksid itd.). Izbira primerne atmosfere je odvisna od lokacije za katero želimo pridobiti informacije, saj se atmosferske veličine med posameznimi profili zelo razlikujejo. Kadar računamo srednjo vrednost temperature v atmosferi nas zanima predvsem delež vodne pare, ki se nahaja v posameznih plasteh. Za njegovo določitev moramo poznati vrednost skupne vodne pare v atmosferi in njeno razmerje v primerjavi z vodno paro, ki jo določi simulator (preglednica 3) [26]. Skupna vodna para je definirana kot višina vode v navideznem stolpcu, ki poteka skozi celotno atmosfero, če bi vsa vlaga znotraj njega kondenzirala. Podaja se jo lahko v enotah kg/m^2 oz. mm ali g/cm^2 oz. cm . Delež vodne pare za posamezno plast je tako dan z izrazom:

$$w(h) = w \cdot R_w(h) \quad (8)$$

v primeru, ko ne poznamo vrednosti za skupno vodno paro, lahko le-to poenostavljeno zapišemo:

$$w = \frac{w(0)}{R_w(0)} \quad (9)$$

kjer so:

- w ... skupna vodna para v atmosferi,
- $R_w(h)$... razmerje med skupno vodno paro in vodno paro v posameznih plasteh atmosfere,
- $w(0)$... vodna para približno 2 m nad tlemi.

Srednjo temperaturo atmosfere lahko sedaj zapišemo kot:

$$T_a = \frac{1}{w} \cdot \sum_{h=0}^m T_h \cdot w(h) \quad (10)$$

kjer so:

- w ... skupna vodna para v atmosferi,
- $w(h)$... delež vodne pare na višini h ,
- m ... število upoštevanih atmosferskih plasti,
- T_h ... temperatura v posamezni plasti (višini) atmosfere.

²² angl. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum.

Preglednica 3: Razmerje med skupno vodno paro in vodno paro v posameznih plasteh atmosfere (R_w). [26]

<i>višina (km)</i>	<i>USA 1976</i>	<i>Tropsko</i>	<i>Srednja zemljepisna širina - poletje</i>	<i>Srednja zemljepisna širina - zima</i>
0	0,402058	0,425043	0,438446	0,400124
1	0,256234	0,261032	0,262100	0,254210
2	0,158323	0,168400	0,148943	0,161873
3	0,087495	0,075999	0,074471	0,095528
4	0,047497	0,031878	0,038364	0,046510
5	0,024512	0,019381	0,017925	0,023711
6	0,012846	0,009771	0,009736	0,011514
7	0,006250	0,004782	0,005223	0,004092
8	0,003132	0,002257	0,002611	0,001471
9	0,001049	0,000954	0,001315	0,000587
10	0,000358	0,000349	0,000616	0,000238
11	0,000142	0,000104	0,000185	0,000060
12	0,000055	0,000032	0,000044	0,000026
13	0,000023	0,000008	0,000009	0,000016
14	0,000009	0,000004	0,000004	0,000011
15	0,000006	0,000002	0,000002	0,000008

Temperaturo v posamezni plasti atmosfere določimo s podatki, ki jih zagotovi simulator. Na podlagi temperature zraka pridobljene iz lokalne meteorološke postaje in stopnjo pojanja temperature v atmosferi (preglednica 4), lahko tvorimo izraz:

$$T_h = T_0 - R_t(h) \cdot (T_0 - 217,15) \quad (11)$$

kjer sta:

T_0 ... temperatura zraka približno 2 m nad tlemi (K),

$R_t(h)$... standardna stopnja pojanja temperature v atmosferi.

Preglednica 4: Stopnja znižanja temperature v atmosferi (R_t). [26]

<i>višina (km)</i>	<i>USA 1976</i>	<i>Tropsko</i>	<i>Srednja zemljepisna širina - poletje</i>	<i>Srednja zemljepisna širina - zima</i>
0	0	0	0	0
1	0,0912921	0,0725514	0,0582902	0,0634058
2	0,1825843	0,1451028	0,1165803	0,1268116
3	0,2738764	0,1934704	0,1943005	0,1902174
4	0,3651685	0,2744861	0,2720207	0,2989130
5	0,4564607	0,3555018	0,3497409	0,4076087
6	0,5477528	0,4365175	0,4274611	0,5163043
7	0,6390449	0,5163241	0,5116580	0,6250000
8	0,7303371	0,5973398	0,5958549	0,7336957
9	0,8216292	0,6783555	0,6800518	0,8423913
10	0,9115169	0,7581620	0,7629534	0,9510870
11	1,0028090	0,8415961	0,8471503	0,9601449
12	1,0042135	0,9201935	0,9313472	0,9692029
13	1,0042135	1	1,0155440	0,9782609
14	1,0042135	1,0810157	1,0168394	0,9873188
15	1,0042135	1,1608222	1,0168394	0,9963768

Treba je poudariti, da so količine v 3. in 4. preglednici določene pod predpostavko, da je nebo jasno in da v atmosferi ni velikih vertikalnih turbulenc. Turbulenca namreč močno vpliva na porazdelitev deleža vodne pare in temperature v posamezni plasti atmosfere, kar posledično omogoča zgolj pristransko oceno srednje temperature atmosfere [26].

Omenjena predpostavka torej pogojuje, da so v atmosferi količine standardno porazdeljene, kar pomeni, da je vpliv vodne pare in temperature v posamezni plasti atmosfere konstanten. Qin et al. [26] so na podlagi tega razvili linearno funkcijo določitve srednje temperature atmosfere, ki je za štiri standardne atmosfere dana kot:

$$\text{USA 1976} \quad T_a = 25,9396 + 0,88045 \cdot T_0 \quad (12a)$$

$$\text{Tropsko} \quad T_a = 17,9769 + 0,91715 \cdot T_0 \quad (12b)$$

$$\text{Srednja zemljepisna širina - poletje} \quad T_a = 16,0110 + 0,92621 \cdot T_0 \quad (12c)$$

$$\text{Srednja zemljepisna širina - zima} \quad T_a = 19,2704 + 0,91118 \cdot T_0 \quad (12d)$$

3.2.2 Določitev atmosferske transmisije

Podobno kot pri srednji temperaturi atmosfere tudi na določitev atmosferske transmisije zelo močno vpliva delež vodne pare. Razmerje med deležem vodne pare in atmosfersko transmisijo je v praksi najpogosteje določeno z enim od že omenjenih simulacijskih modelov. Kadar ti programi niso na voljo, lahko alternativno uporabimo spletno aplikacijo, ki omogoča določitev atmosferskih popravkov izključno za satelitski sistem Landsat. Aplikacija deluje na osnovi programa MODTRAN. Je enostavna za uporabo in ne zahteva podatkov o atmosferi v času preleta, temveč le osnovne količine, ki jih je mogoče najti v metapodatkih za posamezen posnetek. Popravke je mogoče določiti le za dva atmosferska profila (Srednja zemljepisna širina-poletje in zima), kar predstavlja glavno omejitev aplikacije. Atmosfersko transmisijo lahko v času, ko se temperatura zraka nad tlemi giblje med 18 °C in 35 °C za razpon vodne pare od 0,4 g/cm² do 3,0 g/cm² določimo tudi s pomočjo linearne enačbe, ki so jo razvili Qin et al. [26]. Podana je v preglednici 5.

Preglednica 5: Ocena atmosferske transmisije (τ). [26]

<i>profil</i>	<i>delež vodne pare (w) (g/cm²)</i>	<i>ocena atmosferske transmisije</i>	<i>determinacijski koeficient (R²)</i>	<i>standardni odklon</i>
<i>visoka temperatura zraka</i>	0,4-1,6	$\tau_6 = 0,974290 - 0,08007 \cdot w$	0,99611	0,002368
	1,6-3,0	$\tau_6 = 1,031412 - 0,11536 \cdot w$	0,99827	0,002539
<i>nizka temperatura zraka</i>	0,4-1,6	$\tau_6 = 0,982007 - 0,09611 \cdot w$	0,99463	0,003340
	1,6-3,0	$\tau_6 = 1,053710 - 0,14142 \cdot w$	0,99899	0,002375

3.3 Metode določitve temperature tal

Detektor beleži intenziteto fotonov iz točno določenega območja elektromagnetnega valovanja. Na podlagi jakosti prejetega impulza oziroma števila fotonov se za vsak spektralni kanal določi numerične vrednosti v razponu od 0 do 255 (Landsat 5 in 7) oziroma od 0 do 4095 (Landsat 8) [27]. Tak zapis ni primeren za nadaljnjo obdelavo, saj so vrednosti zelo slikovno značilne, kar pomeni, da so odvisne od kota pod katerim detektor zajema podatke, lokacije sonca, vremenskih razmer itd. [28]. Podatke zato pretvorimo v vrednosti sevane energije oziroma radiance (L_λ), pri čemer uporabimo transformacijske faktorje. Izraz za pretvorbo avtorji [16] podajajo kot:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{max_\lambda} - L_{min_\lambda}}{Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}}} \right) \cdot (Q_{cal} - Q_{cal_{min}}) + L_{min_\lambda} \quad (13)$$

kjer so:

L_{max_λ} ... maksimalna spektralna radianca,

L_{min_λ} ... minimalna spektralna radianca,

$Q_{cal_{max}}$... maksimalna kalibrirana vrednost piksla,

$Q_{cal_{min}}$... minimalna kalibrirana vrednost piksla,

Q_{cal} ... določena in kalibrirana standardna vrednost piksla.

Dobljeno radianco nato uporabimo za izračun svetilne temperature (T_6) oziroma temperature, ki jo zazna detektor na satelitu. Z obrnjeno Planckovo enačbo in predpostavko, da je emisivnost površja enaka 1, je pretvorba radiance v svetilno temperaturo dana z izrazom:

$$T_6 = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (14)$$

kjer so:

K_1 in K_2 ... termični kalibracijski konstanti,

L_λ ... radianca v termičnem kanalu ($W / (m^2 \cdot srad \cdot \mu m)$).

Svetilna temperatura ni enaka dejanski temperaturi tal, je le prvi indikator temperaturnega stanja površja. Da se približamo pravim temperaturnim vrednostim, moramo uporabiti enega od razpoložljivih algoritmov, ki upoštevajo vpliv atmosfere in emisivnost površja. Izbira algoritma je predvsem odvisna od števila termičnih kanalov, ki jih ima satelit in količine atmosferskih podatkov, ki so na voljo v času preleta.

3.3.1 Algoritem enega okna

Algoritem enega okna (*angl. Mono-window algorithm*), ki omogoča določitev temperature tal na podlagi enega termičnega kanala, so leta 2001 predstavili Qin et al. [26]. Metoda izvira iz enačbe za prenos sevane energije oziroma radiance in opisuje vplive katerim je ta podvržena, ko potuje skozi atmosfero. Za uspešno rešitev enačbe je potrebno poznati emisivnost, transmisijo in srednjo temperaturo atmosfere, katere postopke določitve smo že spoznali. Enačba za določitev temperature tal je tako dana z izrazom:

$$T_s = \frac{\{a \cdot (1 - C - D) + [b \cdot (1 - C - D) + C + D] \cdot T_6 - D \cdot T_a\}}{C} \quad (15a)$$

$$C = \varepsilon_6 \cdot \tau_6 \quad (15b)$$

$$D = (1 - \tau_6) \cdot [1 + (1 - \varepsilon_6) \cdot \tau_6] \quad (15c)$$

kjer so:

T_6 ... svetilna temperatura,

T_a ... srednja temperatura atmosfere,

ε_6 ... emisivnost,

τ_6 ... transmisija,

a in b ... koeficienta za izbran razpon svetilne temperature (preglednica 6).

Preglednica 6: Koeficienta a in b za različen razpon svetilne temperature. [26]

razpon (°C)	a	b	relativna napaka (%)	determinacijski koeficient (R^2)	T -test
0-30	-60,3263	0,43436	0,0833	0,9998	186,7
10-40	-63,1885	0,44411	0,0973	0,9997	151,6
20-50	-67,9542	0,45987	0,1225	0,9995	117,5
30-60	-71,9992	0,47271	0,0621	0,9999	223,9

Algoritem enega okna za določitev temperature tal potrebuje tri težko določljive parametre. Qin et al. [26] so izvedli analizo občutljivosti s katero so ugotovili, da je natančnost določitve temperature tal odvisna predvsem od kakovostne določitve transmisije in srednje temperature atmosfere. Za nadaljnjo ovrednotenje algoritma so bile izbrane štiri temperature tal (20 °C, 30 °C, 40 °C in 50 °C) z ustreznimi temperaturami zraka (18 °C, 23 °C, 30 °C in 38 °C) in šest atmosferskih profilov (USA 1976, Tropsko (15° N), Subtropsko (30° N) poletje in zima ter Srednja zemljepisna širina (45° N) poletje in zima). Za vsako temperaturo tal in atmosferski profil so uporabili pet različnih deležev skupne vodne pare (1 g/cm², 2 g/cm², 2,5 g/cm², 3 g/cm² in 3,5 g/cm²). Ker se za večino naravnih površin vrednost emisivnosti giblje med 0,95 in 0,98, so za namen simulacije izbrali vrednost $\varepsilon_6 = 0,965$. Omenjene vrednosti so uporabili v programu LOWTRAN 7 s katerim so simulirali transmisijo in termično radianco na višini satelita. Slednjo so uporabili za izračun svetilne temperature, ki je kot vhodni

podatek v algoritmu enega okna služila za izračun temperature tal. Primerjava med izbrano in izračunano temperaturo tal je v večini primerov pokazala diferenco manjšo od 0,4 °C, s čimer so potrdili uporabnost algoritma.

