

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zemědělská fakulta

Studijní program: N4106 Zemědělská specializace
Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí
Katedra: Katedra krajinného managementu
Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

Diplomová práce

**Vegetace ve městě – hodnocení časových změn vlivu
vegetačního krytu na místní klima pomocí metod dálkového
průzkumu Země**

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.
Autor diplomové práce: Bc. Lenka Pavlíčková

České Budějovice, 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lenka PAVLÍČKOVÁ**
Osobní číslo: **Z15340**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Vegetace ve městě - hodnocení časových změn vlivu
vegetačního krytu na místní klima pomocí metod dálkového
průzkumu Země**
Zadávací katedra: **Katedra krajinného managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Náplní práce bude vyhodnocení časového vývoje změn vegetačního krytu a jeho vlivu na teplotní a vlhkostní charakteristiky v intravilánu města. Pro hodnocení budou použita historická data dálkového průzkumu Země (zejména družice Landsat). Hodnotícími ukazateli budou zejména teplota povrchu a vegetační spektrální indexy (např. NDVI, MSAVI, NDMI apod.). Práce bude zahrnovat následující části:

1. Vypracování literární rešerše problematiky městského mikroklimatu, tepelného ostrova města a významu vegetace v utváření mikroklimatu.
2. Seznámení se se studovanými lokalitami a praktické zvládnutí metodického postupu zpracování satelitních dat a multitemporální analýzy dat, včetně analýzy dynamických veličin (teplota povrchu apod.).
3. Zpracování získaných dat a jejich adekvátní statistické vyhodnocení.
4. Diskuse výsledků v širších souvislostech významu vegetace v městském prostředí pro utváření místního klimatu a kritické zhodnocení daného stavu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

BRUTSAERT, W., 1982. Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications, Environmental fluid mechanics. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston.
DYKYJOVÁ, D. a kol. (1989): Metody studia ekosystémů. Academia, Praha.
GEIGER, R., ARON, R. H., TODHUNTER, P. (2003): The climate near the ground. 6th edition. Rowman & Littlefield Publishers, Inc., Lanham, Maryland.
JONES H. G. 1992: Plants and microclimate. 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge.
KRAVČÍK, M., POKORNÝ, J., KOHUŤIAR, J., KOVÁČ, M. & TÓTH, E. (2007) Voda pre ozdravenie klímy - Nová vodná paradígma. Municipalia, a.s., Košice.
STŘEDOVÁ, H., BOKWA, A., DOBROVOLNÝ, P., KRÉDL, Z., KRAHULA, L., LITSCHMANN, T., POKORNÝ, R., ROŽNOVSKÝ, J., STŘEDA, T., VYSOUDIL, M., 2011. Mikroklima a mezoklima měst, mikroklima porostu. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
ZEMEK, F., et. al., 2014. Letecký dálkový průzkum Země: Teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum globální změny AV ČR v.v.i., Brno.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.**
Katedra krajinného managementu

Datum zadání diplomové práce: **13. března 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2018**


prof. Ing. Miroslav Šoch, CSc., dr. h. c.
děkan


JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentova 1698, 370 05 Česká B.


doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 13. března 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací „Vegetace ve městě – hodnocení časových změn vlivu vegetačního krytu na místní klima pomocí metod dálkového průzkumu Země“ zpracovala sama s přispěním vedoucího práce a používala jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. V souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 20. dubna 2018

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych ráda vyjádřila poděkování doc. Ing. Jakubu Bromovi, Ph.D. za důležité připomínky a trpělivé vedení práce. Mé díky také patří rodině, především mému bratrovi, za velkou podporu.

Abstrakt

Městský tepelný ostrov (UHI) je fenomén znatelně vyšších teplot ve městě v porovnání s okolím. Práce se zaměřuje na možný vliv expanze města na teplotu povrchu města, tedy na vliv na intenzitu městského tepelného ostrova. Pro studii je zvoleno město Cáceres ve stejnojmenné provincii Španělska. Vstupní hodnoty modelu jsou získány pomocí multispektrálních snímků Landsat. Analýza družicových snímků ukázala, že funkční vegetační pokryv a vodní plochy významně snižují teplotu povrchu, a mohou tak mít vliv na zmírnění efektu UHI. Studie však neprokázala vliv expanze města na intenzitu městského tepelného ostrova. Možným vysvětlením je, že si město s postupnou zástavbou v průběhu let udržuje konstantní poměr oblastí s nepropustnými materiály k oblastem s vegetací.

Klíčová slova:

Městský tepelný ostrov, UHI, teplota povrchu, LST, vegetační index, NDVI, SAVI, NDMI, dálkový průzkum Země, Landsat, rozšiřování města, Cáceres, Extremadura

Abstract

The urban heat island (UHI) is a phenomenon of noticeably higher temperatures in the cities as compared to their respective surrounding areas. This thesis aims at characterizing the influence of city expansion to the urban heat island phenomenon. The study is carried out in a city of Caceres in the Spanish province of the same name. A model input data is obtained with Landsat multispectral images. The analysis of satellite images shows that functional vegetation cover and water surfaces help in mitigating urban heat island effect. However, the Caceres city expansion does not influence the urban heat island intensity. A possible explanation for it is as the city expanded the ratio of vegetation to dry land remains constant in time.

Key words:

Urban heat island, UHI, land surface temperature, LST, vegetation index, NDVI, SAVI, NDMI, remote sensing, Landsat, urban sprawl, Cáceres, Extremadura

Obsah

1. Úvod	9
2. Městský tepelný ostrov	9
2.1 Indikátory městského tepelného ostrova	10
2.1.1 Sky view faktor	10
2.1.2 Geometrie zástavby	11
2.1.3 Městské klimatické zóny	11
3. Urbanizace	12
3.1 Důsledky urbanizace	12
3.2 Problematika rozšiřování měst způsobem tzv. urban sprawl	13
4. Vegetace	14
4.1 Význam vegetace při utváření klimatu	14
4.2 Vegetace v urbánním prostředí	15
4.3 Vztah odraženého elektromagnetického záření a vegetačních vlastností	15
5. Dálkový průzkum Země	16
5.1 Využití dálkového průzkumu pro studium vegetace	16
5.2 Využití dálkového průzkumu pro studium vybraných vegetačních indexů	16
5.3 Využití dálkového průzkumu k posouzení problematiky UHI	18
6. Materiál a metody	18
6.1 Studované území	18
6.2 Potřebné podklady a příprava dat	21
6.3 Zpracování dat	22
6.3.1 Vegetační indexy	23
6.3.2 Teplota povrchu (LST)	25
6.3.3 Standardizace směrodatnou odchylkou	27
6.4 Statistické zpracování dat	27
7. Výsledky	28
7.1 Vegetační indexy	28
7.1.1 Index NDVI	28
7.1.2 Index SAVI	33
7.1.3 Index NDMI	35
7.1.4 Základní statistická vyhodnocení – vegetační indexy	38
7.2 Teplota povrchu (LST)	38
7.2.1 Srovnání LST pro vybrané roky	39

7.2.2	Celkový vývoj LST.....	44
7.2.3	Základní statistická vyhodnocení – LTS	47
8.	Diskuse	48
9.	Závěr	50
10.	Seznam literatury.....	51

1. Úvod

Svět převážně v posledních desetiletích zažívá rozmach urbanizace, což se v perspektivě krajiny projevuje jako proces transformace využívání půdy. Voda, vegetace, rostliny a další prvky krajiny jsou nahrazeny asfaltem, cementem, kovy a dalšími nepropustnými materiály. Náhrada původních povrchů způsobuje řadu změn např. v intenzitě odraženého dlouhovlnného záření, tepelné kapacitě materiálu či přenosu tepla. Tyto změny stojí za utvářením efektu městského tepelného ostrova, fenoménu znatelně vyšších teplot ve městě v porovnání s okolím. Dochází k poklesu kvality ovzduší, četnosti výskytu srážek a je ohroženo zdraví a kvalita života obyvatel měst. Efekt městského tepelného ostrova se stal jedním z podstatných environmentálních problémů současnosti. Pro zhodnocení efektu městského tepelného ostrova jsou získávána data teploty vzduchu, teploty povrchu nebo obojího. Zkoumán je také vliv vegetace na zmírnění tohoto efektu. (Zhang et al., 2012).

Cílem práce je studie vlivu expanze města a vlivu vegetačního krytu na teplotu povrchu města. Pro hodnocení budou použita historická data dálkového průzkumu Země, resp. snímky družice Landsat. Vývoj vegetačního krytu ve městě i v jeho okolí bude hodnocen vegetačními indexy NDVI, SAVI a NDMI.

2. Městský tepelný ostrov

Již na začátku 19. století byl vědecky dokázán teplotní rozdíl mezi městským a venkovským prostředím. Ve 40. letech 20. století byl pak poprvé užit termín městského tepelného ostrova vyjadřující atmosférické teplo města ve srovnání s jeho okolím (Zhang et al., 2010).

Studie městského tepelného ostrova (UHI; urban heat island) poukazuje na jedny z největších environmentálních problémů 20. a 21. století: klimatické změny a populační růst (Stewart a Oke, 2012). Více než polovina světové populace žije ve městech a je očekáváno, že se toto číslo bude zvyšovat (Waffle et al., 2017). Městský tepelný ostrov je nejčastěji měřen ve standardní výšce 1–2 metru nad povrchem v přilehlé vrstvě atmosféry. V této vrstvě je vzduch nejčastěji teplejší než v té samé výšce ve venkovském prostředí (Stewart a Oke, 2012).

Existuje řada příčin vyšších teplot v městských oblastech. Z důvodu přítomnosti vysokých budov ze suchých nepropustných stavebních materiálů ve městech je

pohlcováno více slunečního záření, než je tomu ve venkovské oblasti. Vyšší tepelnou admitancí stavebních materiálů je více tohoto slunečního záření převáděno na citelné teplo. Kvůli zastavěné půdě, nedostatku vodních ploch a rostlin dochází k nižší evapotranspiraci. Ohřátý vzduch při povrchu je z důvodu zástavby rozptylován pomaleji. Efektem tzv. sky view faktoru je uvnitř města udrženo více dlouhovělného terestriálního záření. Dále je uvolňováno teplo z vnitřku budov, automobilů a dalších zdrojů (Oke, 2002).

Teplotní rozdíly mezi městem a venkovskou oblastí jsou často největší během jasných, bezvětrných nocí. Povrchové materiály ve městě totiž zachovávají většinu tepla kvůli nízkému albedu mnohem déle než vegetace v okolí (Dwivedi a Mohan, 2018).

Především v oblastech, kde jsou v letních měsících teploty velmi vysoké efekt UHI prohlubuje diskomfort a potenciálně zvyšuje tepelný stres i úmrtnost a zvyšuje také náklady na systémy ochlazování. Ty zvyšují energetickou náročnost oblasti, fungují lokálně a odváděné teplo na druhé straně ovzduší ještě více otepluje (Stewart a Oke, 2012).

Intenzita UHI je definována jako rozdíl mezi teplotou vzduchu či povrchu zkoumané oblasti města a teplotou mimoměstské (referenční) oblasti. Intenzita UHI závisí na využití krajiny a urbánních parametrech charakterizujících bezprostřední okolí místa měření (např. poměr zastavěné plochy, poměr zelené plochy, sky view faktor atd.) (Unger, 2009).

2.1 Indikátory městského tepelného ostrova

2.1.1 Sky view faktor

Sky view faktor (dále jen SVF) je významným indikátorem městského mikroklimatu. SVF, označován jako Ψ_s , je poměr přijatého (nebo vyzařovaného) záření plochým povrchem k vyzařovanému (nebo přijatému) záření v celém hemisférickém prostředí (Watson a Johnson, 1987). Jedná se o bezrozměrnou jednotku a nabývá hodnot (0; 1), kdy hodnota 0 představuje zcela zastavěné prostory, hodnota 1 prostory otevřené. Geometrické charakteristiky městských ploch, výška zástavby, šířka ulic či mezery mezi budovami mají významný dopad na městské klima. Parametr SVF definuje, jak účinně povrch ztrácí teplo zářením do oblohy (Oke, 1988). Popisuje tak povrchovou radiační rovnováhu, což je důležitá veličina při zkoumání intenzity UHI. Různé hodnoty SVF vedou k rozdílnému rozložení radiačních profilů, a tedy i rozdílnému rozložení energie. Budovy (kvůli horizontální a vertikální nerovnosti prvků) brání otevřenému nebi a

zpomalují ochlazení povrchu během jasných nocí. Dlouhovlnné záření má tak tendenci zůstat zachyceno v přilehlé vrstvě atmosféry a teplo uniká pomaleji, dochází k jeho přebytku. Jedná se o důležitý mechanismus vedoucí k fenoménu UHI (Zhu et al., 2013).