3.3.2 Algoritem enega kanala

Algoritem enega kanala (*angl. Single-channel algorithm*) je prav tako namenjen določitvi temperature tal na podlagi enega termičnega kanala. Razvili so ga Jiménez-Muñoz et al. [29]. Algoritem temelji na oceni t.i. atmosferskih funkcij, za katere se predvideva, da so odvisne od deleža vodne pare. Za določitev temperature tal je tako potreben zgolj podatek o deležu vodne pare, kar predstavlja glavno prednost algoritma, ki je dan z izrazom:

$$T_s = \gamma \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 \cdot L_s + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (16)$$

kjer sta:

ε ... emisivnost površja,

L_s ... spektralna radianca.

Parametra γ in δ ter atmosferske funkcije (ψ_1, ψ_2, ψ_3) so dani kot:

$$\gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma \cdot L_s}; \quad \delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma}; \quad b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda} \quad (17a); (17b); (17c)$$

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \quad \psi_2 = -L_\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau}; \quad \psi_3 = L_\downarrow \quad (18a); (18b); (18c)$$

kjer so:

T_{sen} ... svetilna temperatura,

c_2 ... Planckova sevalna konstanta,

λ ... efektivna valovna dolžina,

τ ... atmosferska transmisija,

L^\uparrow ... odhodno dolgovalovno sevanje,

L_\downarrow ... odbito dolgovalovno sevanje.

Transmisijo ter odhodno in odbito dolgovalovno sevanje je mogoče določiti s simulacijskim modelom ali s pristopom, kot ga omenjajo avtorji v besedilu.

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

kjer sta:

c_{ij} ... simulirani koeficienti,

w ... delež vodne pare.

Enačba (19) je uporabna predvsem kadar atmosferski simulacijski modeli niso dostopni, imamo pa podatek o deležu vodne pare. Koeficienti c_{ij} so simulirani na podlagi obsežne baze terensko pridobljenih atmosferskih podatkov, ki so za Landsat satelite serije 4, 5 in 7 v termičnem kanalu sistematično urejeni in dostopni v literaturi [29].

Metoda zahteva natančne vrednosti atmosferskih parametrov, kot so transmisija ter odhodno in odbito dolgovalovno sevanje. Ker to ni vedno mogoče, so ti parametri nadomeščeni z bolj dostopnim parametrom kot je delež vodne pare. Minimalne informacije o atmosferi predstavljajo tako glavno prednost kot tudi glavno hibo algoritma. Metoda namreč ne zagotavlja sprejemljivih rezultatov pri visoki vrednosti vodne pare ($w > 3 \text{ g/cm}^2$) prav tako pa se težave pojavljajo, ko le-ta doseže nizko raven ($w < 0,5 \text{ g/cm}^2$). Pri določitvi temperature tal lahko v razponu vodne pare od 0,5 do 2 g/cm^2 pričakujemo napako 1 do 2 °C.

3.3.3 Algoritem deljenega okna

Nedavna izstrelitev satelita Landsat 8 zagotavlja kontinuiteto visoko ločljivih podatkov v infrardečem delu spektra. Dva dolgovalovna infrardeča kanala omogočata uporabo algoritma deljenega okna (*angl. Split-window algorithm*), ki so ga za satelitski sistem Landsat 8 prvič priredili Rozenstein et al. [24]. Algoritem deljenega okna temelji na predpostavki, da obstaja linearna povezava med radianco in zaznano temperaturo. Čeprav sta si termična kanala spektralno zelo blizu, zaznavata drugačno transmisijo in emisivnost, s čimer je mogoča določitev temperature tal brez natančnih podatkov o zračnem tlaku ali temperaturi atmosfere [30]. Za uporabo algoritma je tako potreben le podatek o deležu vodne pare in emisivnosti površja. Planckov zakon povezuje temperaturo in spektralno radianco, ki jo oddaja črno telo pri določeni valovni dolžini, ter je dan z izrazom:

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (20)$$

kjer so:

- c_1 in c_2 ... Planckovi sevalni konstanti,
- λ ... valovna dolžina,
- T ... svetilna temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

Če želimo razviti algoritem deljenega okna, moramo Planckovo sevalno funkcijo linearizirati, s čimer omogočimo direktno povezavo med radianco in temperaturo. Izraz je definiran kot:

$$L_i = \frac{B_i(T)}{[\partial B_i(T)/\partial T]} \quad (21)$$

kar lahko splošno zapišemo kot:

$$L_i \approx \frac{B_i(T)}{[B_i(T + \Delta T) - B_i(T)]/\Delta T} \quad (22)$$

kjer so:

- $B_i(T)$... radianca, ki jo zazna detektor,
- T ... svetilna temperatura [$^{\circ}\text{C}$],
- ΔT ... razlika v svetilni temperaturi med kanaloma.

Za določitev razmerja med temperaturo in parametrom L_i je bila uporabljena linearna regresija, katere parametri so za različne temperaturne razpone prikazani v preglednici 7.

Preglednica 7: Regresijska koeficienta za različne temperaturne razpone in natančnost njune določitve. [24]

razpon ($^{\circ}\text{C}$)	a_{10}	b_{10}	R_{10}^2	standardna napaka	a_{11}	b_{11}	R_{11}^2	standardna napaka
0-30	-59,1391	0,4213	0,9991	0,0424	-63,3921	0,4565	0,9991	0,0438
0-40	-60,9196	0,4276	0,9985	0,0746	-65,2240	0,4629	0,9985	0,0769
10-40	-62,8065	0,4338	0,9992	0,0415	-67,1728	0,4694	0,9992	0,0427
10-50	-64,6081	0,4399	0,9986	0,0730	-69,0215	0,4756	0,9986	0,0750

Sedaj lahko zapišemo izraz za določitev temperature tal, ki se glasi:

$$T_s = A_0 + A_1 \cdot T_{10} - A_2 \cdot T_{11} \quad (23)$$

kjer sta T_{10} in T_{11} svetilni temperaturi za 10. in 11. termični kanal, koeficienti A_0 , A_1 in A_2 pa so določeni na podlagi atmosferske transmisije in emisivnosti. Zaradi preglednosti je povezava med emisivnostjo površja in atmosfersko transmisijo zapisana v obliki:

$$C_i = \varepsilon_i \cdot \tau_i \quad (24)$$

$$D_i = [1 - \tau_i] \cdot [1 + (1 - \varepsilon_i) \cdot \tau_i] \quad (25)$$

kjer sta:

ε_i ... emisivnost površja za i kanal,

τ_i ... atmosferska transmisija za i kanal.

Nato parametre definiramo kot:

$$A = \frac{D_{10}}{E_0} \quad (26a)$$

$$E_1 = \frac{D_{11} \cdot (1 - C_{10} - D_{10})}{E_0} \quad (26b)$$

$$E_2 = \frac{D_{10} \cdot (1 - C_{11} - D_{11})}{E_0} \quad (26c)$$

$$E_0 = D_{11} \cdot C_{10} - D_{10} \cdot C_{11} \quad (26d)$$

in jih porabimo za določitev koeficientov:

$$A_0 = E_1 \cdot a_{10} - E_2 \cdot a_{11} \quad (27a)$$

$$A_1 = 1 + A + E_1 \cdot b_{10} \quad (27b)$$

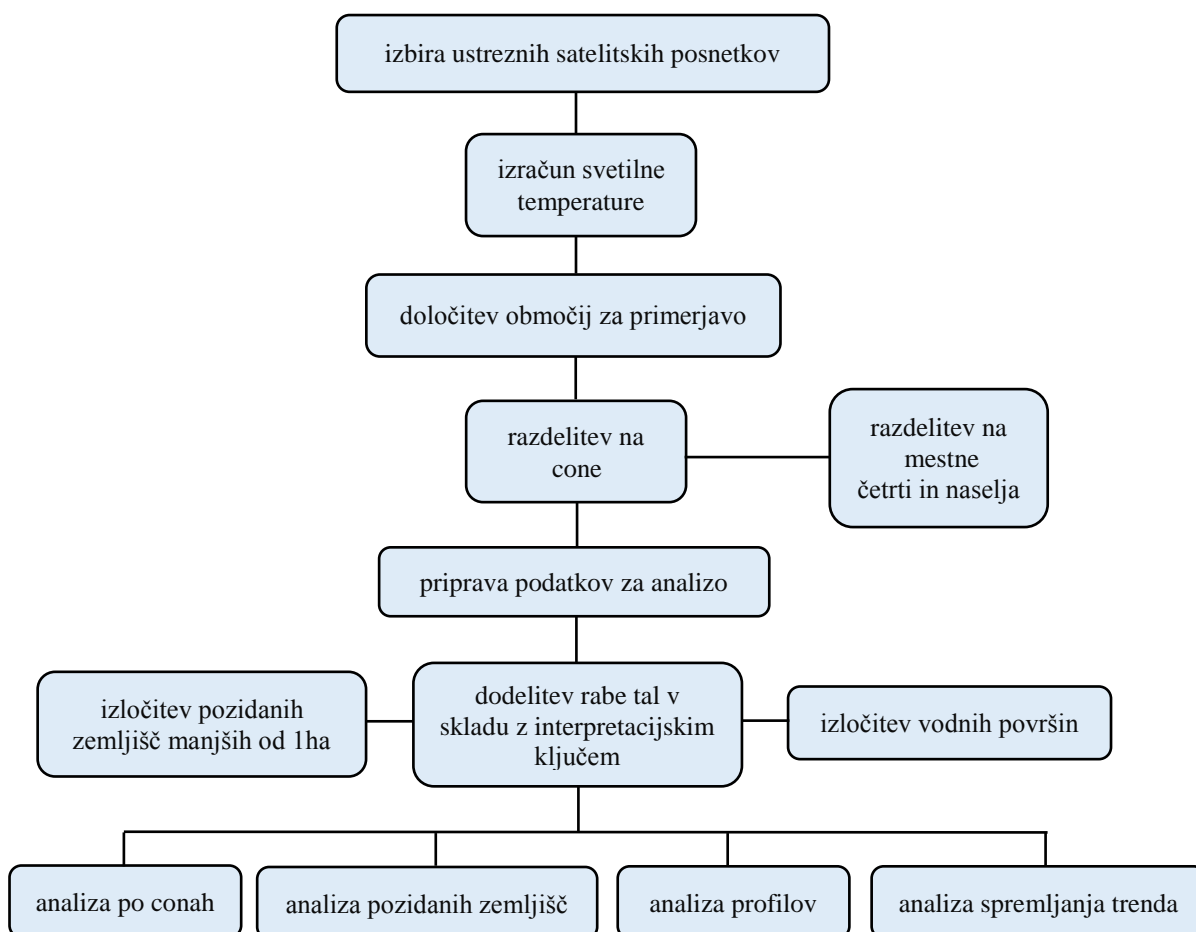
$$A_2 = A + E_2 \cdot b_{11} \quad (27c)$$

Za ocenitev algoritma je bil uporabljen program MODTRAN, s katerim je bila simulirana termična radianca na višini satelita. Dobljena radianca je bila nato pretvorjena v svetilno temperaturo, ki je služila kot vhodni podatek v algoritmu. Analiza je bila izdelana za pet različnih temperatur tal (10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C), štiri različne emisivnosti površja ($\varepsilon = 0,95-0,98$) in tri različne deleže vodne pare (1 g/cm², 2 g/cm², 3 g/cm²), kar skupaj znaša 60 različnih situacij. Koren povprečne kvadratne napake določitve temperature tal je za omenjene situacije znašal 0,93 °C, kar dokazuje razvojni proces pri določitvi temperature tal za satelitski sistem Landsat. Žal pa je ta uporaben samo za termične podatke pridobljene iz satelita Landsat 8, saj predhodni detektorji (TM, ETM+) ne vsebujejo dveh termičnih kanalov.

Decembra 2014 so se pojavile težave na detektorju TIRS, ki so prizadele drugi termični kanal (kanal 11). Količina radianca, ki jo sprejme detektor je prevelika, zaradi česar natančnost drugega termičnega kanala odstopa tudi do 8 °C. Napaka bo odpravljena marca 2015, med tem časom pa je uporaba algoritma deljenega okna odsvetovana.

4 SATELITSKO TERMICNO SNEMANJE LJUBLJANE

Praktično delo magistrske naloge je potekalo v okviru mednarodnega projekta UHI²³, čigar namen je vzpostaviti primerne strategije, ki bi ublažile pojav mestnega toplotnega otoka. Dejavniki kot so gosta poselitev mestnega jedra, velika industrijska območja, številna nakupovalna središča in kontinuirana urbanizacija prispevajo k segrevanju površja in s tem k pojavu mestnega toplotnega otoka. Vpliv tega bo skozi leta vedno večji, saj naj bi do leta 2050 približno 70 % svetovne populacije živelo v mestih. Za ohranjanje kakovosti mestnega življenja je zato tovrsten pojav potrebno spremljati ter ga upoštevati pri načrtovanju in nadaljnjem razvoju mestnih dejavnosti. Z obdelavo termičnih satelitskih posnetkov smo določili temperaturo tal za Ljubljano in njeno okolico. Pri izračunu nismo upoštevali atmosferskih popravkov, saj za določitev najtoplejših delov mesta in ugotavljanje razlik v temperaturi med mestom in njegovo okolico ta korak ni bil potreben.



Slika 5: Potek dela.

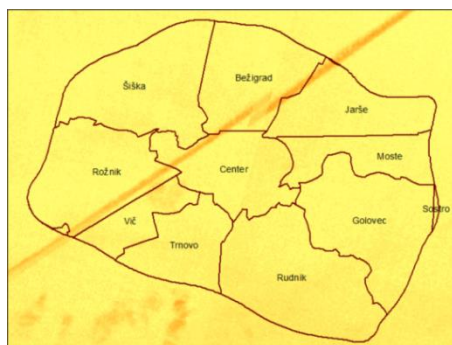
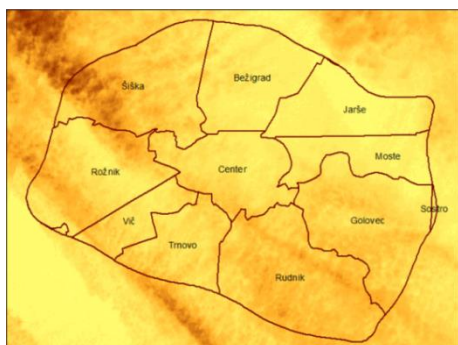
²³ angl. Urban Heat Island. Projekt financiran iz strani Mestne občine Ljubljana in Evropskega sklada za regionalni razvoj.

4.1 Uporabljeni podatki

Pri spremljanju trenutnega stanja smo za obdobje med letom 2013 in 2014 uporabili posnetke satelita Landsat 8. Za vsak letni čas smo skušali pridobiti vsaj dva posnetka zadovoljive kakovosti. Za kriterij smo postavili dobro vidljivost in posledično minimalen ali ničeln delež oblačnosti. Kriterija nismo uspeli povsem izpolniti, saj posnetka zajeta na dan 18.6.2013 in 31.10.2013 vsebujeta nekaj oblakov (slika 6). Na kartah odstopanj temperatur od povprečja smo pozidana območja kjer se nahaja oblačnost označili s šrafuro, kajti na tem mestu utegnejo biti podatki nezanesljivi. V analizi so prikazani rezultati enega posnetka za posamezen letni čas; ostali rezultati so v prilogi. Za spremljanje temperaturnega trenda smo v analizo vključili posnetke satelitov Landsat 5 in 7 od leta 2001 naprej. Vsi posnetki so bili izbrani v poletnem času, saj je verjetnost za izpolnitev kriterija kakovosti takrat največja. Poleg tega je pojav toplotnega otoka v toplejšem delu leta bolj izrazit, kar omogoča lažjo medsebojno primerjavo. Pri posnetkih zajetih v toplejšem delu leta smo bili pozorni na morebitno prisotnost vročinskega vala, saj je ta pojav potrebno upoštevati pri interpretaciji rezultatov. Potek dnevnih temperatur smo pridobili iz glavne meteorološke postaje Bežigrad, kateri podatki so javno dostopni v arhivu ARSO²⁴. Izkazalo se je, da se posnetek zajet 18.6.2013 nahaja ravno na sredini vročinskega vala, v to kategorijo pa lahko umestimo tudi posnetka zajeta 19.7.2004 in 29.6.2011.

Preglednica 8: Pridobljeni in obdelani posnetki satelitov Landsat 5, 7 in 8 na območju Ljubljane.

posnetek	datum	čas snemanja	letni čas	satelit
LC81900282013105	15.04.2013	9:47:50	pomlad	Landsat 8
LC81900282013169	18.06.2013	9:47:57		Landsat 8
LC81900282013201	20.07.2013	9:47:58	poletje	Landsat 8
LC81910282013224	12.08.2013	9:54:12		Landsat 8
LC81910282013304	31.10.2013	9:53:55	jesen	Landsat 8
LC81910282013336	02.12.2013	9:53:49		Landsat 8
LC81900282014012	12.01.2014	9:47:13	zima	Landsat 8
LC81910282014067	08.03.2014	9:52:45		Landsat 8
LE71900282001224	12.08.2001	9:34:54	poletje	Landsat 7
LT51910282004200	19.07.2004	9:34:34	poletje	Landsat 5
LT51900282007217	05.08.2007	9:39:28	poletje	Landsat 5
LT51900282011180	29.06.2011	9:35:14	poletje	Landsat 5

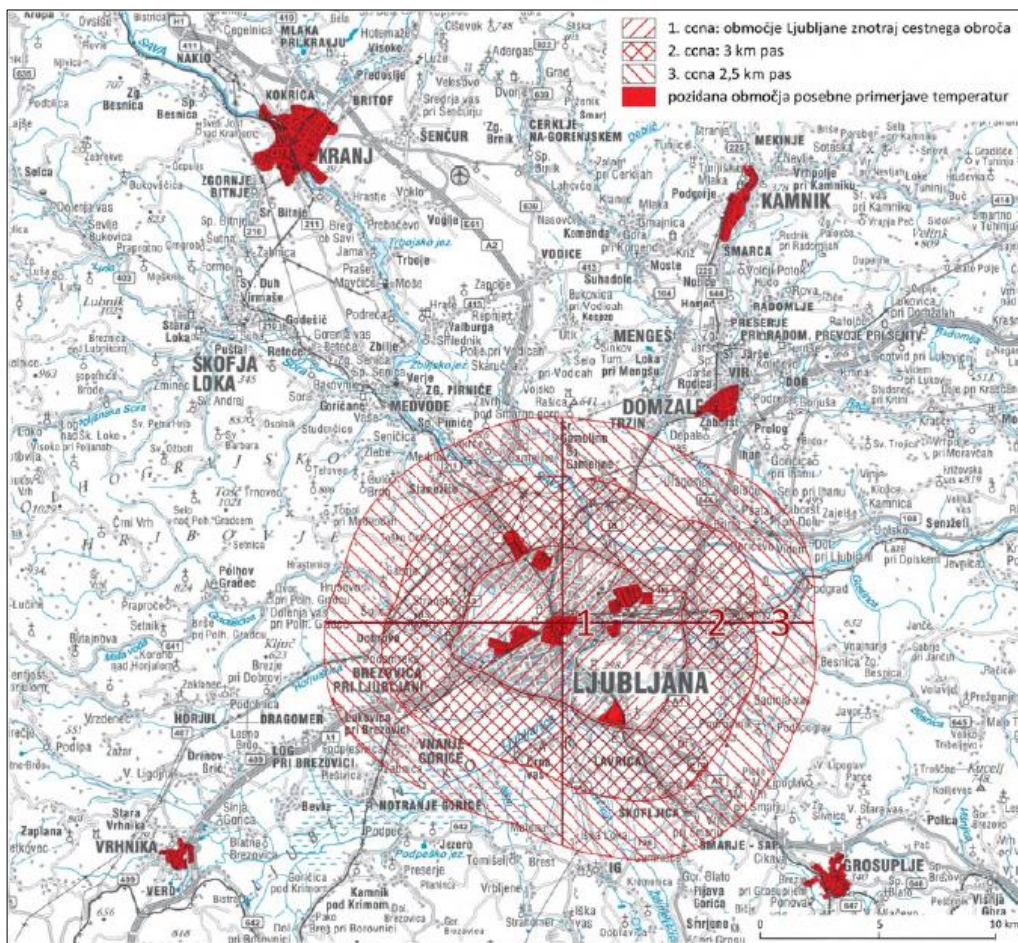


Slika 6: Prisotnost oblakov nad Ljubljano na dan 18.6.2013 (levo) in 31.10.2013 (desno). Barvna lestvica oblake prikazuje poudarjeno.

²⁴ Agencija Republike Slovenije za okolje.

4.2 Razdelitev območja in priprava podatkov

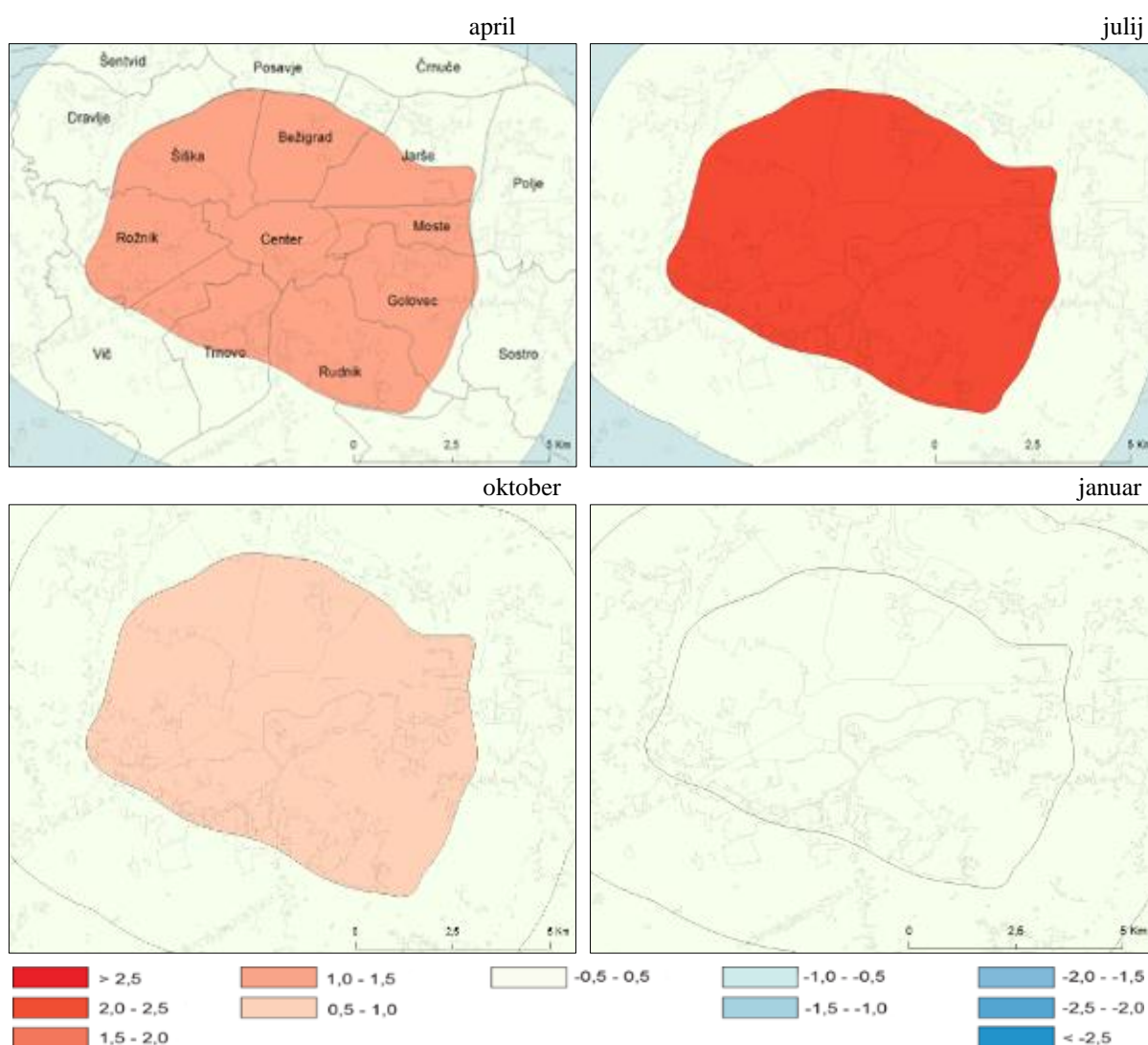
Ljubljano smo sistematično razdelili na tri pasove oziroma cone. Prva cona je znotraj avtocestnega obroča, druga cona se razprostira 3 km od roba prve in tretja cona 2,5 km od roba druge cone (slika 7). Območju znotraj con smo dodelili rabo tal v skladu z interpretacijskim ključem. Upoštevali smo pozidana in sorodna zemljišča, gozd, travnike in kmetijska zemljišča. Skupke pozidanih zemljišč s površino manjšo od ločljivosti termičnega kanala satelita Landsat 8 (1 ha) smo izločili iz obravnave. Izločili smo tudi vodna območja, saj imajo le-ta velik vpliv na temperaturo. Prvo cono smo nadalje razdelili na mestne četrti, medtem ko smo drugo in tretjo cono razdelili na območja naselij. Dodatno smo zajeli nekatera zanimivejša območja znotraj con in izbrali nekatera Ljubljani bližnja mesta. Primerjava med temi območji poda boljši lokalni pregled temperaturnega stanja mesta. Z namenom ugotavljanja kako posamezna dejanska raba vpliva na temperaturo tal smo naredili profil, ki poteka skozi celotno območje vseh treh con v smeri sever-jug in zahod–vzhod ter nekaj manjših profilov, ki potekajo skozi območja rastja in vode v prvi coni.



Slika 7: Prikaz delitve Ljubljane na cone skupaj z izbranimi območji pozidanih zemljišč za primerjavo in glavnim profilom v smeri sever-jug in zahod-vzhod.

4.3 Analiza po conah

S tovrstno analizo smo potrdili obstoj mestnega toplotnega otoka ter hkrati pokazali, da je ta prisoten skoraj skozi celo leto. Iz kart odstopanj med povprečno temperaturo v posamezni coni in skupno povprečno temperaturo (slika 8) je mogoče razbrati, da je temperatura prve cone, z izjemo zimskega letnega časa, vedno izrazito toplejša od povprečja. Leta 2013 je bila prva cona v poletnem času od tretje toplejša za več kot 3 °C in to kljub temu, da so v prvi coni upoštevane obsežne gozdne površine Golovca, Rožnika in Šišenskega hriba. Temperatura druge cone se skozi leto giblje blizu povprečja, tretja cona pa je pretežno podpovprečna. Za posplošitev trditve bi potrebovali več dnevnih kot tudi nočnih opazovanj, vendar zadnji v primeru satelita Landsat za območje Ljubljane niso dosegljivi.



Slika 8: Odstopanje med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo.