2.1.2 Geometrie zástavby

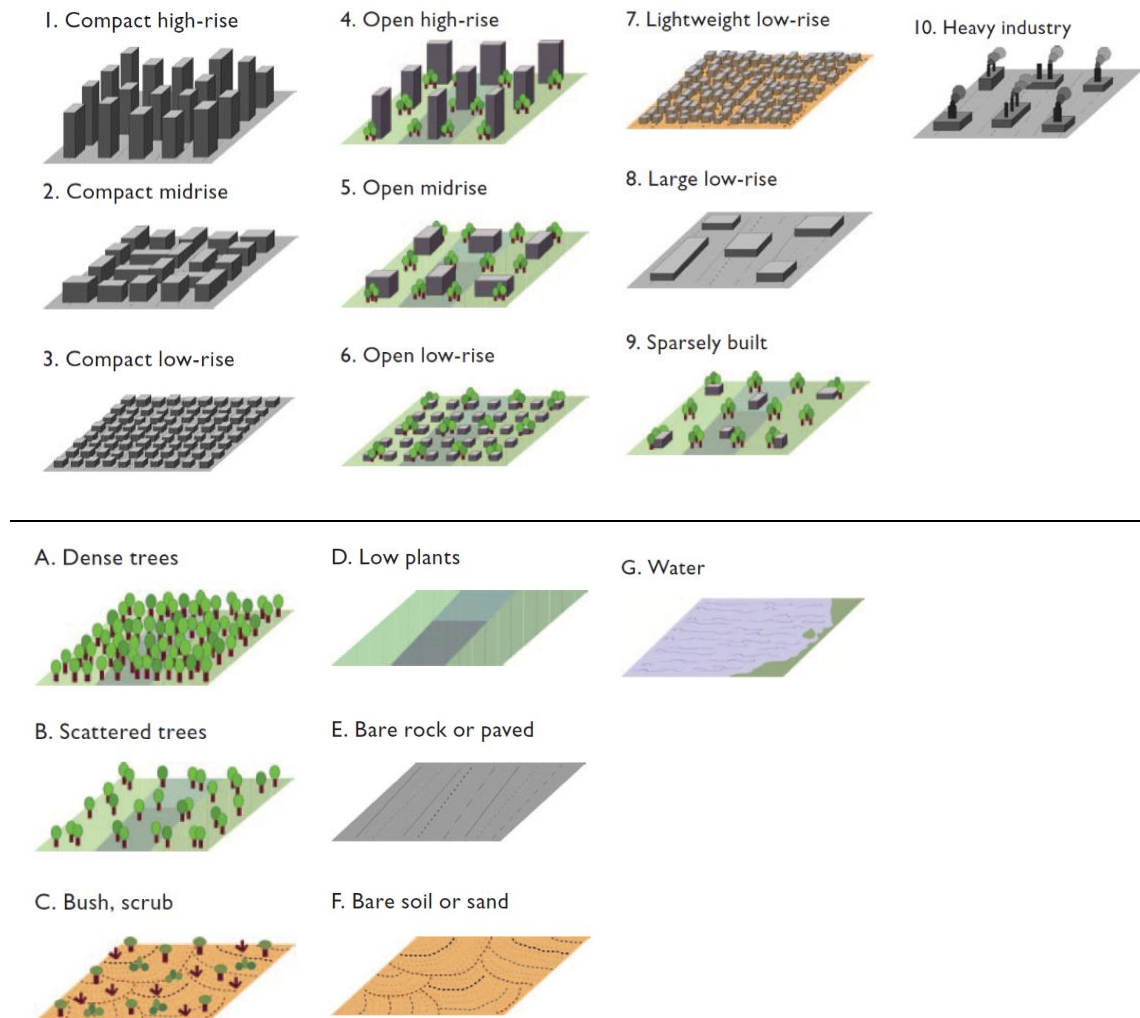
Geometrická konfigurace zástavby, úzce spojená s efektem Sky view faktoru, ovlivňuje šíření dlouhovlnného záření a větrných podmínek (Wang et al., 2016). Poměr mezi výškou budov (H) a vzdáleností mezi nimi (W) je klíčovým parametrem městské geometrie. Ovlivňuje přichodí a odchozí sluneční záření, tok záření a proudění větru (Sharmin et al., 2017). Bylo zjištěno, že v nočních hodinách, je-li hodnota poměru H/W vyšší (tzn. hluboký městský kaňon, a tedy menší viditelnost oblohy), zvyšuje se i efekt nočního UHI, protože efektem SVF je omezen rozptyl odchozího dlouhovlnného záření (Stewart a Oke, 2012). Na druhou stranu, maximální denní teploty se se zvyšujícím poměrem H/W snižují (Wang et al., 2016).

Poměr H/W lze však použít pro studium městských částí, kde se předpokládá, že tento poměr zůstane konstantní po celé délce kaňonu, tzn. v oblastech, kde jsou homogenní souvislé bloky (Sharmin et al., 2017). Na tuto skutečnost naráží Barlow (2014). Uvádí, že heterogenita povrchu by měla být ve studiích zvažována důrazněji. Stavební vzorce budov jsou často nepravidelné. Pokud by byla diverzita zástavby ignorována, výsledky při výzkumu mikroklimatu by mohly být nesprávné. Diverzitu městské geometrie lze definovat standardní odchylkou poměru H/W . Začleněním diverzity by mohla být vyřešena i protichůdná role hlubokých městských kaňonů v utváření denního a nočního UHI. Srovnáním vlivu heterogenity zástavby se zabývali i Sharmin et al. (2017), kteří ve své studii zjistili, že městské kaňony v heterogenní zástavbě mohou vykazovat teplotu vzduchu nižší o 1 °C – 4 °C ve srovnání s městskými kaňony v homogenní zástavbě.

2.1.3 Městské klimatické zóny

Vzhledem k variaci zástavby v různých částech města a jejího vlivu na mikroklima byly vytvořeny obecné klasifikace městských zón. Z jednotlivých studií zohledňujících různá kritéria bylo vytvořeno rozdělení města na lokální klimatické zóny (LCZs; local climate zones). Lokální klimatické zóny (Obr. 1) jsou oblasti města se shodnou urbánní strukturou, stejným pokryvem povrchu, stavebním materiálem/propustností a specifickým antropogenním činností. Členění LCZs obsahuje 17 kategorií, které jsou rozděleny na „typ zástavby“ (1–10) a „typ půdního pokryvu“ (A–G) (Stewart a Oke, 2012).

Velikost UHI je v tomto případě rozdílem teplot LCZ (např. $\Delta T_{LCZ 1 - LCZ D}$), nikoli rozdílem teplot mezi městem (m) a venkovem (v) (ΔT_{m-v}). V analýze velikosti UHI lze měřit prostorové rozložení UHI, a to právě díky společným povrchovým vlastnostem porovnávaných zón (Stewart a Oke, 2012).



Obr. 1 – Lokální klimatické zóny (Stewart a Oke, 2012)

3. Urbanizace

3.1 Důsledky urbanizace

Proces urbanizace způsobuje v intravilánu města i jeho okolí změny ve vlastnostech povrchu a vlastnostech atmosféry; dochází k přeměně radiačních, vlhkostních a aerodynamických vlastností, a tím je narušena přirozená klimatická a hydrologická rovnováha. Nepropustný konstrukční materiál činí povrch voděodolným a stává se zásobníkem tepla. Bloky budov způsobují zachycení radiace a stagnaci vzduchu.

Vzhledem k těmto zásadním změnám lze konstatovat, že městské oblasti zapříčiňují změny klimatu (Oke, 2002).

Města se navíc neustále rozšiřují, obyvatelstvo se z venkovských oblastí stěhuje do měst a na druhé straně dochází k suburbanizaci, kdy se městské obyvatelstvo stěhuje na okrajové části města, či za jeho hranice (Waffle et al., 2017). Odhad přesné míry ovlivnění klimatu městskou zástavbou by byl ideální v případě měření klimatických hodnot v oblasti před výstavbou, se kterými by bylo možné porovnat současné pozorování. Toto je však možné pouze ve vzácných případech. Místo toho se využívá srovnání klimatických dat z města s klimatickými měřeními mimo město, a to buď metodou dálkového průzkumu Země nebo využitím meteorologických stanic (Zhang et al., 2010).

3.2 Problematika rozšiřování měst způsobem tzv. urban sprawl

Nekontrolované rozšiřování města, tzv. urban sprawl, je nevhodně plánovaná expanze města na předměstskou oblast. Jedná se o celosvětový problém v oblasti plánování územního rozvoje. Řešení tohoto jevu závisí na regulaci dvou hlavních faktorů; populačním růstu a záboru půdy na obyvatele.

Nejpodstatnějším důvodem rozšiřování měst je nárůst městského obyvatelstva, kdy dochází buď k přirozenému zvýšení počtu městského obyvatelstva anebo k migraci venkovského obyvatelstva do města. Město se stává lákavějším díky dostupnějším službám a možným pracovním příležitostem (Bhatta, 2010).

Vzhledem k nekontrolovanému a nekoordinovanému rozšiřování měst dochází k negativním dopadům. Urban sprawl je zodpovědné za zvýšení dopravy, změny v prostorové struktuře měst a zastavění volné půdy. Vzhledem k horizontálnímu růstu měst dochází k rozšíření efektu tepelného ostrova, a to jak geograficky, tak i z hlediska intenzity. To platí zejména tehdy, nejsou-li v nově vystavěné oblasti navrženy parky či přírodně blízké zóny. Expanze tohoto typu navíc zahrnuje pozitivní zpětnovazební smyčku, což zhoršuje efekt tepelného ostrova. Se stoupající teplotou vzniká poptávka po klimatizačních zařízeních, chladičích vody, vzduchu, což vyžaduje vyšší výkon elektráren. Většina elektráren používá fosilní paliva, která jsou zdrojem vyšších emisí znečišťujících látek. Vznikají delší cestovní vzdálenosti, což má za následek vyšší spalování paliv a větší produkci oxidu uhličitého, uhelnatého, siřičitého, oxidu dusíku, přízemního ozonu, těkavých organických uhlíků a mikroskopických částic. Vytváří se

smog a kyselá dešť. To přispívá ke globální změně klimatu. Globální klimatické změny pak mohou zintenzivnit vliv městského tepelného ostrova (Frumkin, 2002).

Se zastavěnou nepropustnou plochou se mění i režim vody. Horizontální rozrůstání měst vede ke zvyšující se nepropustné ploše, kde se srážky nemohou vsáknout do země, doplnit hladiny podzemní vody, a dochází tak ke zvýšenému celkovému objemu odtoku. Během silných dešťů mohou být tyto faktory spoluviníkem destrukce vegetace či vzniku povodní (Jacquin et al., 2008).

4. Vegetace

4.1 Význam vegetace při utváření klimatu

Rostliny mohou procesem fotosyntézy a transpirace ovlivnit teplotu atmosféry. Při fotosyntéze je využívána energie ze Slunce a spotřebováván oxid uhličitý k výrobě sacharidů potřebných k růstu. Spotřebováváním oxidu uhličitého, který je jedním ze skleníkových plynů, tak rostliny zpomalují oteplování planety. Procesem transpirace dochází k výparu vody z listů do okolí. Při výparu vody dochází ke spotřebě latentního tepla výparného, přibližně 2500 J na 1 ml vody (Geiger et al., 2003). Vlivem vysoké spotřeby tepelné energie na výpar nedochází k významnému ohřevu prostředí a teplotní režim se stabilizuje (Hesslerová et al., 2013). Vysoký výpar může v důsledku vést ke zvýšení tvorby oblačnosti, která snižuje množství záření dopadajícího na zemský povrch (Rabin et al., 1990) a zároveň se může zvyšovat úhrn srážek. Rostliny tedy mohou mít značný vliv na globální klima. Nastalo-li by rozsáhlé sucho, ztrátou vegetace by mohly být povrchové teploty ještě vyšší (Pielke, 2001).

Vedlejší klimatické účinky lidské činnosti mají na krajinu zásadní dopad. Jsou výsledkem zásahu do přírodního systému. Negativně ovlivňují přirozenou energii a vodní cykly, čímž je ovlivněn a narušen celý klimatický systém (Oke, 2002).

Odstranění vegetace výrazně mění vlastnosti povrchu a tím i tepelné, vlhkostní a aerodynamické charakteristiky, čímž je ovlivněna energetická bilance území. Je-li území s odstraněnou vegetací rozsáhlé, změněná tepelná a vodní rovnováha může vést ke změnám klimatu a hydrologie území. Půda bez vegetace má menší schopnost vsaku, snižuje se evapotranspirace a odtokové poměry. Odstraněním vegetace vzniká nová geometrie povrchu a nová hodnota albeda (Oke, 2002).

4.2 Vegetace v urbánním prostředí

Vzhledem k tomu, že na zvyšování teploty má vliv vlastnost povrchu a jeho schopnost absorpce dopadajícího slunečního záření, jsou zvažovány možnosti vyššího pokrytí městských oblastí vegetací různého typu. Rozdíl povrchové teploty mezi místy pokrytými vegetací a asfaltovým povrchem či střechou může nabývat 12-15 °C, přičemž vyprahlé povrchy absorbují stejné množství záření jako betonové (Dwivedi a Mohan, 2018). Vegetace má schopnost latentním tokem tepla ochlazovat pocitové teplo okolí (Gage a Cooper, 2017). Rozdíl teploty vzduchu v bezprostředním okolí teras budov s vegetací a bez vegetace pak může nabývat 3 až 4 °C. Vedle parků a stromořadí jsou proto ve městech v rámci udržitelného rozvoje stále častěji navrhovány instalace vegetačních ploch, jako jsou např. „zelené střechy“ nebo i „vertikální zahrady“ budov. Takové plochy jsou schopny zachytit znečišťující látky a snížit účinek tepelného ostrova absorpcí tepla a odpařováním (Dwivedi a Mohan, 2018).

4.3 Vztah odraženého elektromagnetického záření a vegetačních vlastností

Viditelná část elektromagnetického spektra je v rozmezí 400 nm – 700 nm. V této části spektra je spektrální odrazivost vegetace výrazně ovlivněna právě pigmentací listu, především chlorofylem. Tyto pigmenty odrážejí záření především v zelené části spektra (500 nm) a absorbují modré (450 nm) a červené (670 nm) vlnové délky. Především karotenem, xantofylem a antokyany je ovlivněna další pigmentace listu, která ovlivňuje absorpci, a tedy i odrazivost. Pigmentace je nedílnou součástí fyziologické funkce listu. Je proto možné ji použít jako ukazatel fyziologického stavu vegetace.

Blízká infračervená (NIR) část elektromagnetického spektra se pohybuje od 700 nm do 1200 nm. Především strukturou listu je dána odrazivost v NIR; v těchto vlnových délkách dochází k odrazivosti v buněčných stěnách a na rozhraní mezi vzduchem a vodou uvnitř listu.

Krátkovlnné infračervené spektrum se pohybuje od 1300 nm do 2400 nm a je ovlivněno absorpcí vody. Vlhkost, obsažená uvnitř listu absorbuje krátkovlnné infračervené záření, což umožňuje odhad obsahu vody v rostlině (Wulder et al., 2009).