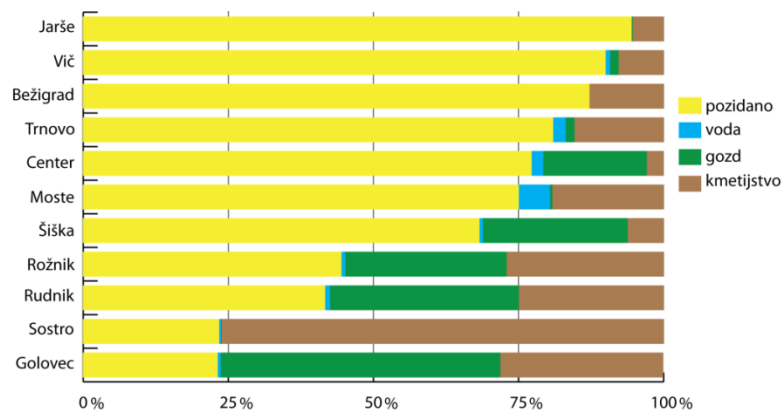
4.4 Analiza pozidanih zemljišč

Podrobnejše informacije o temperaturnem stanju mesta podaja analiza pozidanih zemljišč, ki smo jo razdelili v dva dela. V prvem delu smo ugotavljali razliko med povprečno temperaturo posameznih območij pozidanih zemljišč in povprečno temperaturo vseh pozidanih zemljišč (slika 10). Na ta način smo dobili podatek za koliko je posamezno pozidano območje toplejše ali hladnejše od ostalih pozidanih zemljišč. Kot nakazuje že analiza po conah so deli znotraj cestnega obroča najtoplejši, med njimi pa še posebej izstopa območje Jarš. Velike nakupovalno–poslovne površine z visoko stopnjo pozidanosti in posledično nizkim vegetacijskim indeksom delujejo kot ogromna telesa z veliko toplotno kapaciteto, ki shranjeno toploto počasi oddajajo nazaj v ozračje.

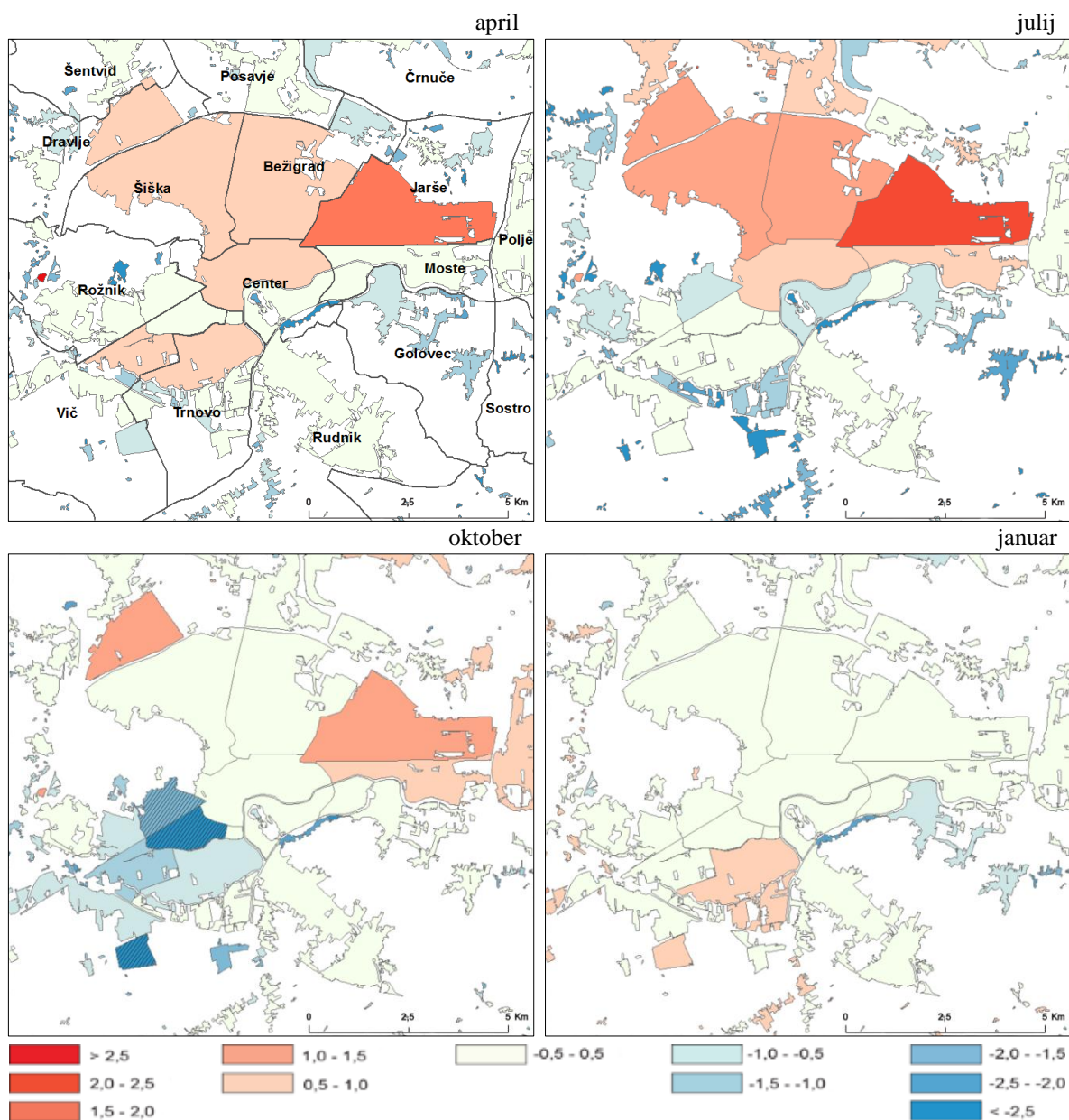
Temperatura tal je tako znatno odvisna od vrste rabe, ki prevladuje v posamezni četrti skupnosti. Znotraj cestnega obroča se Jarše s 95 % pozidanostjo (slika 9) uvrščajo na prvo mesto in v poletnem času že pred 10. uro zjutraj dosega temperatura do 37 °C (preglednica 9). Na območju Bežigrada in Šiške je prav tako moč zaznati povečano temperaturno odstopanje od povprečja (slika 10). Voda in rastje delujeta kot naravni hladilni sistem, ki je v poletnih mesecih izredno lepo viden znotraj četrti Center. Pozidana zemljišča na območju Prul in Kodeljevega zaradi neposredne bližine Ljubljane, Grajskega griča in Golovca dosega podpovprečne temperaturne vrednosti. Zlasti izstopajo pozidana zemljišča na severozahodnem delu Golovca, saj so ta zaradi senčne lege in bližine rastja ter vode od povprečja hladnejša za 5 °C.

Preglednica 9: Mestne četrtne skupnosti razporejene glede na delež pozidanih zemljišč znotraj cestnega obroča in njihove temperature.

	15.4.2013	18.6.2013	20.7.2013	12.8.2013	31.10.2013	2.12.2013	12.1.2014	8.3.2014
Jarše	28,6	38,3	37,1	35,8	18,5	6,6	11,2	14,3
Vič	27,2	36,2	34,8	34,0	14,8	6,7	11,6	13,0
Bežigrad	27,4	36,9	36,2	34,9	17,6	6,3	11,2	13,3
Trnovo	27,0	34,9	34,1	33,0	16,8	6,9	11,9	13,2
Center	26,6	34,9	33,9	32,8	17,0	6,2	11,1	12,5
Moste	26,4	35,4	35,0	34,0	17,6	6,3	11,1	13,1
Šiška	26,3	33,2	33,9	33,0	16,9	6,1	11,0	12,5
Rožnik	25,2	33,1	32,3	31,9	16,1	6,4	11,5	11,9
Rudnik	25,7	32,0	31,7	31,7	16,9	6,6	11,6	12,5
Sostro	25,4	33,8	33,8	33,8	17,6	6,1	11,2	12,8
Golovec	24,0	30,9	30,7	30,3	16,3	5,4	10,4	11,4
nepozidano vse cone	24,2	30,8	30,6	30,6	16	6,1	11,2	11,6

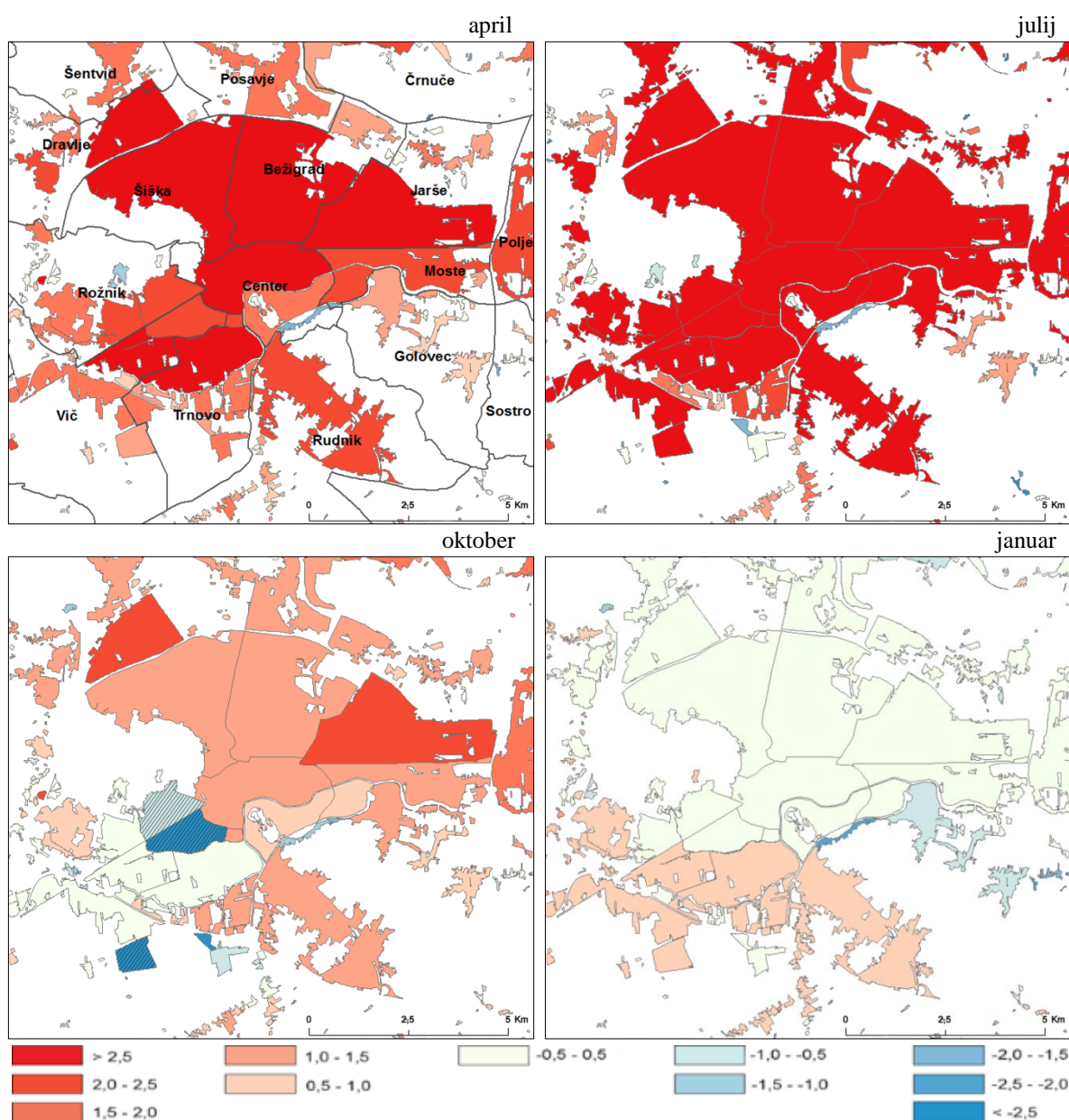


Slika 9: Delež rabe tal po četrtini skupnosti znotraj cestnega obroča.



Slika 10: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh pozidanih zemljišč. Območja manjše zanesljivosti podatkov zaradi prisotnosti oblakov so označena s šrafuro.

V drugem delu smo ugotavljali razliko med povprečno temperaturo posameznih območij pozidanih zemljišč in povprečno temperaturo vseh zemljišč v vseh treh conah (slika 11). Tako smo dobili podatek za koliko je posamezno pozidano območje toplejše ali hladnejše od trenutne povprečne temperature. Pozidana zemljišča so po pričakovanjih toplejša od okolice, temperaturne razlike pa so bolj očitne v poletnih mesecih. Z oddaljevanjem od mestnega jedra se večja delež razpršene gradnje in s tem tudi delež zelenih površin, kar vpliva na temperaturo pozidanih zemljišč. Povprečna temperatura pozidanih zemljišč v prvi coni se npr. 20. julija 2013 od okolice razlikuje za 3,9 °C, medtem ko povprečna temperatura pozidanih zemljišč v drugi coni od okolice odstopa za 2,9 °C, v tretji coni pa za 2,4 °C. V zimskem času ni opaznejših temperaturnih odstopanj, nekoliko toplejši je le južni del Ljubljane.



Slika 11: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh zemljišč v vseh treh conah. Območja manjše zanesljivosti podatkov zaradi prisotnosti oblakov so označena s šrafuro.

Nekatera pozidana zemljišča skozi celo leto presegajo povprečne temperaturne vrednosti in se v toplejšem delu leta pogosto pregreva. To so tako imenovane vroče točke, ki razkrivajo kje so okoljevarstveni ukrepi nujno potrebni (slika 12). V Ljubljani zlasti izstopa nakupovalno-poslovno območje BTC ter okolišnji industrijski obrati in skladišča. Pregreva se tudi pas velikih prodajno-skladiščnih poslopij v Bežigradu, industrijsko območje nekdanjega Litostroja v Zgornji Šiški, industrijska cona in nakupovalno središče v Stegnah ter nakupovalni središči na Rudniku in Viču. V središču mesta izrazitega pregrevanja ne beležimo, najtoplejši deli so tovarna Union, Klinični center in železniški tiri ob glavni postaji.



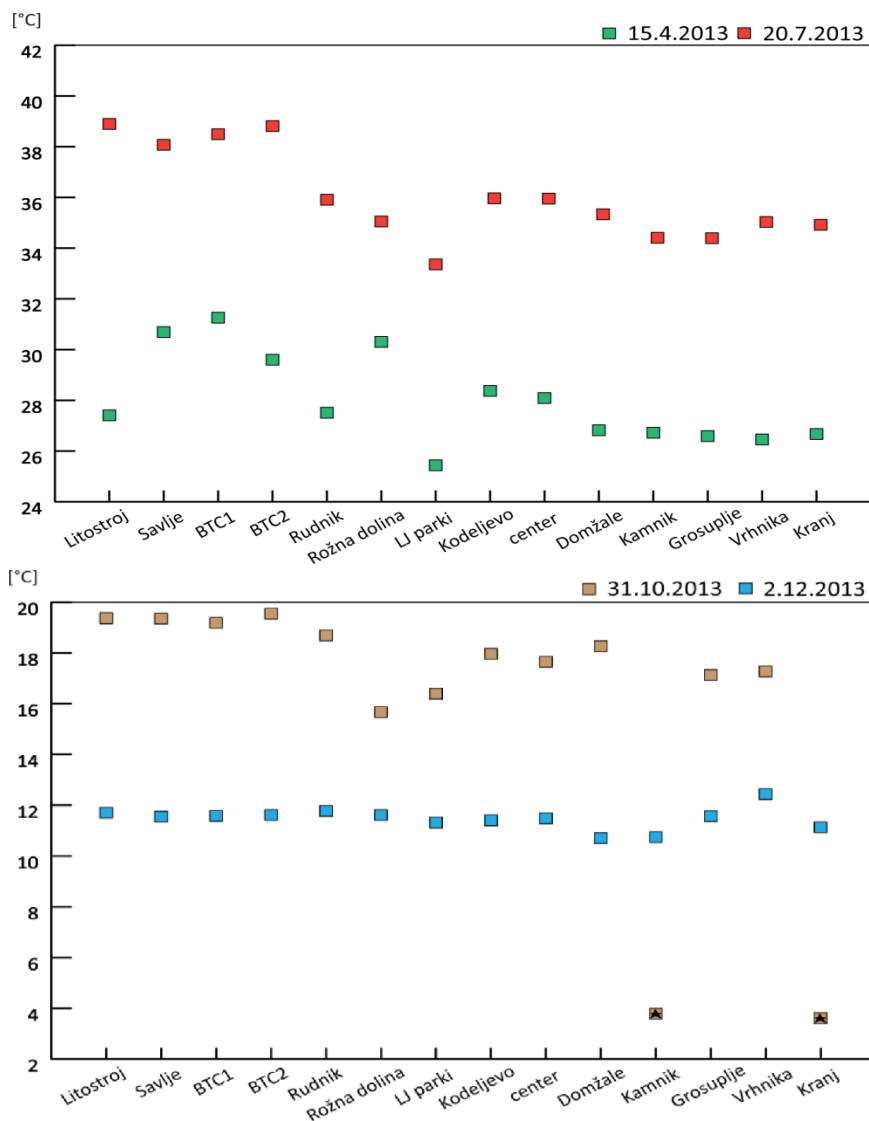
Slika 12: Območja pozidanih zemljišč, ki v toplejšem delu leta od povprečne temperature ostalih pozidanih zemljišč odstopajo za 5 °C ali več.

Iz slike 12 je razvidno, da so v Ljubljani površine, ki se pregrevajo. Da bi ugotovili, kako se na posameznih območjih skozi leto gibljejo temperaturne vrednosti, smo izvedli primerjavo temperatur. Vanjo smo vključili pozidana zemljišča manjših sosednjih mest (Kranj, Domžale, Kamnik, Vrhnika, Grosuplje) (slika 7) in nekatera zanimivejša območja znotraj Ljubljane (slika 13):

- center (jedro toplotnega otoka kot je bilo opredeljeno v [1]),
- industrija (Litostroj, Stegne),
- nakupovalno–poslovna območja (BTC, Rudnik),
- stanovanjska območja (Rožna dolina, Kodeljevo),
- parki.



Slika 13: Primerjava temperatur nekaterih zanimivejših območij. Z oranžno so označena pozidana zemljišča, z zeleno pa nekateri parki.

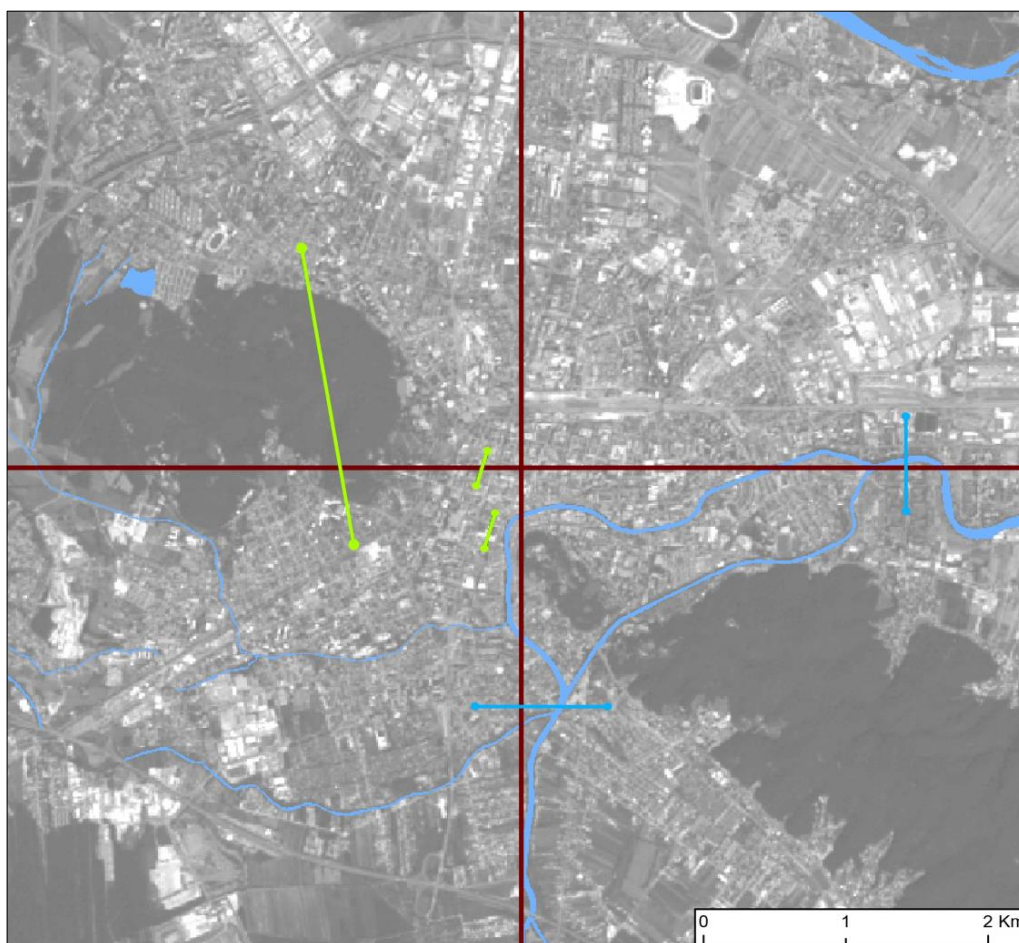


Slika 14: Primerjava povprečnih temperatur nekaterih zanimivejših območij v Ljubljani in izbranih bližnjih mest. Z zvezdico so označene nezanesljive meritve zaradi oblačnosti.

V spomladanskem in poletnem času so najvišje temperature na območju industrije in nakupovalno-poslovnega središča BTC. Nakupovalno središče Rudnik se kljub gosti pozidavi in velikim parkirnim površinam pregreva le delno, kar gre pripisati bližini Golovca in Ljubljanskega barja. Temperatura Rožne doline je bila v času spomladanskega posnetka dokaj visoka, poleti pa je mogoče opaziti blagodejni vpliv Rožnika in Tivolija. Območje centra se pretirano ne pregreva; temperaturne vrednosti so primerljive s stanovanjskim območjem Kodeljevo in manjšimi sosednimi mesti. Površine parkov pričakovano dosegajo najnižje temperaturne vrednosti. Te se v poletnem času od temperature pozidanih zemljišč razlikujejo tudi do 6 °C. V nekoliko hladnejšem jesenskem času najvišje temperaturne vrednosti še vedno dominirajo nad območjem nakupovalno-poslovnih središč in industrijskih con, vendar so razlike med njimi minimalne. Pozimi trenutno ne beležimo temperaturnega pregrevanja niti bistvenega odstopanja med pozidanimi in naravnimi površinami. Nekoliko toplejše je le območje Vrhnike, kar je posledica osončenosti.

4.5 Analiza profilov

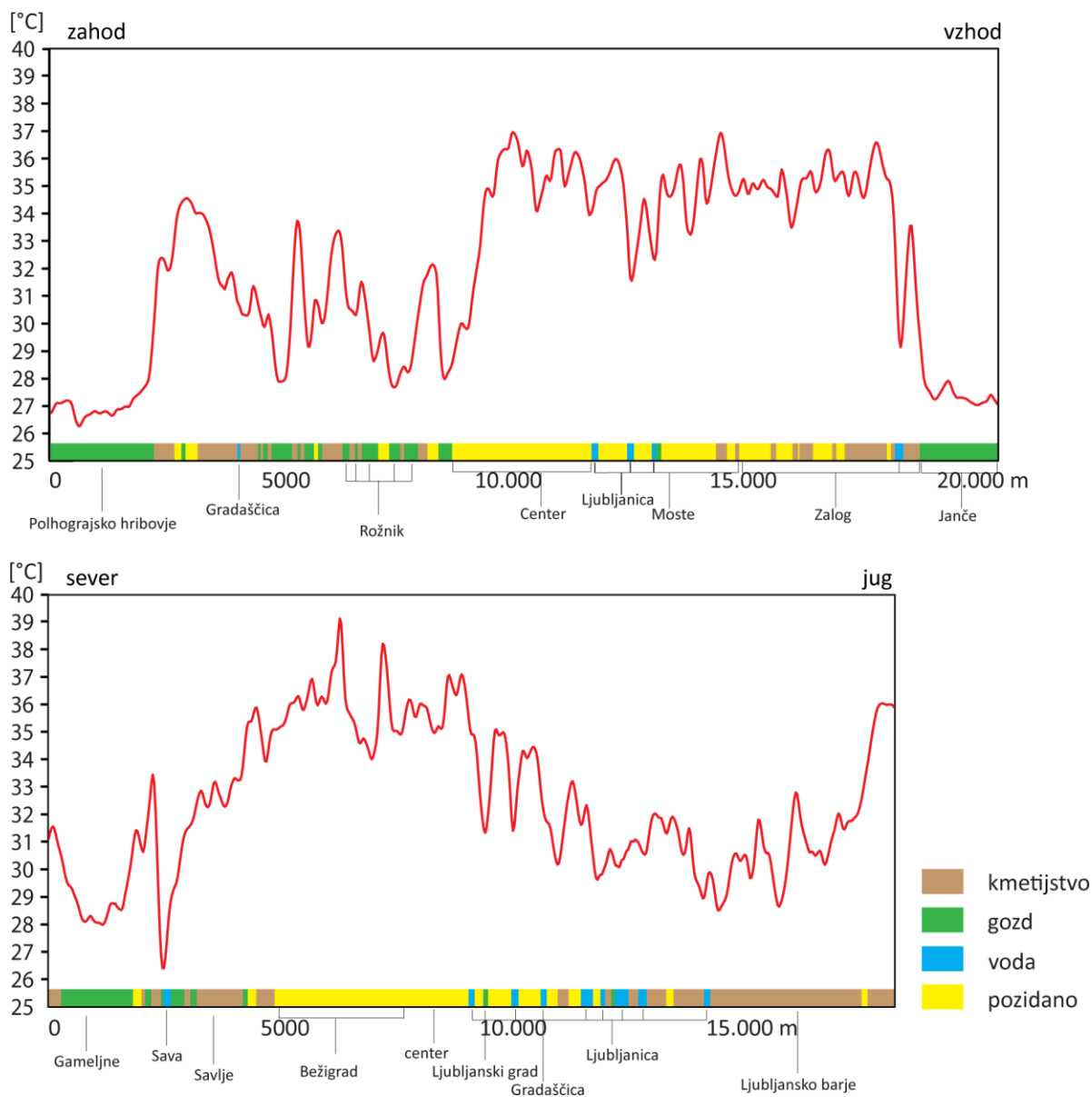
Vpliv rabe tal na dvig temperature smo podrobneje preučili z analizo profilov. Temperaturno nihanje skozi celotno obravnavano območje Ljubljane prikazujeta profila, ki potekata v smeri sever-jug in zahod-vzhod (slika 7). V središču mesta pa smo naredili več manjših profilov (slika 15), s katerimi smo pod drobnogled vzeli zelene (npr. Rožnik, Argentinski park, park Zvezda) in vodne površine (Ljubljanica).



Slika 15: Profili za ugotavljanje vpliva različne rabe na temperaturo tal. Z rdečo barvo sta označena profila, ki potekata čez celotno območje v smeri sever-jug in zahod-vzhod, z zeleno profili, ki potekajo čez rastje in z modro profili, ki potekajo čez vodo.