5. Dálkový průzkum Země

5.1 Využití dálkového průzkumu pro studium vegetace

Prostřednictvím monitorování se řada vědců i organizací snaží o pochopení prostorové a časové dynamiky vegetace, jež má tak podstatný vliv na utváření životního prostředí (Lawley et al., 2016). Multispektrální snímky dálkového snímání nesou informace o spektrálních a prostorových vlastnostech sledovaných objektů. Digitální zpracování obrazu satelitních dat je dále možno zpracovat různými algoritmy a matematickými operacemi. Charakteristiky odrazivosti sledovaných objektů pak projektují jejich vlastnosti do multispektrálních snímků. Toho bylo využito při navržení vegetačních indexů, které zvýrazní podstatné charakteristiky vegetace v družicovém snímku (Gandhi et al., 2015).

5.2 Využití dálkového průzkumu pro studium vybraných vegetačních indexů

NDVI, resp. Normalized Difference Vegetation Index, je jedním z indexů vycházejících z dat získaných dálkovým průzkumem Země. Index vypovídá o vlastnostech vegetace, která má tendenci absorbovat záření viditelného spektra 400 nm – 700 nm, které využívá k fotosyntéze a na druhou stranu silně odráží záření blízkého infračerveného spektra 700 nm – 1100 nm.

Družice jsou vybaveny detektory, které umožňují detekovat záření ve viditelném a infračerveném spektru. Rozdíl detekovaných hodnot pak vypovídá o fotosyntetické kapacitě vegetace. Pokud je malý rozdíl mezi intenzitou odraženého záření ve viditelném a infračerveném spektru, jedná se pravděpodobně o řídkou zeleň, tundry, pouště. Pokud je rozdíl velký, jedná se pravděpodobně a hustou vegetaci, např. lesy¹. Průměrné hodnoty NDVI pro daný měsíc porovnané s historickými průměry se často používají jako indikátor sucha².

SAVI reprezentuje tzv. „Soil-adjusted vegetation index“. Motivací pro zavedení tohoto indexu byla citlivost jednoduššího vegetačního indexu NDVI na jas půdy (Huete, 1988). V oblastech s prořídou vegetací, kde dochází k mnohem vyšším odrazům od půdy

¹ NASA, Earth Observatory, web: https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php, citace dne 11. 3. 2018

² NASA, Earth Observatory, web: https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_3.php, citace dne 11. 3. 2018

a písku než od samotné vegetace, je obtížné zjistit odraz vegetace NDVI indexem. SAVI (resp. OSAVI, MSAVI) index korekcí odrazu půdy tuto skutečnost zohledňuje a je pro zkoumání takových oblastí vhodnější (Barati et al., 2011). Výsledky studie vegetace v Kuvajtu dokazují, že SAVI index je vhodnějším indexem pro použití v aridních a semiaridních oblastech (Almutairi et al., 2013).

Na následujícím obrázku (Obr. 2) je znázorněn příklad závislost indexů NDVI a SAVI na hustotě vegetace tvořené v dané oblasti listy bavlny. Je patrné, že vliv odstínu okolní půdy je pro řidší vegetaci u indexu NDVI značný, u indexu SAVI je díky korekcím vliv minimální. SAVI index zejména pro hustší vegetaci nabývá vždy nižších hodnot. Pro vegetaci o nízké hustotě s okolní světlou půdou se mohou indexy NDVI a SAVI svými hodnotami velmi přibližovat (Huete, 1988).

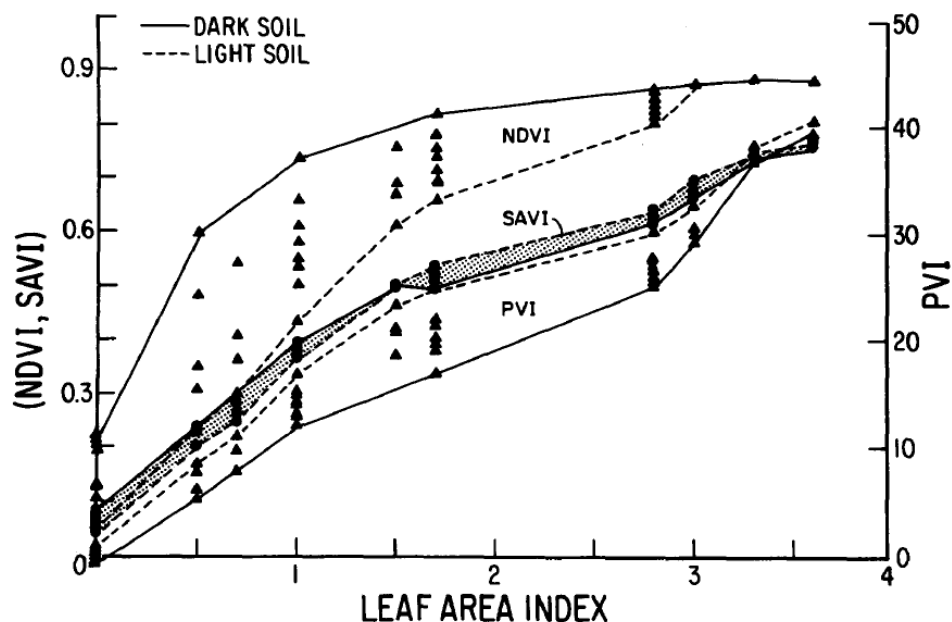


FIGURE 4. Vegetation index response and soil variations of the NDVI, SAVI ($L = 0.5$), and PVI as a function of cotton leaf area index.

Obr. 2 – Vztah mezi indexy NDVI a SAVI (Huete, 1988)

NDMI neboli Normalized Difference Moisture Index je dalším z indexů získaných ze satelitního průzkumu Země. Index porovnává hodnoty z detektorů NIR a SWIR, tj. detektorů blízkého infračerveného spektra, respektive krátkovlnného infračerveného spektra.

Změny odrazivosti v oblasti spektra SWIR (např. 1240 nm) vypovídají o změnách obsahu vody jak ve vegetaci, tak v houbovitě struktuře mezofylu vegetačního krytu. Naopak odrazivost v oblasti spektra NIR (např. 860 nm) je ovlivněna vnitřní stavbou

listů, jejich pevným obsahem, nikoliv obsahem vody. Odečtením těchto dvou parametrů lze tedy získat informaci o vlhkosti vegetace (Gao, 1996).

5.3 Využití dálkového průzkumu k posouzení problematiky UHI

Technologie vzdáleného snímání, která poskytuje velké množství prostorových dat celého povrchu Země, je hlavním nástrojem pro hodnocení urbanizace a životního prostředí. Díky historickým archivům získaných nepřetržitým sledováním Země od roku 1972 jsou obzvláště data z družice Landsat vhodná pro zkoumání růstu měst a jeho vlivu na místní teplotu (Son a Thanh, 2018). Rao (1972) jako první využil dálkový průzkum Země k posouzení problematiky UHI a vytvořil graf distribuce povrchové teploty s využitím dat tepelného infračerveného záření ze satelitních snímků. Multispektrální snímky od té doby využila řada vědců a urbanistů k zhodnocení teploty povrchu a vytvoření dlouhodobých modelů růstu měst a jejich vlivu na životní prostředí (Wang et al., 2018). Technologie tepelného infračerveného satelitního snímání umožňuje monitorovat městský tepelný ostrov (Zhang et al., 2012).

Studie městské povrchové teploty a studie o utváření UHI a jeho příčin jasně ukazují, že povrchová teplota (LST; land surface temperature) má úzkou souvislost s rozšířením zastavěných oblastí ve městech, a zároveň poukazují na pozitivní účinek zeleně v městských oblastech (Son a Thanh, 2018; Tsou et al., 2017).

6. Materiál a metody

6.1 Studované území

Zájmovým územím pro účely diplomové práce je město Cáceres, které se nachází ve stejnojmenné provincii autonomního společenství Extremadury ve středozápadní části Španělska (Obr. 3 a Obr. 4). Rozloha katastrálního území města činí 27,5 km², průměrná nadmořská výška je 457 m n.m.³, k roku 2017 zde žije 95 917 obyvatel⁴ (Obr. 5).

Klima Cáceresu je velmi teplé. V průběhu roku jsou velké teplotní rozdíly. V červenci, nejteplejším měsíci roku, činí průměrná teplota 25,9 °C. V lednu jsou naopak nejnižší teploty, s průměrem kolem 7,6 °C. Průměrná roční teplota je 16 °C. Průměrné

³ SIG de Cáceres, web: <http://sig.caceres.es/>, citace dne 10. 12. 2017

⁴ Instituto Nacional de Estadística, web: <http://www.ine.es/>, citace dne 10. 12. 2017

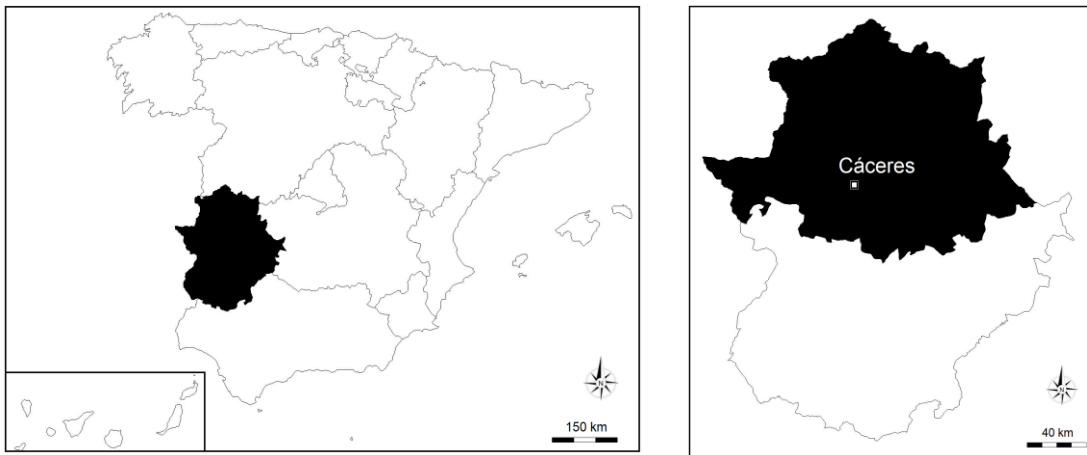
roční srážky činí 518 mm. Nejsušším měsícem je červenec s 4 mm průměrných srážek, srážkově nejbohatším měsícem je březen, s průměrem 66 mm (Pérez Fernández, 2011).

Španělské autonomní společenství Extremadura se řadí svými podmínkami do středomořského klimatu s vlivem klimatu atlantického. Podnebí je charakterizováno skutečností, že rok je rozdělen na dvě kontrastní období; v podzimních až jarních měsících chladná a deštivá, v letních měsících extrémně suchá. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 14 °C a 17 °C a průměrné roční srážky se pohybují od 1 200 mm v horských oblastech severně od provincie Cáceres až po 450 mm v údolí řeky Guadiana. Povětrnostní vlivy jsou mírné (Pérez Fernández, 2011).

Provincie Cáceres v Extremaduře patří do povodí řeky Tajo. Celé její povodí má rozlohu 80 600 km², přičemž zhruba 30 % rozlohy náleží právě Extremaduře a 16 738 km² Cáceresu. Velký zásah lidstva v minulosti, kterým utrpěla právě řeka Tajo, však zapříčinil drastickou změnu přirozených režimů této řeky, její kontaminaci a také výrazné omezení toku. V Extremaduře je značné množství vodních nádrží, které tok v podstatě udržují. V celém povodí řeky Tajo jsou průměrné roční srážky 669,6 mm, zatímco potenciální průměrná roční evapotranspirace dosahuje 761 mm. Je však nutno dodat, že dochází k rozdílům závislejících jak na období, tak na oblasti, čímž jsou hodnoty skutečné evapotranspirace nižší. Nejvyšších hodnot evapotranspirace nabývá v měsících od června do září, a to od 100 mm až 140 mm za měsíc. V měsících od listopadu do března nabývají měsíční hodnoty mezi 10 mm a 30 mm. Srážky mají opačné výkyvy; v období od října do května vykazují maximum (mezi 60 mm a 80 mm měsíčně) a v měsících červnu až září minimum (mezi 10 mm a 40 mm měsíčně). Přítomností vodních nádrží a rybníků, které udržují konstantní plochu vodní hladiny, však dochází k většímu výparu vody, což ovlivňuje výslednou průměrnou roční hodnotu evapotranspirace (Prieto Clemente, 2003).

Vzhledem ke klimatu s charakterem vzácných srážek vyskytujících se především v podzimním a zimním období, velmi krátkými jary a vysokými letními teplotami, je ekologickým základem této oblasti sklerofylní (tvrdolistý) les, nazýván též středomořský les. Ze stromů se zde vyskytují hlavně duby. Nejčastěji lze v oblasti spatřit dub

cesmínovitý. Dalšími stromy jsou dub korkový, dub pyrenejský, dub portugalský, kaštanovník, olše, jasan, houština, vřes, levandule a bylinné patro⁵.