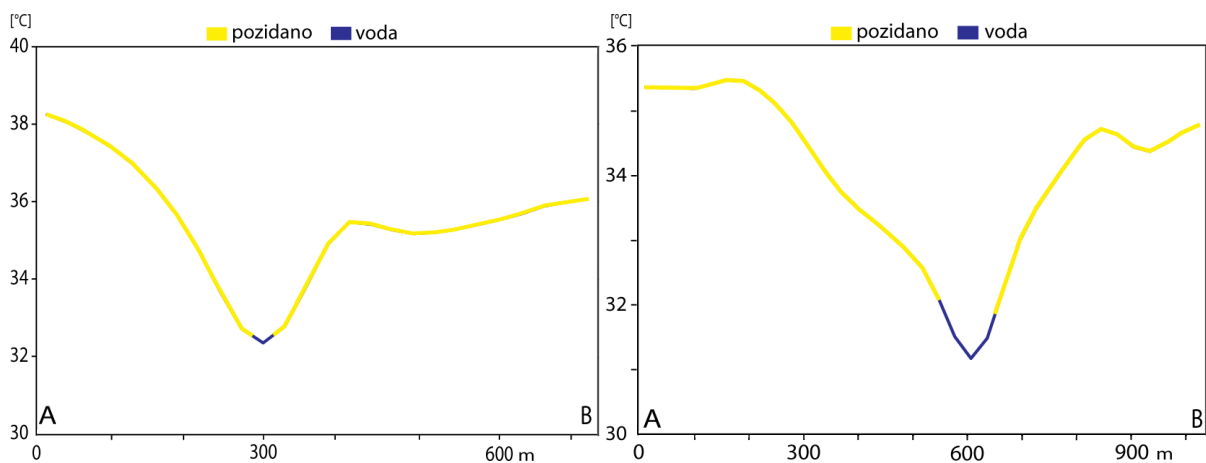
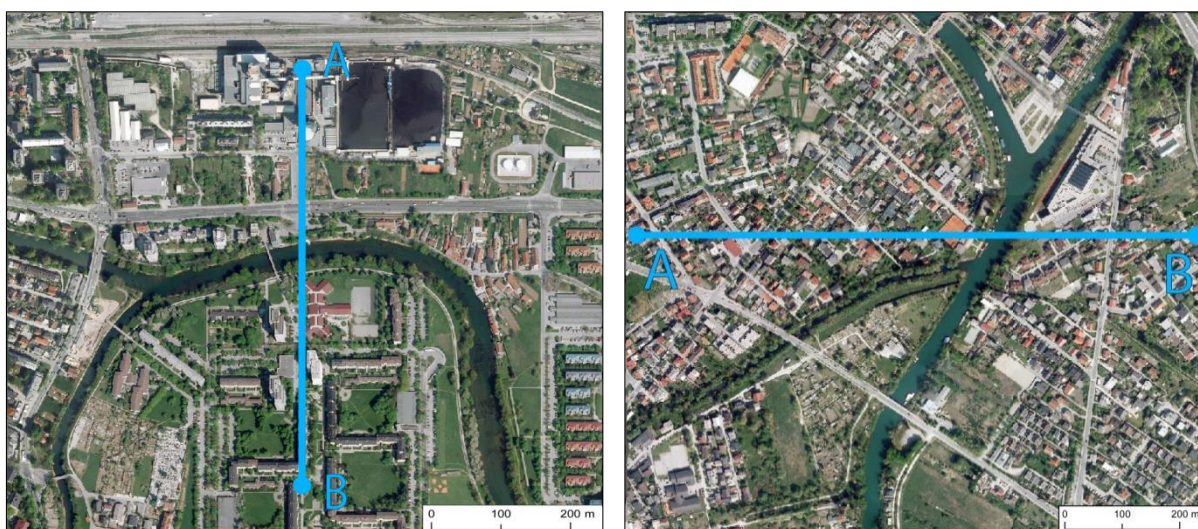
Profila v smeri sever-jug in zahod-vzhod (slika 16) prikazujeta povprečno temperaturo tal v poletnem obdobju. Izredno lepo je viden blagodejen vpliv velikih gozdnih površin, kjer se temperatura tal od pozidanih zemljišč razlikuje tudi do 10 °C. Poleti se močno segrejejo tudi kmetijske površine; temperatura zoranih njiv se ponekod lahko primerja s pozidanimi zemljišči. Znaten padec temperature

je mogoče opaziti na območju vodnih površin, ta je zlasti lepo viden na profilu v smeri sever-jug, ki poteka čez Savo. V centru mesta se zaradi vpliva Ljubljanice temperatura spusti tudi do 5 °C, razsežnost vpliva pa bolj podrobno prikažejo profili voda v nadaljevanju. Iz slike 16 je razvidno, da že najmanjša območja vode in drevesnega rastja znatno vplivajo na temperaturo tal. Ta vpliv je še posebej pomemben na območjih kjer prevladuje stanovanjska raba, saj lahko z zelenimi in vodnimi površinami v veliki meri uravnavamo urbano mikroklimo.

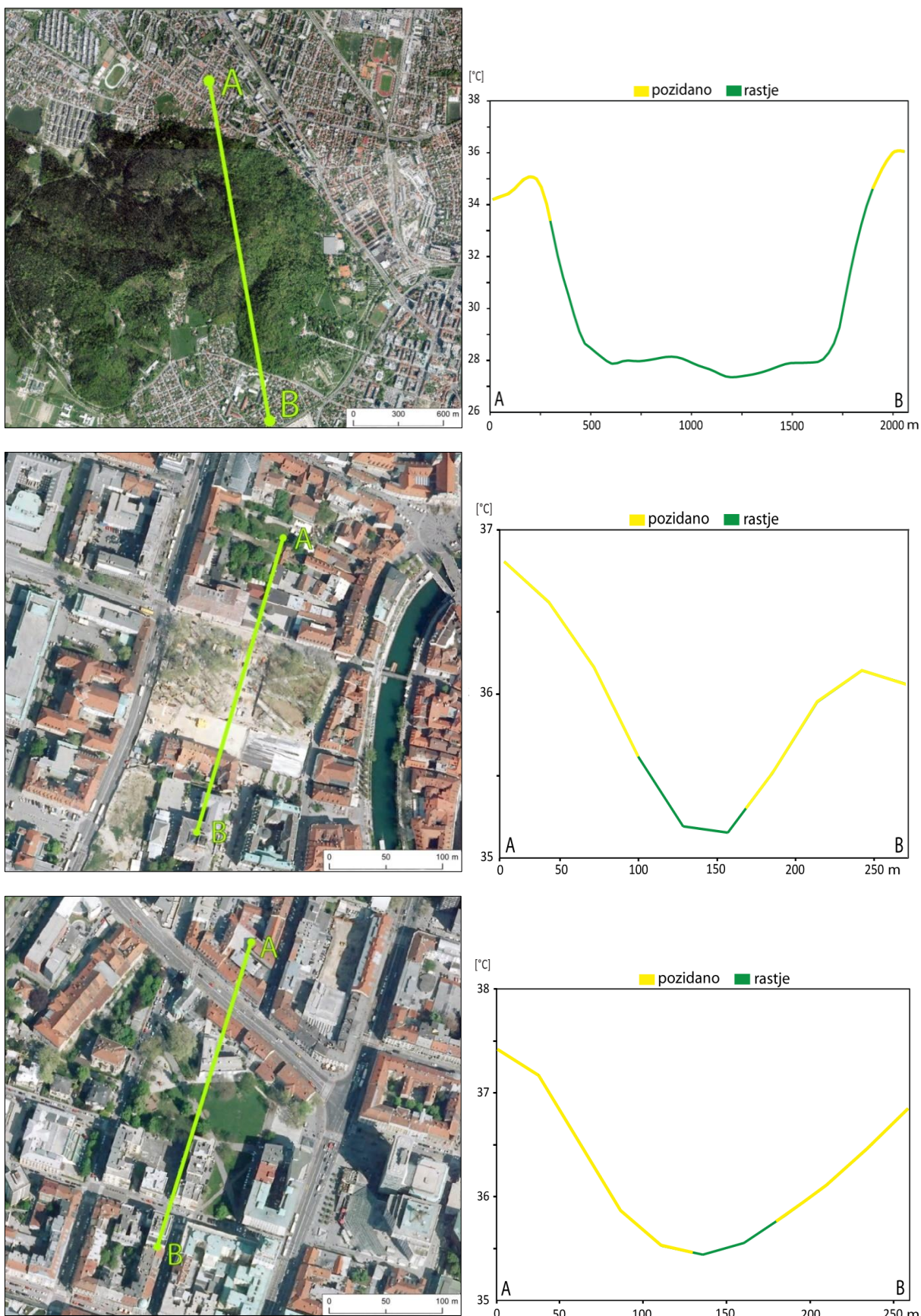


Slika 16: Povprečna temperatura tal v poletnem obdobju. Širina vodotokov je zaradi preglednosti povečana.

Vpliv vode na padec temperature tal v okolici je v veliki meri odvisen od širine reke, ki ne le pripomore k uravnavanju pretoka vode, temveč tudi omogoča lažji pretok zraka. Poleg tega je v enaki meri vpliv odvisen tudi od razlike v temperaturi vode in okolice. Ta je večja v toplejšem delu leta, zato je takrat vpliv večji. Pomemben faktor je tudi stopnja pozidanosti v okolici reke, saj je vpliv vode na območju z visoko stopnjo pozidanosti manjši. 20. julija je bil vpliv vode v Ljubljani mogoče zaznati do razdalje med 100 in 200 metri (slika 17). Vpliv zelenih površin je manjši in seže le v njihovo neposredno okolico (slika 18).



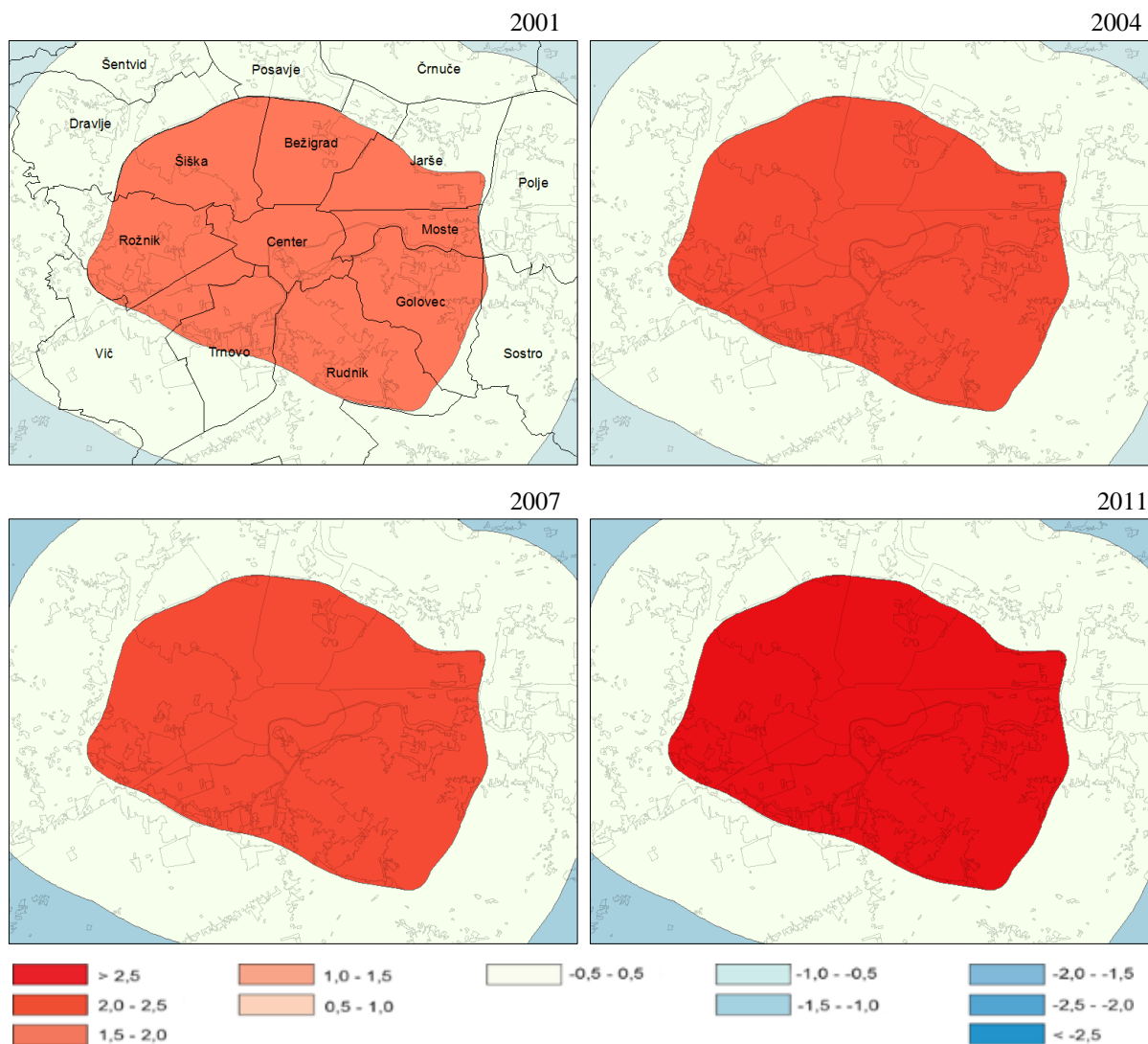
Slika 17: Profil čez toplarno, Ljubljano in del Štepanjskega naselja (levo). Profil čez del stanovanjske soseske v Trnovem, Ljubljano in del stanovanjske soseske na Rudniku (desno). Zajeto na dan 20.7.2013.



Slika 18: Profil čez Rožnik (zgoraj), park Zvezda (na sredini) in Argentinski park (spodaj). Zajeto na dan 20.7.2013

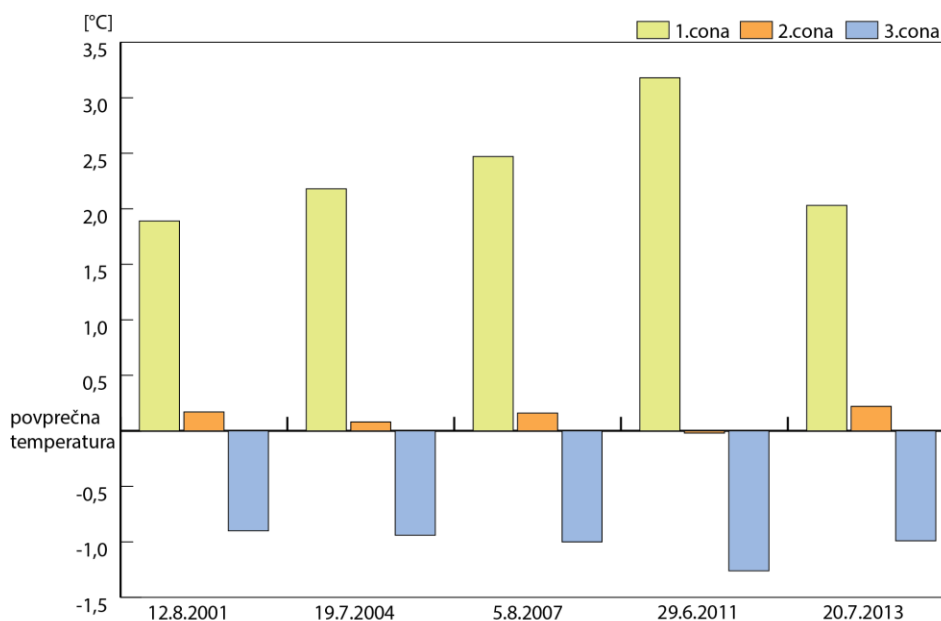
4.6 Analiza spremljanja temperaturnega trenda v Ljubljani

S časovno analizo smo ugotavljali temperaturno stanje v Ljubljani od leta 2001. Zanimalo nas je ali je bilo v tistem času že mogoče zaznati pojav mestnega toplotnega otoka in ali se temperaturni trend odvija pozitivno oziroma negativno. Iz kart odstopanj med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo (slika 19) lahko razberemo, da je pojav mestnega toplotnega otoka v Ljubljani prisoten že dalj časa. Leta 2011 je temperaturno odstopanje prve cone od povprečja izjemno visoko, kar gre pripisati vplivu vročinskega vala.



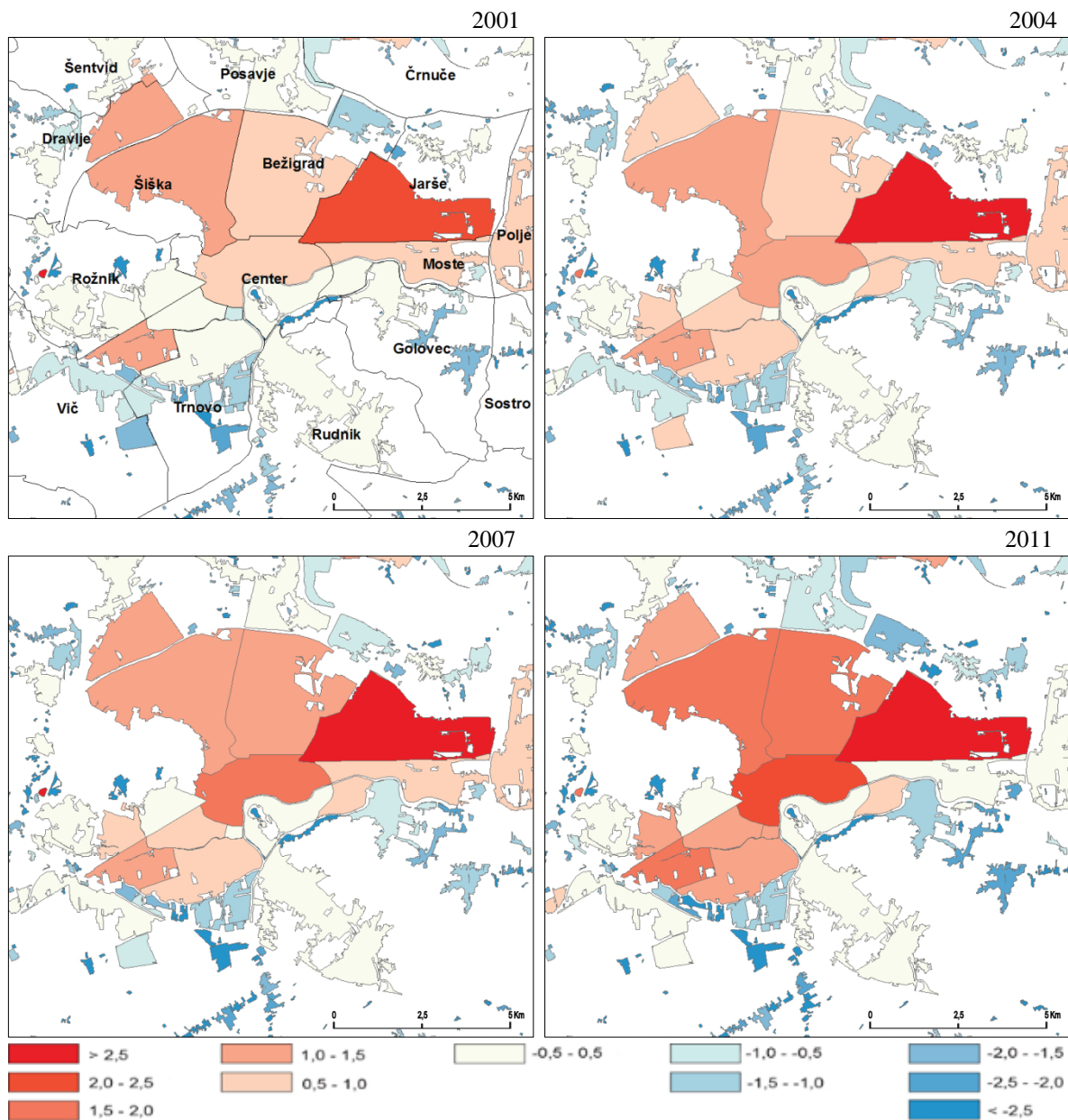
Slika 19: Trend odstopanja med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo.

Odstopanje med povprečno temperaturo v prvi coni in povprečno temperaturo v okolici je 19.7.2004 in 29.6.2011 nekoliko pretirano zaradi prisotnosti vročinskega vala (slika 20). 5.8.2007 je relativna temperaturna razlika med mestom in okolico je nekoliko večja, 12.8.2001 in 20.7.2013 pa je skoraj enaka.



Slika 20: Odstopanje od povprečne temperature po conah v poletnem času.

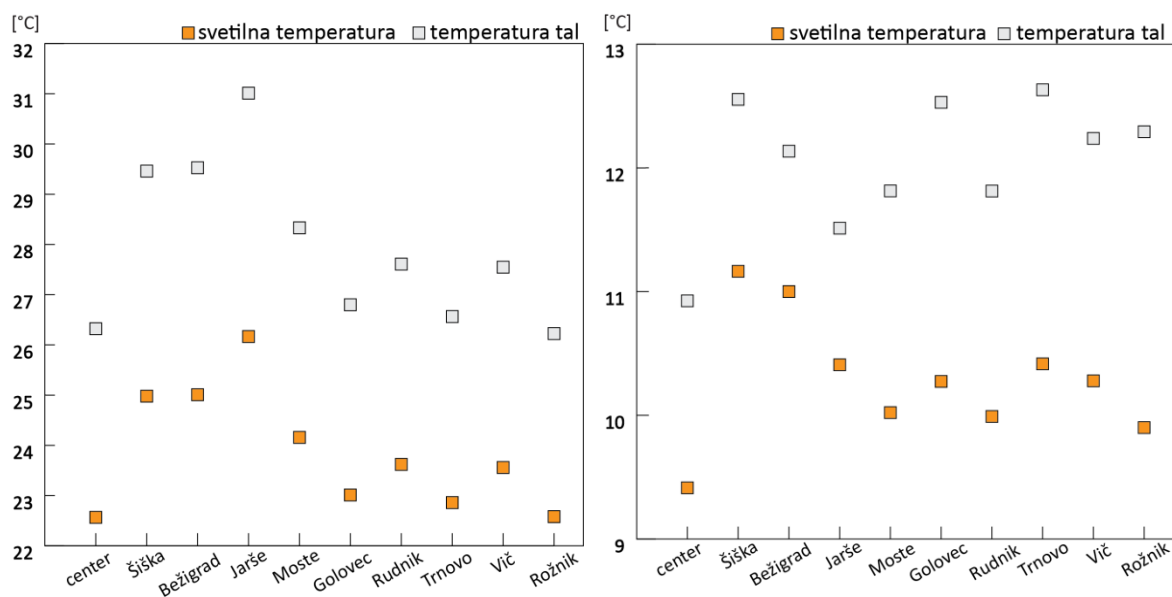
Največje temperaturno odstopanje pozidanih zemljišč od povprečja (slika 21) je tako kot danes prisotno na območju Jarš. Izrazito pregrevanje je zaradi vročinskega vala vidno zlasti na posnetku iz leta 2004 in 2011. Temperaturno odstopanje na območju Šiške se do danes bistveno ni spremenilo, izstopa le posnetek iz leta 2011, ki je kot rečeno pod vplivom vročinskega vala. Največje spremembe v razlikah v temperaturi je mogoče videti na območju Bežigrada, ki se leta 2004 kljub vročinskemu valu uvršča med hladnejše četrti v mestu, danes pa je med toplejšimi. Temperaturne spremembe so opazne tudi v centru mesta, natančneje na levem bregu Ljubljaniice. Center se je med leti 2001 in 2011 opazno segreval, leta 2013 pa je njegovo relativno temperaturno stanje enako kot leta 2001.



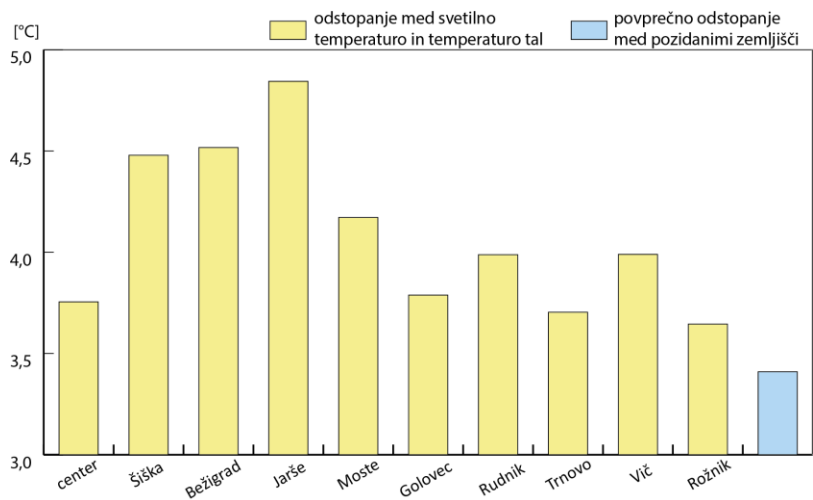
Slika 21: Trend odstopanj povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh pozidanih zemljišč.

4.7 Uporaba algoritma za določitev temperature tal

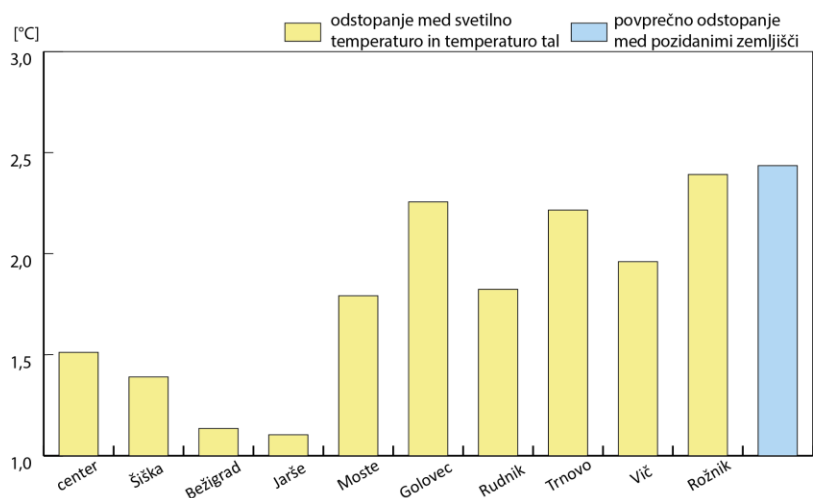
Pri določitvi najtoplejših delov mesta in ugotavljanju razlik v temperaturi med mestom in njegovo okolico atmosferskih popravkov nismo upoštevali. Da bi ugotovili kakšno je odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal, smo na poletnem (12.8.2001) in zimskem (8.3.2014) posnetku uporabili algoritme opisane v tretjem poglavju. Poletni posnetek je zajet iz satelita Landsat 7, ki uporablja en termični kanal, zato smo za določitev temperature tal uporabili algoritem enega okna. Zimski posnetek pa je zajet iz satelita Landsat 8, ki uporablja dva termična kanala, zato smo na tem mestu uporabili algoritem deljenega okna. Razliko med svetilno temperaturo in temperaturo tal na pozidanih zemljiščih za posamezne mestne četrti podaja slika 22. Svetilna temperatura je po pričakovanjih manjša od prave temperature tal, saj je radianca, ki jo zazna detektor oslabljena zaradi vpliva atmosfere. 12.8.2001 se odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal po mestnih četrtih giblje med 3,7 °C in 4,8 °C, medtem ko povprečno odstopanje omenjenih temperatur za vsa pozidana zemljišča znaša 3,4 °C (slika 23). Atmosfera je pozimi bolj stabilna kot poleti, zato je odstopanje 8.3.2014 med svetilno temperaturo in temperaturo tal manjše. Le-to se giblje med 1,1 °C in 2,4 °C, medtem ko povprečno odstopanje za vsa pozidana zemljišča znaša 2,4 °C (slika 24).