Obr. 3 – Autonomní společenství Španělska Extremadura a jeho další členění na provincie Cáceres a Badajoz⁶

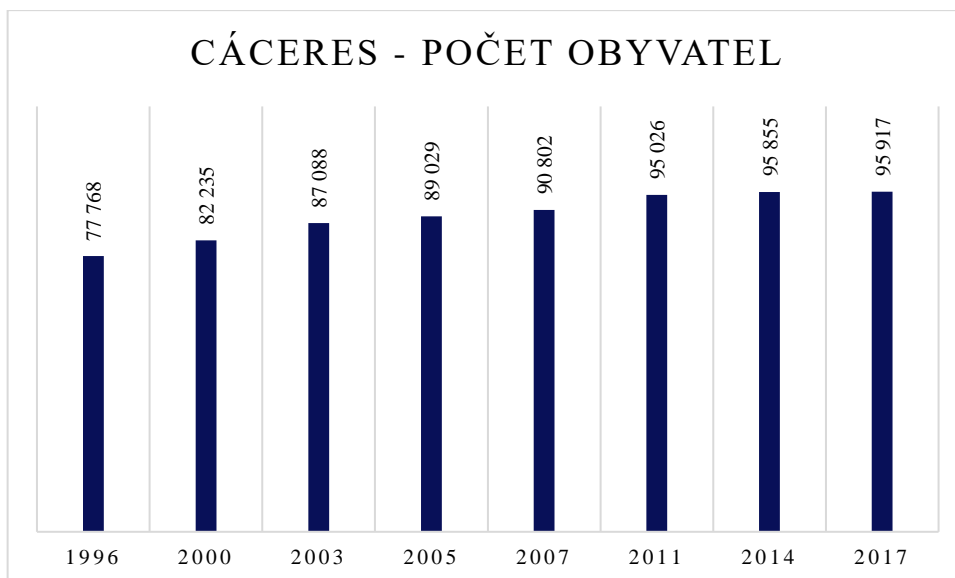


Obr. 4 – Obrázek znázorňující vývoj města Cáceres 1986 (vlevo) a 2012 (vpravo)⁷

⁵ Flora y fauna de Extremadura, web: http://www.oupe.es/es/mas-areas-educacion/secundaria/ciencias-de-la-naturaleza/proyadarvecienciasnaturalezaextremadura/Galeria%20documentos/CCNN_1%20ESO_EXT_interiores.pdf, citace dne 8. 2. 2018

⁶ Upraveno podle webu d-maps.com, dne 8. 2. 2018

⁷ Cáceres Histórica, web: <http://cacereshistorica.caceres.es/>, dne 30. 11. 2018



Obr. 5 – Vývoj počtu obyvatel města Cáceres od roku 1996 do roku 2017⁸

6.2 Potřebné podklady a příprava dat

Vybrané území bylo sledováno v letním období od roku 1984 do roku 2017. Pro vybrané území byl měsícem pro pozorování změn stanoven měsíc červen, resp. červenec, z důvodu kulminujících teplot. Na uživatelském rozhraní EarthExplorer⁹, vyhledávacím nástroji vyvinutým United States Geological Survey (USGS), byla identifikována vyhledávací oblast, dále datové sady a metadata zobrazení. Za družicovou technologii byl zvolen program Landsat, jejíž snímky jsou využívány ve výzkumech klimatických změn, dopadů lidských činností a mnoho aspektů na Zemi.

Původním záměrem bylo zvolit data v jednom měsíci pravidelně jdoucí po sobě každé dva roky, avšak oblačnost či nedostupnost potřebné pozice snímku tomu nedovolily. Výsledná časová řada tedy není pravidelná. V rámci přípravy dat byly atmosférické, geometrické a radiometrické korekce snímků zpracovány algoritmem ESPA¹⁰.

Referenční data použitých družicových snímků jsou zobrazena níže (Tabulka 1). V textu studie, resp. obrázcích, grafech či tabulkách, jsou pak povětšinou použity pouze roky, které referují na konkrétní data získaných snímků.

Rozdíly mezi jednotlivými družicemi jsou nejen v letech jejich užívání, ale také v prostorovém rozlišení, počtu pásem a typu senzoru. Znalost typu družice je v případě

⁸ Instituto Nacional de Estadística, web: <http://www.ine.es/>, citace dne 8. 2. 2018

⁹ EarthExplorer, web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, citace dne 3. 10. 2017

¹⁰ ESPA – USGS, web: <https://espa.cr.usgs.gov/>, citace dne 6. 10. 2017

výzkumu podstatná pro správné výpočty vegetačních indexů a teploty, a to především kvůli odlišné kombinaci pásem.

Datum	Rok	Družice
13.06.	1984	Landsat 5
22.06.	1987	Landsat 5
27.07.	1991	Landsat 4
17.06.	2000	Landsat 7
27.06.	2003	Landsat 5
29.06.	2007	Landsat 5
24.06.	2011	Landsat 5
16.06.	2014	Landsat 8
24.06.	2017	Landsat 8

Tabulka 1 – Referenční data použitých snímků družice Landsat pro sledované období od roku 1984 do roku 2017

Dalšími podklady studie byly aktuální i historické ortofoto mapy¹¹.

6.3 Zpracování dat

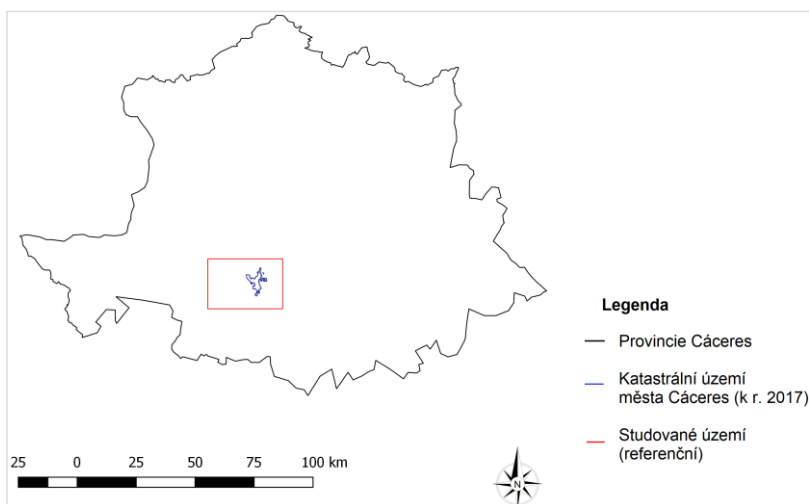
Podle aktuální katastrální mapy¹² Španělska (k r. 2017) bylo vektorově vymezeno území města Cáceres (Obr. 6). Toto území spadá do souřadnicového systému ETRS 89, UTM zóna 29N. Kolem tohoto území byla vymezena referenční plocha o cca 670 km² (Obr. 7), podle které byly vytvořeny výřezy družicových snímků Landsat.

Ze získaných dat Landsat po korekci byly vypočteny spektrální vegetační indexy a teplota povrchu. Zkoumanými indexy byly NDVI, SAVI a NDMI.

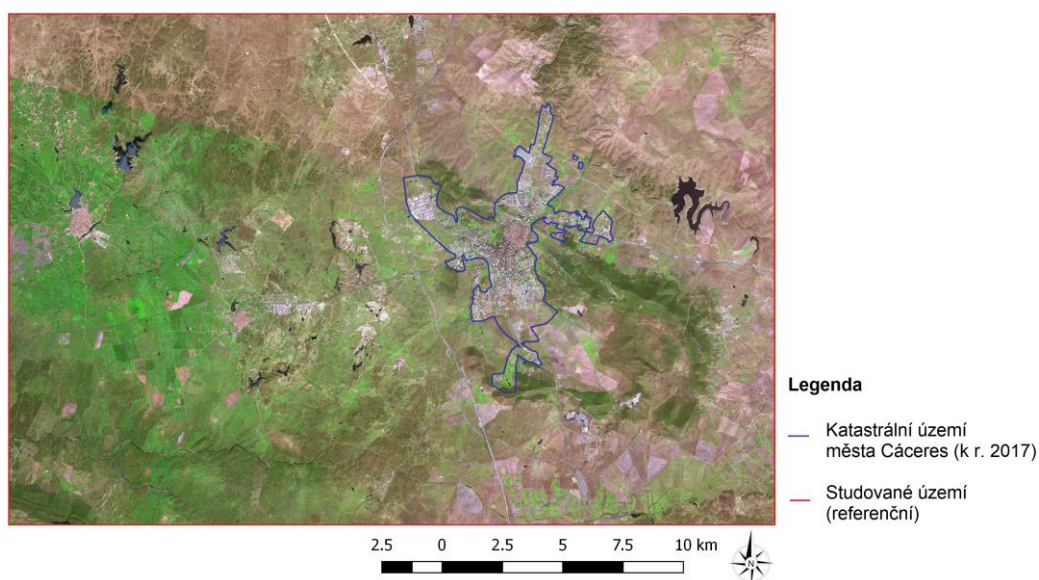
V programu QGIS byly vypočteny zonální statistiky studovaných parametrů pro vybrané oblasti, které byly dále zpracovány v Excelu.

¹¹ Fototeca Digital, web: <http://fototeca.cnig.es/>, citace dne 6. 10. 2017

¹² Portal de la Dirección General del Catastro, web: <http://www.catastro.meh.es/>, citace dne 9. 10. 2017



Obr. 6 – Orientační mapa studované oblasti



Obr. 7 – Aktuální ortofoto mapa¹³ sledovaného území s vyznačením města Cáceres

6.3.1 Vegetační indexy

Výzkumy povrchové teploty (LST) ukazují, že změny plošného rozložení tepelných toků, a povrchové teploty jsou funkcí měnícího se obsahu vody v půdě a vegetačního krytu. V místech s větším vegetačním krytem byla zjištěna vyšší míra výměny latentního tepla, zatímco výměna zjevného tepla byla podporována oblastmi s řídkým zastoupením vegetace, jako jsou městské oblasti. Studie UHI se tak stále více zaměřují na vztah mezi teplotou povrchu a množstvím vegetace. Tento vztah pak slouží k odvozování biofyzikálních parametrů, mapování půdního krytu a k analýzám změn.

¹³ Fototeca Digital, web: <http://fototeca.cnig.es/>

Pro zkoumání městského tepelného ostrova dálkovým snímáním je využíván zejména index NDVI, a to především jako ukazatel výskytu vegetace, pro následný odhad vlivu vegetace na teplotu povrchu (Weng et al., 2004).

Pro tuto studii byly využity tři vegetační indexy: NDVI, SAVI a NDMI.

Výpočet indexu NDVI

Vegetační index NDVI (Normalized difference vegetation index) je indikátorem množství a stavu vegetace. Nabývá hodnot $\{-1; 1\}$, přičemž hodnoty blíže k 1 představují hustou vegetaci, zatímco hodnoty blíží se k -1 představují půdu nebo vodu (Dwivedi a Mohan, 2018). Z dat se vypočítá podle vzorce:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}},$$

kde NIR ... záření v blízké infračervené oblasti spektra

RED ... záření v červené oblasti spektra

Výpočet indexu SAVI

Vegetační index SAVI (Soil adjusted vegetation index) je modifikací NDVI indexu. Jeho úloha je především v místech s menším vegetačním pokryvem, kde zmírňuje vliv odrazivosti půdy. Nabývá hodnot $\{-1; 1\}$, výsledné hodnoty mají obdobný význam jako NDVI index (Huete, 1988). Z dat se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$\text{SAVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED} + L)} * (1 + L),$$

kde NIR ... záření v blízké infračervené oblasti spektra

RED ... záření v červené oblasti spektra

L ... korekční konstanta (nabývá hodnot od 0 do 1)

L = 0 ... pro místa s bohatou vegetací

L = 1 ... pro místa bez vegetace

L = 0,5 ... standardní konstanta

Pro případ této studie byla zvolena konstanta $L = 0,5$.

Výpočet indexu NDMI

Vegetační index NDMI (Normalized Difference Moisture Index) je indexem pro zjišťování obsahu vody v rostlinách, respektive vlhkosti povrchu. Hodnoty se pohybují

v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$, přičemž vyšší hodnoty znázorňují vyšší obsah vody (Gao, 1996). Z dat se vypočítá podle vzorce:

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}},$$

kde NIR ... záření v blízké infračervené oblasti spektra
 SWIR ... krátkovlnné záření

6.3.2 Teplota povrchu (LST)

Teplota povrchu je dána energetickou bilancí povrchu. Závisí na albedu, vegetačním krytu a půdní vlhkosti. Pro získání teploty povrchu ze satelitních snímků je využito Planckova zákona vyjadřujícího závislost intenzity záření (absolutně černého tělesa) na frekvenci. Satelitní snímače umožňují díky měření záření na úrovni povrchu atmosféry (TOA; top of atmosphere) odvodit jasovou teplotu (Weng et al., 2004). Jasová teplota je teplota černého tělesa, která je totožná s teplotou sledovaného objektu pro stejnou vlnovou délku (Mersal, 2016).

TOA záření je kombinací záření z povrchu Země a upwelling radiance¹⁴ a downwelling radiance¹⁵ z atmosféry. Pro získání teploty jasu povrchu z TOA záření je třeba redukovat účinky atmosféry (Weng et al., 2004). Tyto korekce byly v této studii provedeny automaticky webovým rozhraním ESPA¹⁶. Před výpočtem teploty povrchu (LST) je nutno teplotu jasu upravit hodnotami spektrální emisivity, která určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo (Weng et al., 2004).

Výpočet teploty povrchu (LST)

K výpočtu teploty byla použita metoda podle Sobrino et al. (2004). Vzorec je uveden níže:

$$\text{LST} = \frac{T_b}{\varepsilon^4} - 273,15 \quad (\text{°C; K, -}),$$

kde T_b ... jasová teplota (Brightness temperature)
 ε ... emisivita povrchu (Land surface emissivity)

¹⁴ Tepelné záření emitované atmosférou směrem do vesmíru

¹⁵ Tepelné záření emitované atmosférou směrem k povrchu

¹⁶ ESPA – USGS, web: <https://espa.cr.usgs.gov/>, citace dne 6. 10. 2017

Emisivita materiálu, dána vlastnostmi jako je solární odrazivost, tepelná emisivita a tepelná kapacita, určuje, jak bude sluneční energie odražena, vyzařována a absorbována. Tím ovlivňuje tepelné podmínky (Dwivedi a Mohan, 2018).

Emisivita povrchu (LSE; Land surface emissivity) byla ve studii klasifikována na základě hodnoty NDVI indexu, jež rozčlení oblasti podle množství vegetace (Sobrino et al., 2004). Hodnota emisivity závisí na drsnosti povrchu, množství a povaze vegetačního krytu, tepelných vlastnostech a vlhkosti krytu (Weng et al., 2004).

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_1 = (1 - RED) & NDVI < 0,2 \\ \varepsilon_2 = (0,004 * P_v + 0,986) & 0,2 \leq NDVI \leq 0,5, \\ \varepsilon_3 = \lambda & NDVI > 0,5 \end{cases}$$

kde	ε ...	celková emisivita povrchu
	ε_1 ...	emisivita povrchu pro místa s prakticky holou půdou
	ε_2 ...	emisivita povrchu pro kombinace míst bez vegetace s místy s vegetací
	ε_3 ...	emisivita povrchu pro místa s vysokým množstvím vegetace
	RED ...	hodnoty odrazivosti z pásma červeného záření
	λ ...	konstanta; hodnota typické emisivity pro vegetaci $\lambda = 0,99$
	P_v ...	vegetační podíl,

přičemž

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2, \text{ kde } NDVI_{max} = 0,5 \text{ a } NDVI_{min} = 0,2$$

Vegetační podíl (P_v) slouží k vyjádření souvislosti mezi množstvím přítomné vegetace (v dané oblasti prezentované pixelem) a hodnoty emisivity (v daném pixelu). NDVI indexu je ve vzorci využito pro hodnotu vyjadřující množství vegetace v každém pixelu. Vegetační podíl nabývá hodnot $\langle 0; 1 \rangle$. Nižší hodnoty P_v znázorňují zastavěnou nebo holou půdu, hodnoty blíží se 1 pak vegetaci (Dwivedi a Mohan, 2018).

Standardizace dat

V předložené práci je nutné porovnat soubory dat, které se liší jak svým průměrem, tak i rozpětím hodnot. Pokud by nebyly provedeny žádné úpravy souborů dat, bylo by porovnání značně obtížné a data s velkým rozptylem hodnot by ovlivňovala výsledek více, než odpovídá jejich významu (Lepš a Šmilauer, 2016).

Možností standardizace dat je celá řada, například směrodatnou odchylkou nebo rozpětím. V předkládané práci byla použita metoda standardizace dat směrodatnou odchylkou.

6.3.3 Standardizace směrodatnou odchylkou

Mezi často používané způsoby standardizace patří standardizace směrodatnou odchylkou. Zde se uvažuje normální (Gaussovské) rozdělení hodnot. Od každého prvku souboru se odečte průměrná hodnota všech prvků souboru, čímž se zajistí centrování – průměrná hodnota poté vychází nulová. Následně se centrovaná data vydělí směrodatnou odchylkou původního souboru, a po této úpravě směrodatná odchylka standardizovaných dat nabývá hodnoty 1. Pro normální rozdělení pak standardizovaná data budou s pravděpodobností 99,7 % nabývat hodnot od -3 do 3, resp. hodnot od -2 do 2 s pravděpodobností 95 %¹⁷.

$$z = \frac{x - \mu(x)}{\sigma(x)},$$

kde z ... výsledná standardizovaná hodnota
 x ... hodnota souboru (hodnota teploty pro pixel)
 $\mu(x)$... průměrná hodnota (teploty) daného snímku
 $\sigma(x)$... směrodatná odchylka (teploty)

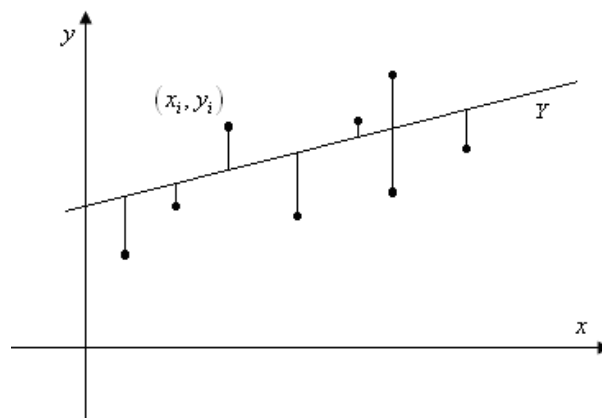
Ze standardizovaných dat byl následně vypočten aritmetický průměr pro území města. Velikost referenčního území pak byla zvolena tak, aby případné změny na území intravilánu města neměly významný vliv na průměrné hodnoty celého zájmového území.

6.4 Statistické zpracování dat

Lineární regrese

Při lineární regresi je množina bodů se souřadnicemi $[x_i, y_i]$ reprezentujících soubor dat proložena přímkou, tj. lineárním předpisem $y = a \cdot x + b$, který splňuje podmínku, že součet kvadrátů rozdílů hodnot y a y_i je minimální (Obr. 8). U lineární regrese lze dále vypočítat koeficient lineární korelace R^2 , který nabývá hodnot od 0 do 1 a vypovídá o tom, jak těsná je shoda mezi lineárním trendem a trendem dat (Pezzullo, 2013).

¹⁷ Matematická biologie: E-learningová učebnice, web: <http://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analiza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--vicerozmerne-rozdeleni-pravdepodobnosti--transformace-dat--standardizace-dat>, citace dne 8. 1. 2018



Obr. 8 – Ilustrace lineární regrese¹⁸

Dále se někdy uvádí F-test významnosti regrese (také test významnosti R^2), (Pezzullo, 2013).

Korelace

Korelace vyjadřuje vzájemný vztah mezi veličinami x a y . Pokud se jedna z veličin mění, mění se určitým způsobem i druhá, resp. naopak. Míru korelace vyjadřuje korelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do 1 a vypovídá o tom, jaká je mezi veličinami závislost. Hodnota -1 vyjadřuje zápornou korelaci, tedy nepřímou závislost. Hodnota +1 pak zcela přímou závislost a hodnota 0 nekorelovanost, tzn. hodnoty nemají normální rozdělení se střední hodnotou, a nelze tak statisticky zjistit lineární závislost mezi hodnotami. Hodnoty však na sobě záviset mohou. Při zjištění závislé korelace nelze vyhodnotit, jaká veličina je příčinou a jaká následkem (Pezzullo, 2013).

7. Výsledky

7.1 Vegetační indexy

7.1.1 Index NDVI

Ze zpracování dat satelitního snímku z 13. 6. 1984 je patrné, že největší zastoupení vegetace se nachází jihovýchodně od města Cáceres (Obr. 9). Zde se rozléhá pohoří Sierra de la Mosca, kde roste především dub cesmínovitý, strom typický pro tuto oblast. Dále je patrná vysoká hodnota NDVI v jihozápadní části sledovaného území, kde začíná hornatá oblast Sierra de San Pedro, též pokrytá lesem dubu cesmínovitého. Hodnoty NDVI kolem 0,44 znázorňují řídké lesy, se snižující hodnotou NDVI se řídkost lesa zvyšuje a prosvítá

¹⁸ Regresní a korelační analýza, web: <https://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP09/KAP09.HTM>, citace dne 4. 4. 2018

holá půda. Oblast trpí v letní sezóně vysokými teplotami, vegetace je vyschlá, přičemž místy se vyskytují skaliska bez vegetace (hodnoty NDVI do 0,1). Vodní plochy nabývají záporné hodnoty NDVI. Nejviditelnější vodní plocha je východně od města Cáceres vodní nádrž Embalse de Guadiloba. Zastavěné malé obce v okolí také znázorňuje nízká hodnota NDVI.

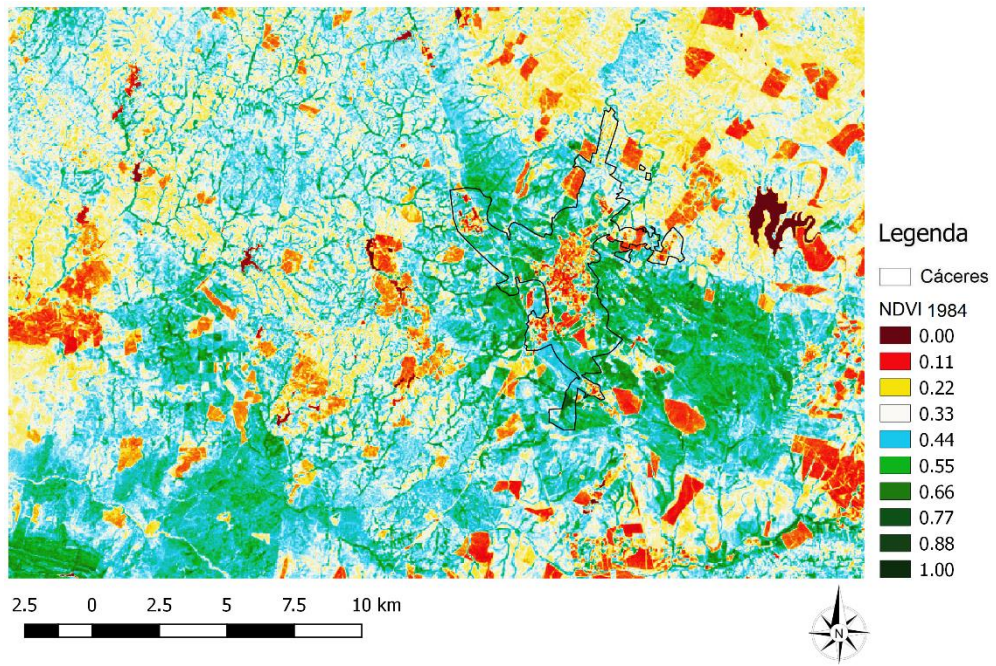
Srovnání rozložení hodnot NDVI indexu v letech 1984 a 2017

Pro porovnání byly vybrány snímky studované oblasti z 13. 6. 1984 a 24. 6. 2017, tedy takové, mezi nimiž je největší časový rozestup. Je patrné, že v průběhu 33 let došlo k razantní změně rozdělení hodnot v NDVI indexu (Obr. 9 a Obr. 10). Ačkoli se zastoupení lesů tolik neliší, vegetační i půdní pokryv vysychá.

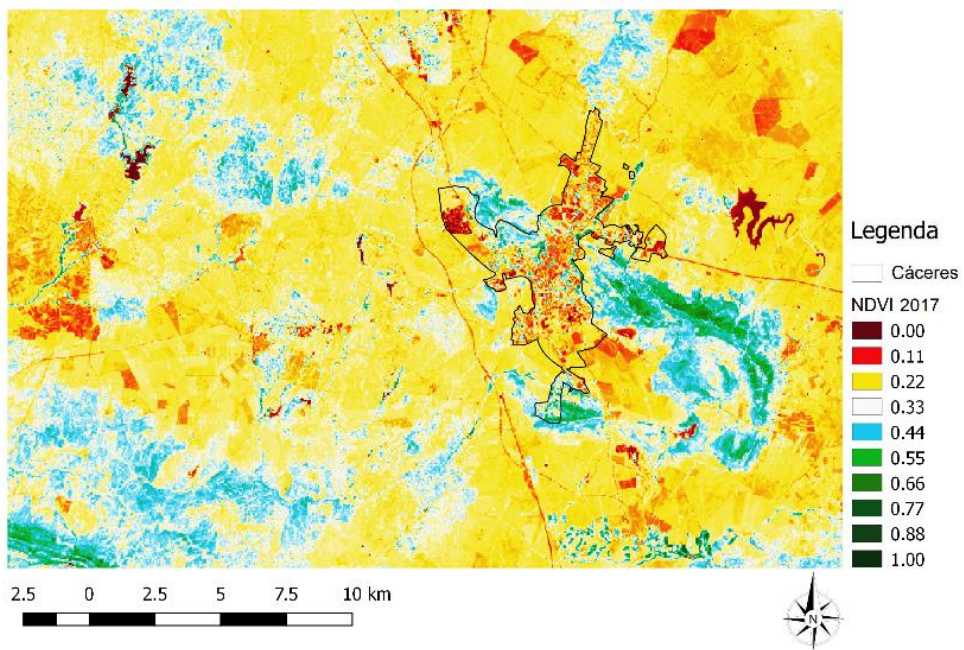
Pro porovnání situace ve městě Cáceres bylo vyznačeno aktuální katastrální území města, podle katastrální mapy z roku 2017. Lze tak sledovat, jak se město během let rozšířilo a vegetaci nahradila zástavba.

V červnu 1984 bylo město podstatně méně zastavěno, vyšší hodnoty NDVI vykazují městské parky a příroda (cca 0,4 – 0,7), která v té době nepatřila do území města, nízké hodnoty (cca 0,1 – 0,2) vykazují naopak zastavěné oblasti města, ale také pole.

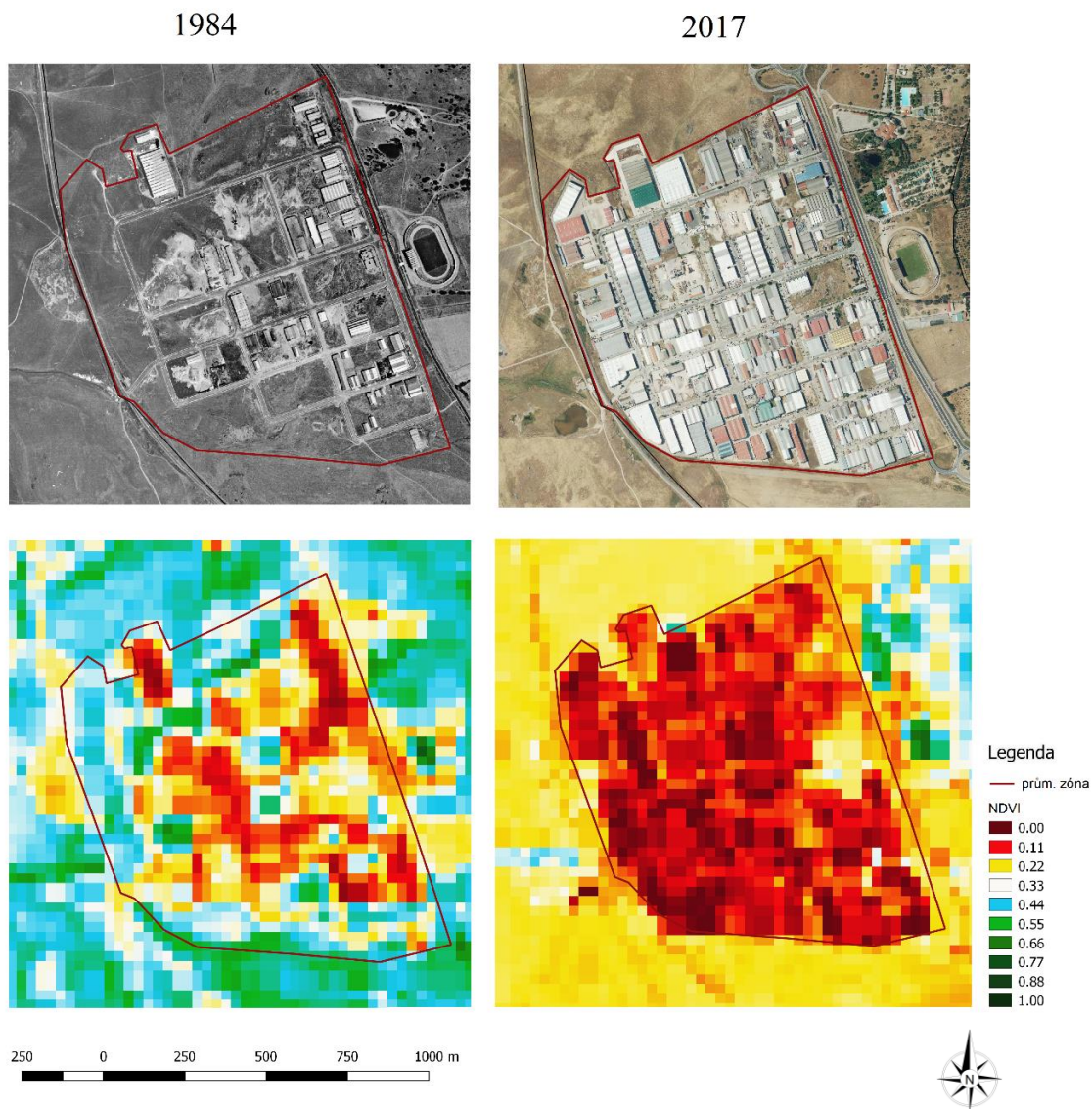
Ve městě k červnu roku 2017 nabývají nejvyšších hodnot NDVI parky (NDVI cca 0,5); Parque del Príncipe, Paseo de Cánovas, Parque del Rodeo a další plochy městské zeleně. Nízká hodnota NDVI se nachází především v urbanizovaných částech s malým zastoupením vegetace (budovy, silnice a další zpevněné plochy). V severozápadní části města je znatelná oblast s velmi nízkým NDVI indexem. Zde se nachází hustě zastavěná průmyslová část (Polígono Industrial Las Capellanías) s vzácným výskytem vegetace. Tato industriální zóna se od roku 1984 značně rozšířila, vegetaci nahradila zástavba (Obr. 11).