Slika 22: Razlika med svetilno temperaturo in temperaturo tal na dan 12.8.2001 (levo) in 8.3.2014 (desno).



Slika 23: Odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal pozidanih zemljišč po mestnih četrtih ter povprečno odstopanje svetilne temperature in temperature tal med pozidanimi zemljišči na dan 12.8.2001.



Slika 24: Odstopanje med svetilno temperaturo in temperaturo tal pozidanih zemljišč po mestnih četrtih ter povprečno odstopanje svetilne temperature in temperature tal med pozidanimi zemljišči na dan 8.3.2014.

5 ZAKLJUČEK

Človek s svojim načinom življenja nenehno posega v prostor in s tem vpliva na okolje v katerem živi. Mesta kot najbolj modificirana oblika naravnega prostora se soočajo z oslABLJENO cirkulacijo zraka, nenehnim onesnaževanjem in povišano povprečno temperaturo. Tako prihaja do specifičnih podnebnih razmer, ki vodijo do pojava mestnega toplotnega otoka, ta pa bistveno vpliva na kakovost bivanja in počutje ljudi.

V magistrski nalogi smo predstavili teoretično ozadje določitve temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat. Opisali smo dejavnike, ki vplivajo na elektromagnetno valovanje v termičnem delu spektra ter predstavili metode, ki omogočajo njihovo določitev ali oceno. Podrobno smo opisali algoritme za določitev temperature tal iz satelitskih posnetkov Landsat in natančnost, ki jo dosegajo. Za obdobje 2013/14 smo na podlagi satelitskih posnetkov Landsat 8 ugotavljali prisotnost pojava mestnega toplotnega otoka v Ljubljani. Obravnavano območje smo razdelili glede na strukturo pozidave in tako ločili mesto od okolice. Podrobno smo preučili katera območja so znotraj mestnega jedra najbolj dovzetna za pregrevanje in kako raba tal vpliva na razlike v temperaturi tal. V analizo smo vključili tudi posnetke satelita Landsat 5 in 7 s katerimi smo spremljali trend spreminjanja temperature tal v Ljubljani. Na podlagi dveh posnetkov Ljubljane smo uporabili primerne algoritme za določitev temperature tal in primerjali razliko med svetilno temperaturo in temperaturo tal.

5.1 Ugotovitve

Rezultati analiz z izjemo zimskega obdobja potrjujejo obstoj mestnega toplotnega otoka, ki je najbolj izrazit v poletnem času. Satelitski sistem Landsat omogoča ažurno spremljanje tovrstnega pojava in z uporabo primernih algoritmov natančno določa njegovo jakost. Znotraj mestnega jedra največje temperaturne vrednosti dosegajo industrijska območja in nakupovalno-poslovna središča, ki se poleti pogosto pregrevajo. Na teh območjih primanjkuje bodisi zelenih bodisi vodnih površin, ki imajo izrazito blagodejen vpliv na temperaturo tal. Rezultati analiz spremljanja trenda so pokazali, da je vpliv toplotnega otoka v Ljubljani prisoten že vsaj od leta 2001. Tako lahko potrdimo prvo hipotezo, da je mestni toplotni otok v Ljubljani prisoten in da je njegovo jakost mogoče izmeriti s posnetki satelitov Landsat. Druge hipoteze, da se mestni toplotni otok Ljubljane krepi, pa zaradi analize premajhnega števila starejših posnetkov ne moremo z gotovostjo potrditi.

Današnji način življenja onemogoča, da bi pojav toplotnega otoka popolnoma odstranili, lahko pa skušamo omejiti njegovo jakost. Rezultate analiz lahko obravnavamo kot ključne kazalnike, ki podajajo smernice za nadaljnji razvoj mesta. Prioritetno je treba obravnavati območja, ki se pregrevajo. Pozelenitev streh nakupovalnih središč, gradnja fontan v krožiščih, povečanje deleža javnega potniškega in kolesarskega prometa so le nekateri od mnogih dejavnikov, ki so hitro izvedljivi in izrazito vplivajo na urbano mikroklimo.

VIRI

- [1] Jernej, S. 2000. Analiza klime Ljubljane. Gradec, Univerza v Gradcu, Inštitut za geografijo Karl-Franzens: 266 str.
- [2] Oke, T. R. 1987. Boundary Layer Climates. 2th ed. New York, Routledge: 460 str.
- [3] Howard, L. 1833. The Climate of London. London Harvey and Dorton: London, UK, Vol. 2, 1818-1820.
- [4] Baumann, R. P. 2010. Remote sensing: Landsat program. New York, University of New York <http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS%20Landsat/RS-Landsat.htm>, (Pridobljeno 25. 9. 2014.)
- [5] Return Beam Vidicon (RBV) Film Only. <https://lta.cr.usgs.gov/rbv.html>, (Pridobljeno 27. 9. 2014.)
- [6] Večspektralni (MSS) skener. 2014. <http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS%20Landsat/RS-Landsat.htm>, (Pridobljeno 2. 10. 2014.)
- [7] Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije Založba ZRC-SAZU: 250 str.
- [8] Nicholas, M. 2005. History of Remote Sensing: Landsat's Multi-Spectral Scanner (MSS). http://fas.org/irp/imint/docs/rst/Intro/Part2_16.html, (Pridobljeno 2. 10. 2014.)
- [9] Qihao, W., Dengsheng, L., Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment 89: 467-483.
- [10] Srivastava, P. K., Majumdar, T. J., Bhattacharya, K. A. 2009. Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data. Advances in Space Research 43: 1563-1574.
- [11] Zhao-Liang, L., Hua, W., Ning, W., Shi, Q., Sobrino, A. J., Zhengming, W., Bo-Hui, T., Guangjian, Y. 2013. Land surface emissivity retrieval from satellite data. International Journal of Remote Sensing 3084-3127.

- [12] Emissivity: Definition and Influence in Non-contact Temperature Measurement. 2014. <http://www.keller-msr.com/temperature-pyrometers/emissivity-definition-and-influence-in-non-contact-temperature-measurement.php>, (Pridobljeno 5. 10. 2014.)
- [13] Mallick, J., Singh, K. C., Shashtri, S., Rahman, A., Mukherjee, S. 2012. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19: 348-358.
- [14] Valor, E., Caselles, V. 1996. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment* 57: 167-184.
- [15] Senanayake, I. P., Welivitiya, W. D. D. P., Nadeeka, P. M. 2013. Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. *Urban Climate* 5: 19-35.
- [16] Landsat 7 Science Data Users Handbook. 2014. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html, (Pridobljeno 15. 2. 2014.)
- [17] Van de Griend, A. A., Owe, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14, 6: 1119-1131.
- [18] Sobrino, A. J., Raissouni, N. 2000. Toward Remote Sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*: 353-366.
- [19] Sobrino, A. J., Jiménez-Muñoz, C. J., Guillem, S., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46, 2: 316-327.
- [20] Yu, X., Guo, X., Wu, Z. 2014. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 9829-9852. [doi: 10.3390/rs6109829](https://doi.org/10.3390/rs6109829)
- [21] Sobrino, A. J., Caselles, V., Becker, F. 1990. Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 44: 343-354.
- [22] Coll, C., Caselles, V., Galve, M. J., Valor, E., Nicolòs, R., Sánchez, M. J., Rivas, R. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and

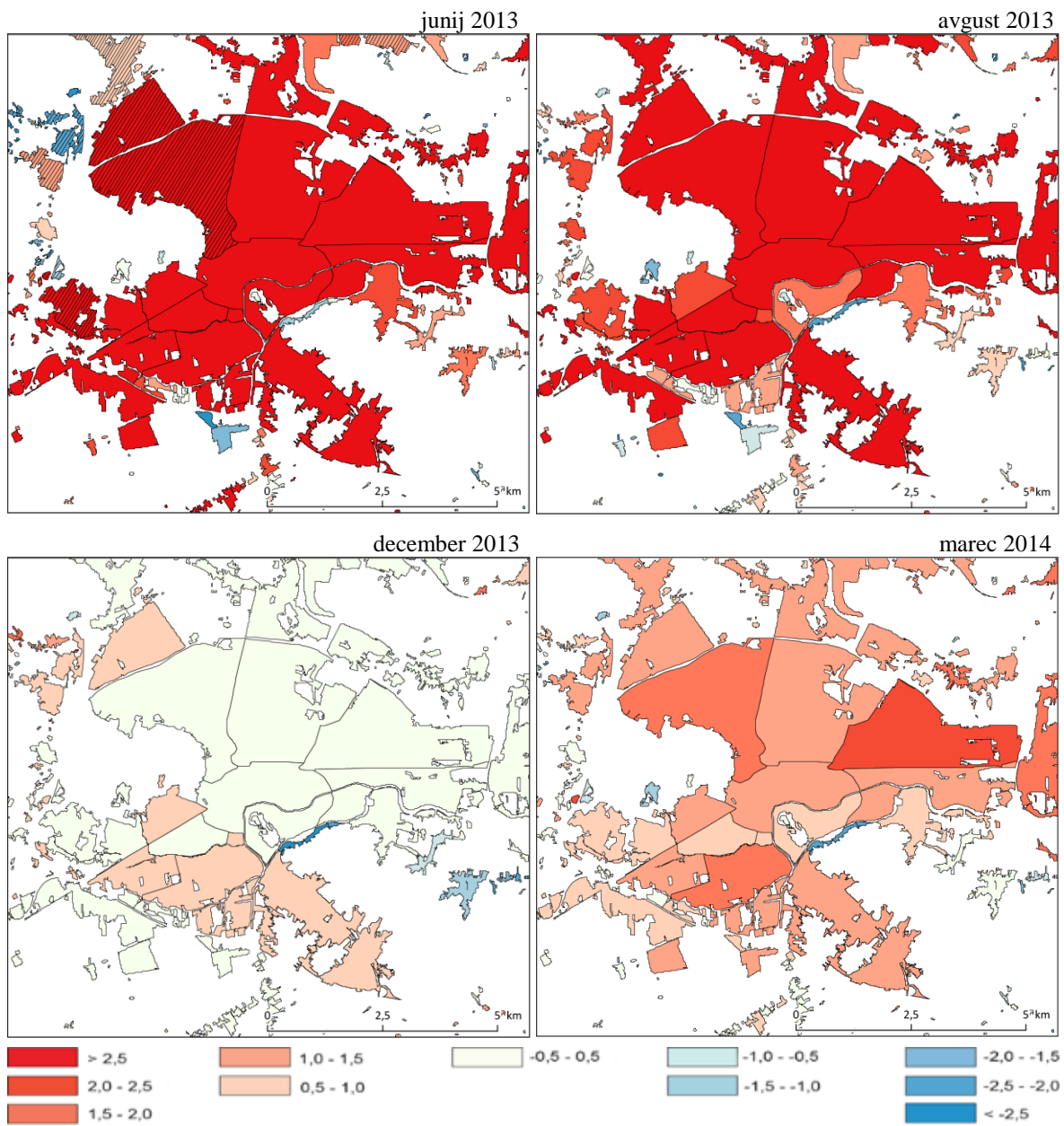
MODIS data. Remote Sensing of Environment 97: 288-300.

- [23] Kondrat'ev, K., Berliand, M. E., Zuev, V. E. 1970-1979. Atmospheric Transmittance. The Great Soviet Encyclopedia, 3th ed.
<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Atmospheric+Transmittance>,
(Pridobljeno 11. 10. 2014.)
- [24] Rozenstein, O., Zhihao, Q., Derimian, Y., Karnieli, A. 2014. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. Sensors 14, 5768-5780.
[doi: 10.3390/s140405768](https://doi.org/10.3390/s140405768)
- [25] Vpliv atmosfere na elektromagnetno valovanje. 2014.
https://www.meted.ucar.edu/nwp/model_physics/navmenu.php?tab=1&page=2.6.0,
(Pridobljeno 21. 10. 2014.)
- [26] Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data its application to the Israel-Egypt border region. International Journal of Remote Sensing 22, 8: 3719-3746.
- [27] Dolšak, K. 2007. Daljinsko zaznavanje in izdelava kart kot pomoč pri vodenju in upravljanju ob nesrečah. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta (samozaložba K. Dolšak): 114 str.
- [28] Radiometric Correction of Satellite Images: When and Why Radiometric Correction is Necessary. 2014.
<http://cwcaribbean.aoml.noaa.gov/bilko/module7/lesson3/> (Pridobljeno 23. 10. 2014.)
- [29] Jiménez-Muñoz, C. J., Cristóbal, J., Sobrino, A. J., Guillem, S., Ninyerola, M., Pons, X. 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47, 1: 339-349.
- [30] Zhihao, Q., Dall' Olmo, G., Karnieli, A. 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data. Journal of Geophysical research 106, D19, 22: 655-22, 670.

PRILOGA A: Karte odstopanj med povprečno temperaturo v posamezni coni in trenutno povprečno temperaturo



A.2: Odstopanje povprečnih temperatur posameznih območij pozidanih zemljišč od povprečne temperature vseh zemljišč v vseh treh conah. Območja manjše zanesljivosti podatkov zaradi prisotnosti oblakov so označena s šrafuro.



PRILOGA B: Grafi temperatur po profilih v smeri sever-jug in zahod-vzhod