Obr. 9 – NDVI pro referenční území - 1984



Obr. 10 – NDVI pro referenční území - 2017



Obr. 11 – Ortofoto mapa¹⁹ a mapa indexu NDVI průmyslové zóny v severozápadní části města Cáceres k 1984 a 2017

Vývoj NDVI indexu ve městě a v okolí

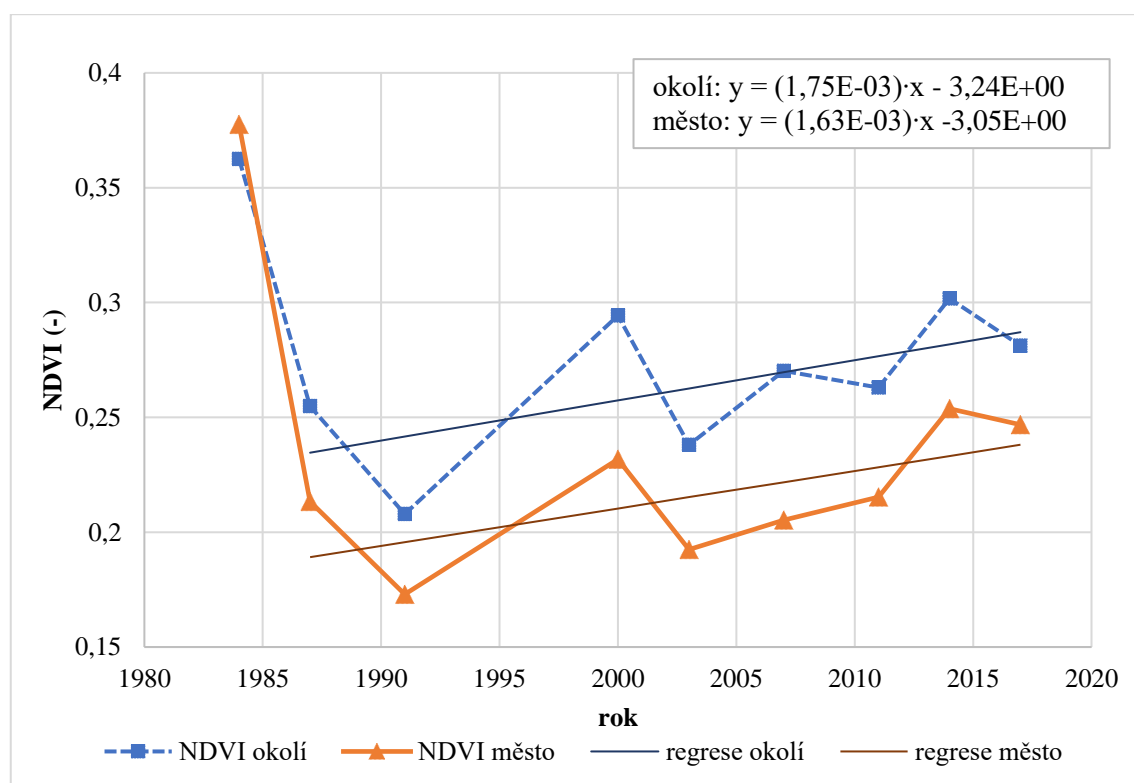
Vývoj NDVI indexu ve městě Cáceres (Obr. 12) ukazuje, že NDVI index mezi pozorovanými daty let 1984 a 1991 se prudce snižuje. Pokles hodnoty NDVI indexu především v roce 1991 lze vysvětlit vyšším suchem v území v tomto roce pozorování, kdy pro studii byl zvolen měsíc červenec, nejteplejší měsíc z doby pozorování. Vyprahlé oblasti pak vykazují podobnou hodnotu jako materiál zástavby.

NDVI index v území města je proti okolí, resp. zbytku referenčního území, od roku 1987 systematicky posunutý.

¹⁹ Fototeca Digital, web: <http://fototeca.cnig.es/>, citace dne 6. 10. 2017

To, že ve městě NDVI index (0,38) v r. 1984 nabývá téměř totožné hodnoty jako v okolí (0,36), lze vysvětlit malým procentem tehdejší zástavby katastrálního území města (vymezeného k roku 2017). Město v tomto roce dokonce vykazuje mírně vyšší průměr indexu než okolí, a to z toho důvodu, že ve velké části okolí je půdní pokryv značně vysušen, což ovlivňuje celkovou průměrnou hodnotu NDVI indexu okolí.

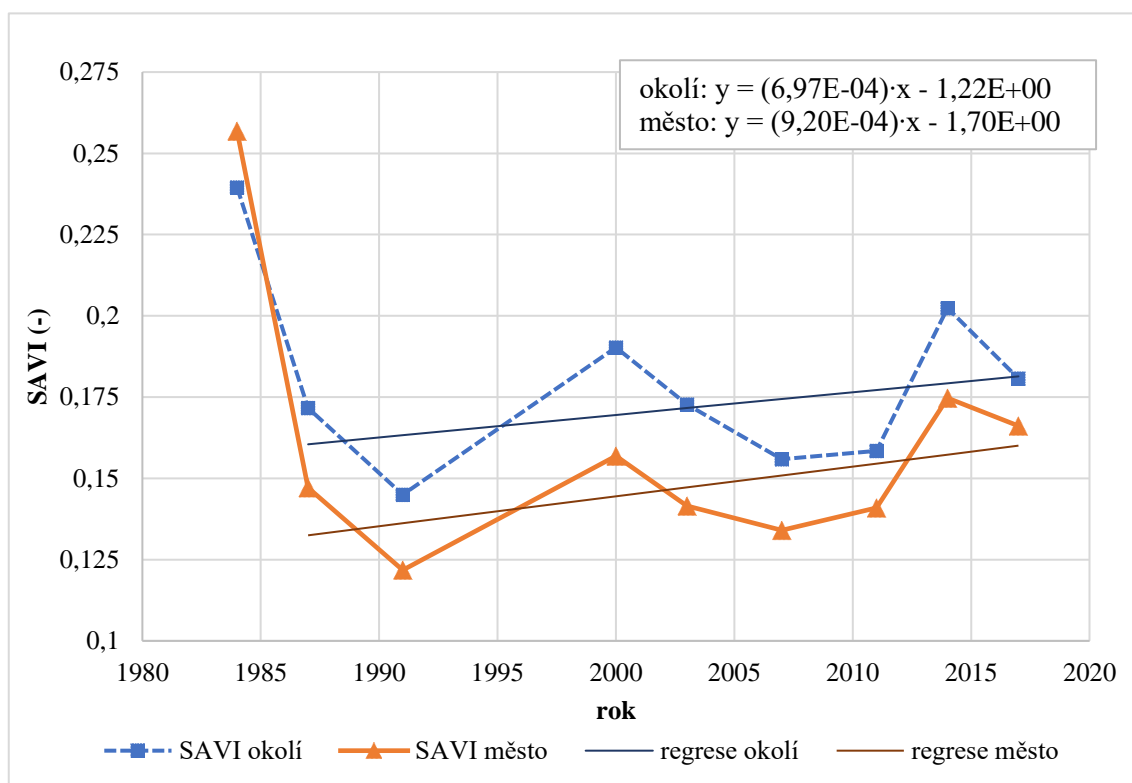
Se zvyšující se zástavbou města v letech však nelze pozorovat očekávaný zvyšující se rozdíl NDVI města oproti NDVI okolí. Město vykazuje podobný trend ve vývoji NDVI indexu jako v okolí, a to i přesto, že se fyzické vlastnosti území města mění, resp. se v něm nachází více nepropustných ploch. V tomto případě, vzhledem k nově zastavěným plochám, a přesto podobnému trendu vývoje NDVI indexu jako v okolí (od r. 1987), lze konstatovat, že katastrální území města (vyznačeného k r. 2017) si při zastavení nové oblasti ponechává přibližně stejný poměr zeleně jako před zástavbou, tzn. s nově zastaveným územím přibývá i doprovodná zeleň. Zároveň si město zachovává podobný poměr funkční zeleně k plochám bez vegetace jako okolí.



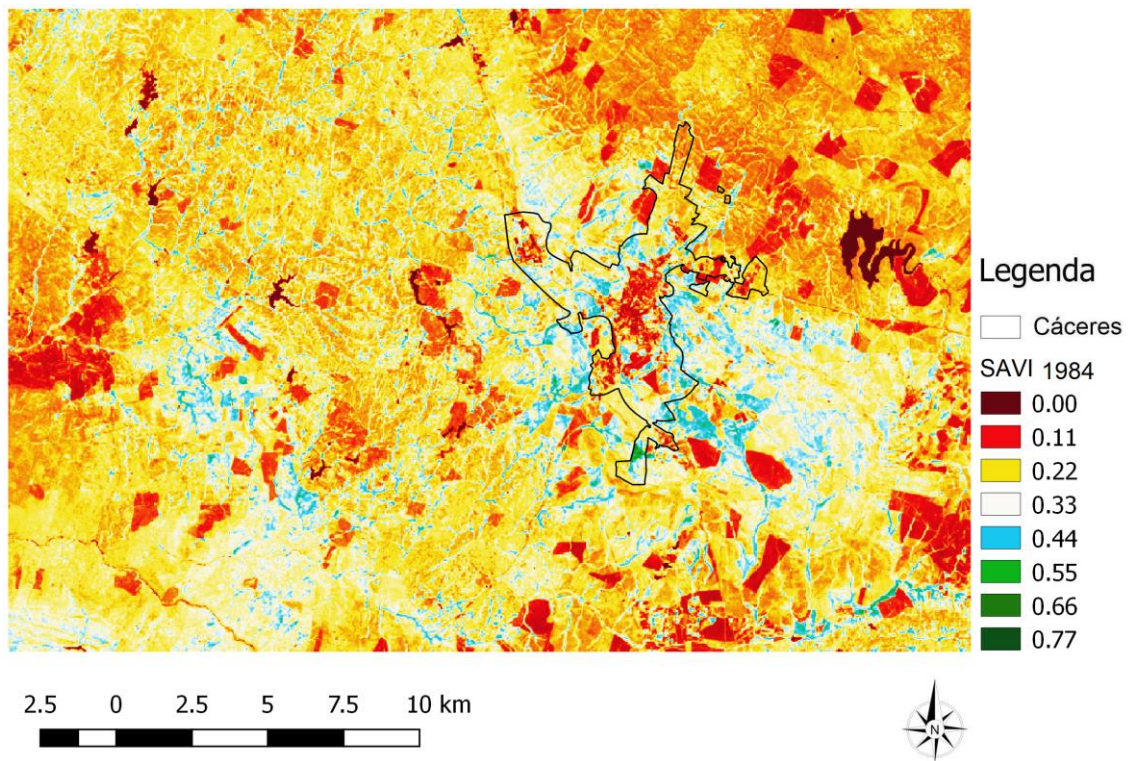
Obr. 12 – Porovnání vývoje NDVI indexu ve městě a v okolí, regresní přímka od r. 1987

7.1.2 Index SAVI

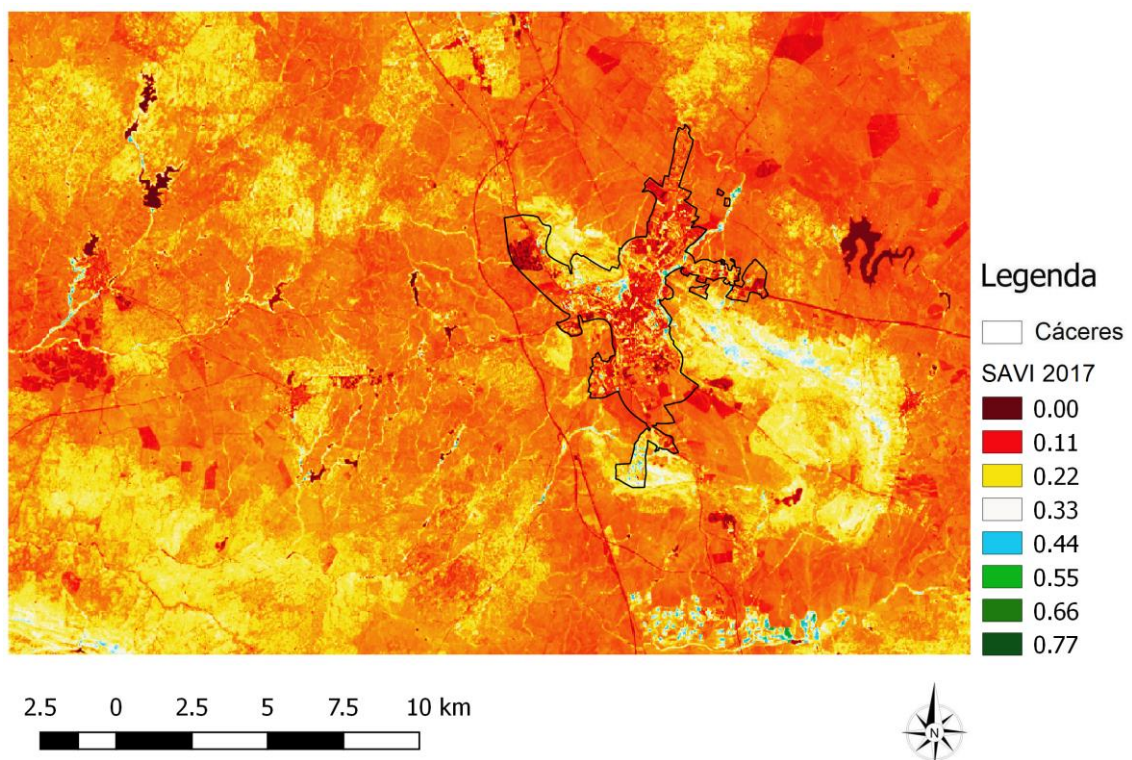
Studovaná oblast je ovlivněna semiaridním klimatem, je velmi suchá. Pokud vynecháme extrémní hodnoty z roku 1984 a sledujeme trend dále, index SAVI je proti indexu NDVI systematicky posunut níže a směrnice trendu je méně strmá (Obr. 13). Rozptyl hodnot je u SAVI rovněž nižší (Obr. 14 a Obr. 15). Vzhledem k charakteru dané oblasti má SAVI index vyšší vypovídající hodnotu, avšak jeho hodnoty jen potvrzují výsledky získané zpracováním hodnot NDVI. Podíl vegetace jak v okolní krajině, tak ve městě od roku 1987 pozvolně, velmi mírným tempem narůstá, přičemž množství vegetace ve městě zůstává vzhledem k rozšiřující se zástavbě poměrně stejně zastoupené ale vzhledem k okolí systematicky nižší.



Obr. 13 – Porovnání vývoje SAVI indexu ve městě a v okolí, regresní přímka od r. 1987



Obr. 14 – Mapa SAVI k roku 1984 pro vybrané referenční území

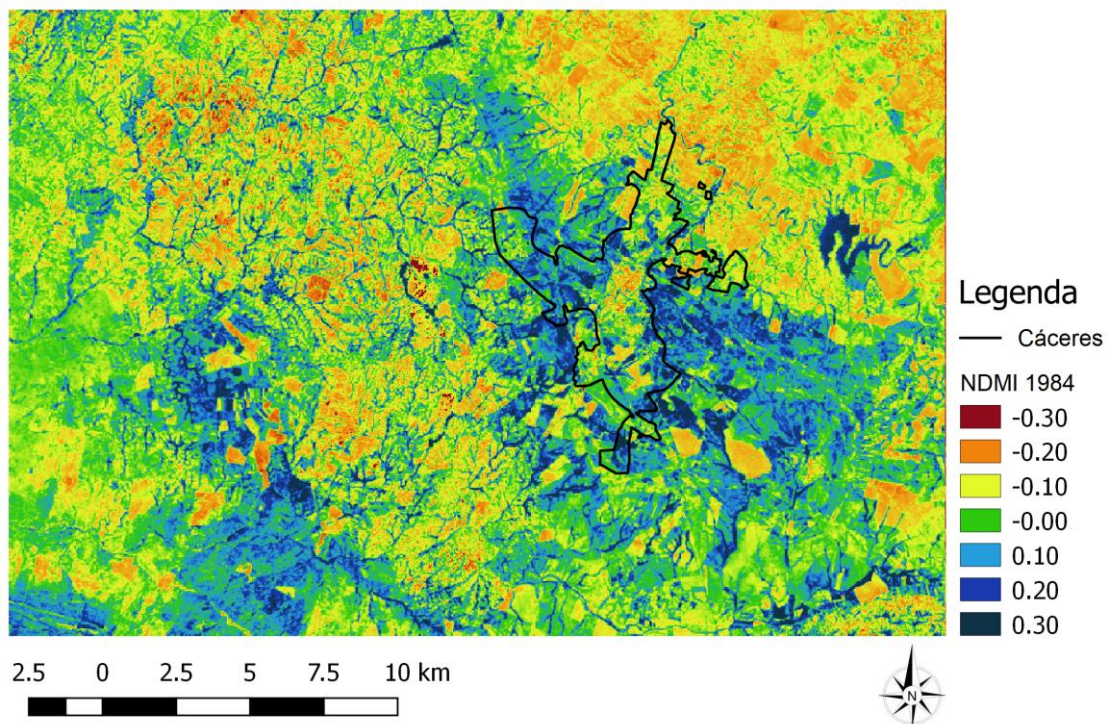


Obr. 15 – Mapa SAVI k roku 2017 pro vybrané referenční území

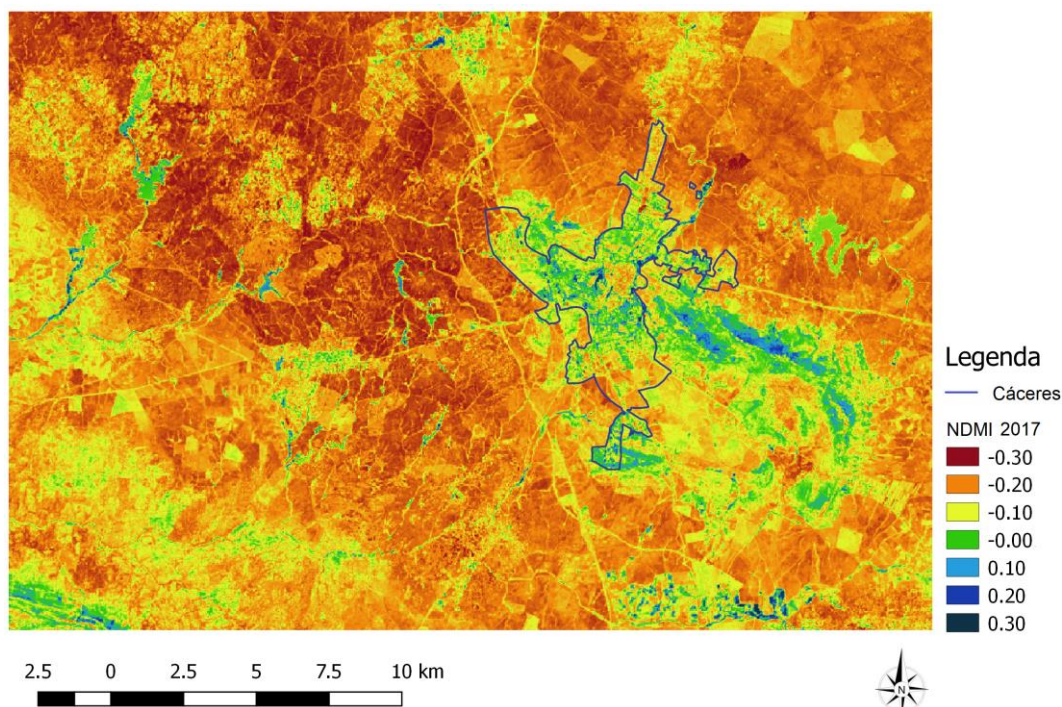
7.1.3 Index NDMI

Vyšších hodnot NDMI nabývají místa s vyšším zastoupením funkční vegetace. Vodní plochy obecně nabývají nejvyšších hodnot, vyšší hodnoty vykazují také zalesněná místa, zatímco suché plochy či zastavěné plochy hodnoty nízké (Obr. 16).

Porovnáním snímků v letech 1984 a 2017 lze pozorovat změnu v rozložení hodnot NDMI indexu (Obr. 16 a Obr. 17). Oblast se k r. 2017 znatelně vysouší, v roce 1984 nabývá průměrná hodnota NDMI indexu okolí města, resp. zbytku referenčního území, hodnoty -0,02, v roce 2017 je hodnota indexu -0,18. Vodní nádrž Embalse de Guadiloba, východně od města Cáceres, vykazuje v r. 2017 zmenšení objemu vody. Zatímco v r. 1984 je hodnota NDMI indexu vodní nádrže 0,27, v roce 2017 činí NDMI -0,04. Další vodní plochy též obsahují méně vody než před 33 lety.



Obr. 16 – Mapa NDMI indexu pro rok 1984

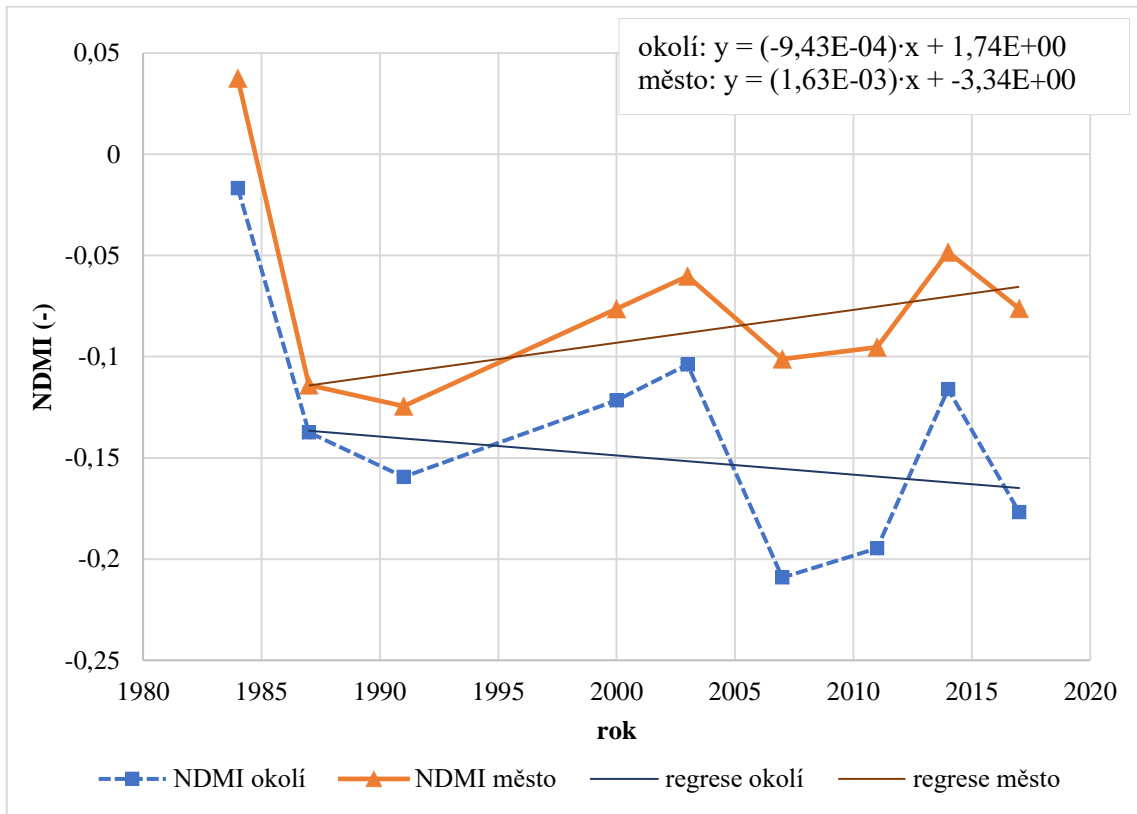


Obr. 17 – Mapa NDMI indexu pro rok 2017

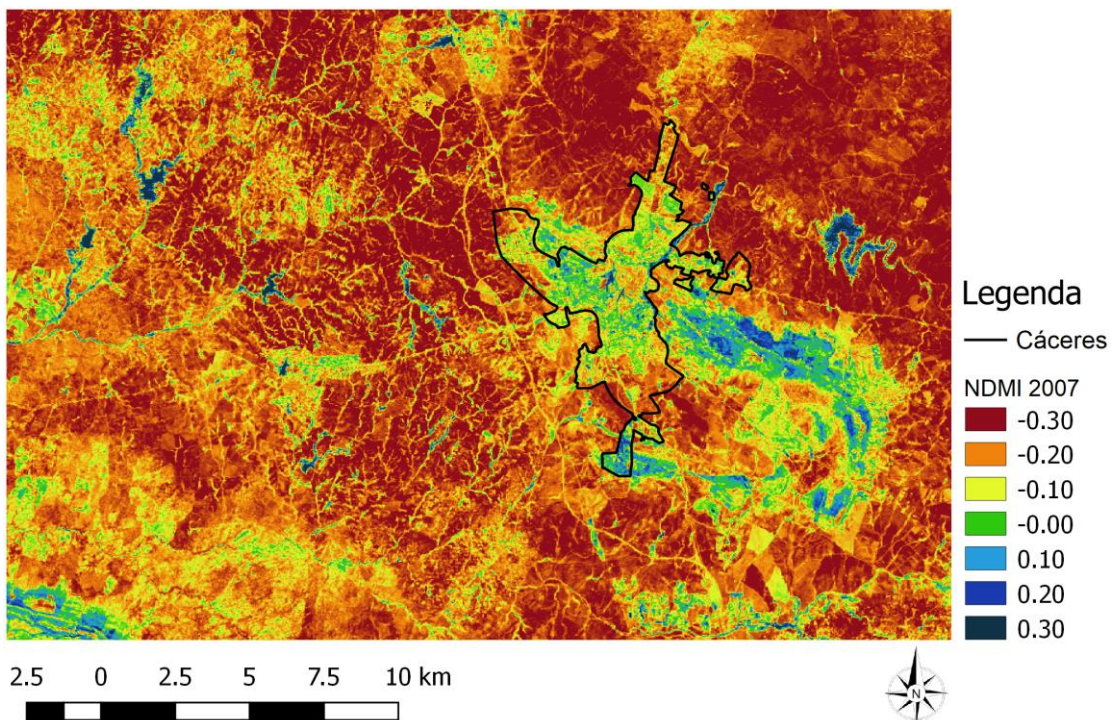
Porovnáním vegetačního indexu ve městě a okolí, resp. ve zbytku referenčního území bylo zjištěno, že v každém roce pozorování průměrná hodnota NDMI indexu města nabývá vyšších hodnot, přičemž vývoj NDMI indexu ve městě téměř kopíruje trend NDMI indexu v okolí. Mezi lety 1984 a 1987 nastal podstatný rozdíl v rozdělení hodnot NDMI indexu, resp. pokles v celé referenční oblasti. Lze usuzovat celkové vysoušení studované části provincie Cáceres. V roce 1991 dochází k dalšímu poklesu, avšak datum získaného snímku k roku 1991 je z konce července, což je statisticky nejsušší měsíc v roce, a lze tak nízkou hodnotu NDMI indexu přisuzovat také tomu (ostatní pozorování jsou z měsíce června). V letech 2003 a 2011 pak NDMI index nabývá jak ve městě, tak v okolí nejvyšších hodnot od roku 1984.

Regresní přímkou (vedenou od roku 1987) byl zjištěn rozdíl v trendu vývoje NDMI indexu ve městě a v okolí (Obr. 18). Nejenže je průměrná hodnota NDMI vyšší než v okolí, ale také trend regresní přímky je stoupající, zatímco v okolí je klesající. Nejlépe je tento jev viditelný od roku 2007, kdy dochází k podstatně většímu rozdílu mezi hodnotami NDMI indexu města a okolí, a to přibližně o 0,1 (Obr. 19). Přestože index může nabývat teoretických hodnot od -1 do 1, prakticky se rozpětí indexu ve studované oblasti například pro rok 2007 pohybuje přibližně od -0,35 do 0, a tudíž je posun v průměrné hodnotě indexu v dané oblasti o 0,1 velmi významný. Posledních 17 let si město udržuje relativně stabilní hodnotu NDMI, a to $-0,075 \pm 0,025$. Zatímco ve stejném

období okolí vykazuje výraznější výkyvy indexu (rozpětí až 0,11) a v extrémě klesá až pod hodnotu -0,2.



Obr. 18 – Porovnání vývoje NDMI indexu ve městě a v okolí, regresní přímka od r. 1987



Obr. 19 – NDMI index v roce 2007 – město jako oáza

7.1.4 Základní statistická vyhodnocení – vegetační indexy

Výsledné hodnoty vegetačních indexů jsou proloženy v grafech lineárním trendem, který zároveň koeficientem determinace R^2 vyjadřuje shodu mezi lineárním trendem a trendem dat. Lineární trend, resp. R^2 , je zobrazen až od roku 1987, průměrná hodnota pro rok 1984 byla z analýzy vyřazena jako odlehlá hodnota. Žádný z modelů pak není statisticky významný. Všechny trendy jsou neprůkazné na hladině pravděpodobnosti 5 %, což je způsobeno malým počtem pozorování (Tabulka 2).

Vegetační index	R^2	Významnost F	n	P
NDVI _{okolí}	0,37	0,11	8	n. s.
NDVI _{město}	0,41	0,09	8	.
NDMI _{okolí}	0,07	0,53	8	n. s.
NDMI _{město}	0,44	0,07	8	.
SAVI _{okolí}	0,16	0,33	8	n. s.
SAVI _{město}	0,32	0,14	8	n. s.

Tabulka 2 – Statistické posouzení modelu – vegetační indexy

Při porovnání hodnot vegetačních indexů města a okolí lze pozorovat u indexu NDVI, resp. SAVI, vysokou míru korelace (Tabulka 3), což potvrzuje to, že město si udržuje stejný poměr vegetace k nepropustným/suchým plochám jako okolí referenčního území, a to i přes postupnou zástavbu.

x	y	Míra korelace 1987–2017
NDVI _{okolí}	NDVI _{město}	0,93
SAVI _{okolí}	SAVI _{město}	0,94

Tabulka 3 – Míra korelace město vs. okolí, období 1987–2017

7.2 Teplota povrchu (LST)

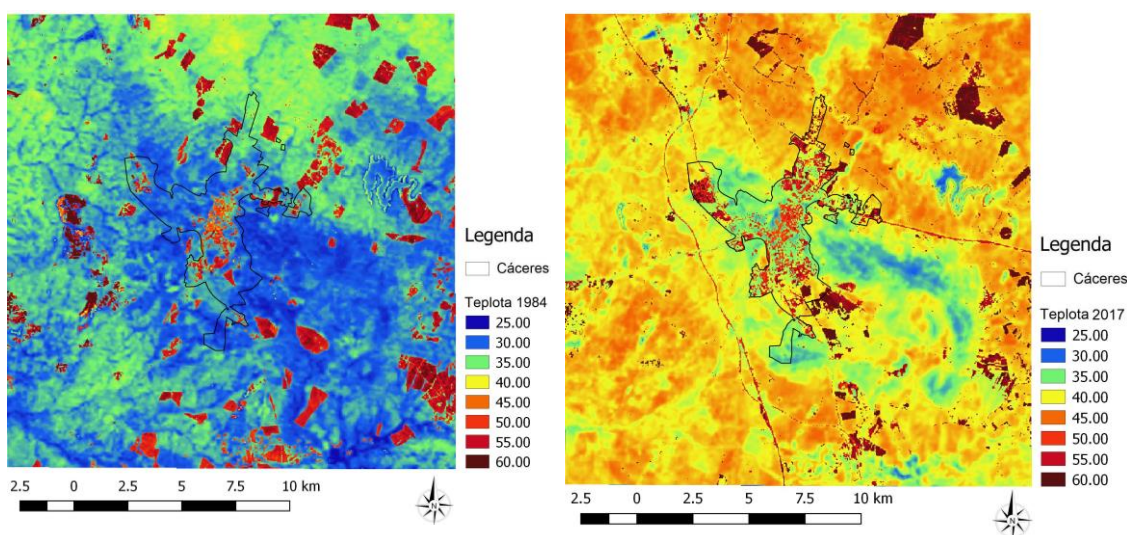
Teplota povrchu sledované oblasti se od r. 1984 do r. 2017 na vybraných snímcích značně zvýšila. Lze pozorovat, že i místa, která jsou zalesněná jako před 33 lety, nabývají v roce 2017 kvůli suchu vyšší hodnoty.

7.2.1 Srovnání LST pro vybrané roky

Srovnání LST v letech 1984 a 2017

Porovnáním snímků města Cáceres v červnu 1984 a 2017 lze pozorovat výrazné zvýšení teploty (Obr. 20). Z horizontálního rozšíření vysokých teplot povrchu je patrné nejen rozšíření města, ale také velmi suché oblasti, jako jsou louky.

Zastavěná místa v obou letech nabývají podobných hodnot, zatímco teplota povrchu míst s vegetací nabývá v roce 2017 hodnot vyšších než v roce 1984. Znatelně dochází k celkovému vysoušení, které zvýšení LST způsobuje. Nejchladnějšími částmi města v roce 2017 jsou parky Parque del Príncipe, Paseo de Cánovas a části města, kde se nachází vegetace či malá jezírka, a to včetně některých nově zastavěných zón s rodinnými domy a zahradami. Vliv nové zástavby je konkrétněji sledován v jižním cípu města (Obr. 21).



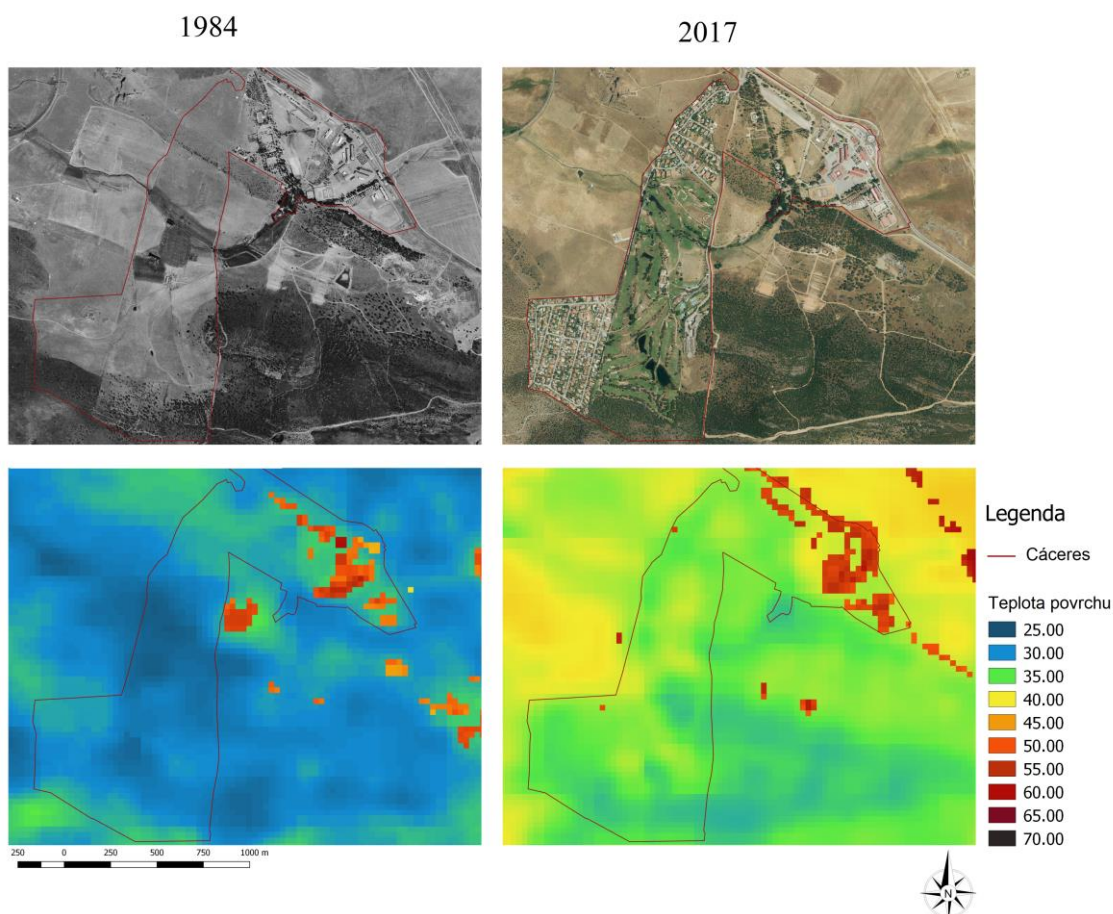
Obr. 20 – Mapa teploty povrchu (°C) v území v letech 1984 a 2017

V roce 1984 je vybraná zóna města podstatně méně zastavěná než roku 2017. Průměrná teplota povrchu jižního cípu je 31,19 °C (hodnota NDVI indexu je 0,45 a NDMI indexu 0,09). V roce 2017 je průměrná teplota povrchu jižního cípu města 37,39 °C (hodnota NDVI indexu je 0,35 a NDMI indexu je -0,02). Nově zastavěné části tohoto území se v teplotní mapě výrazně neprojeví, dokonce vykazují nižší hodnoty LST než bezprostřední okolí v krajině v části výřezu mapy. Mezi nově zastavěnými částmi bylo vybudováno golfové hřiště, které je zjevně udržováno a vegetace je v lepším stavu než v okolí. Dokonce zde byla vybudována nová jezírka, která taktéž pozitivně ovlivňují teplotní režim tohoto území.

Pro posouzení vývoje a vlivu změn této části města na teplotu povrchu bylo zvoleno porovnání průměrné teploty povrchu jižního cípu s průměrnou teplotou povrchu okolí, (celého) referenčního území (Tabulka 4). V roce 1984 se průměrná LST jižního cípu vzhledem k celé pozorované krajině změnila o 8,78 %, v roce 2017 se změnila o 9,96 %. Hodnoty jsou téměř totožné, což vypovídá o tom, že nová zástavba vzhledem ke krajině nezměnila teplotní charakter území.

Rok	Oblast	Průměrná LST
1984	okolí města referenčního území	34,19 °C
1984	vybraný jižní cíp města Cáceres	31,19 °C
2017	okolí města referenčního území	41,52 °C
2017	vybraný jižní cíp města Cáceres	37,39 °C

Tabulka 4 – Porovnání LST jižního cípu města a okolí



Obr. 21 – Porovnání stavu a teploty jižního cípu města Cáceres v letech 1984 a 2017

Srovnání LST v letech 1984 a 2007

V roce 2007 se průměrná teplota povrchu okolí studované oblasti velmi podobá průměrné teplotě povrchu okolí studované oblasti v roce 1984. Zároveň se teplota města v roce 2007 nejvíce liší od teploty referenčního území. Pro podobnost hodnoty povrchové teploty v obou letech bylo pro zmíněné roky provedeno porovnání rozložení teploty a hodnot vegetačních indexů ve studované oblasti (Obr. 22) s předpokladem, že město se od roku 1984 fyzicky značně změnilo, resp. došlo k zástavbě.

Rok 2007 je vegetačně chudším než rok 1984, celá oblast je podstatně sušší, přesto je teplota povrchu téměř stejná jako v roce 1984. Z takového porovnání hodnot roku 1984 a 2007 by bylo možné usuzovat, že teplota povrchu nezávisí na stavu vegetace. Avšak teplota oblasti v roce 2007 se oproti letům minulým výrazně snížila. Vegetační indexy nabývají v roce 2007 stále nižších hodnot než v roce 1984, a to zřejmě kvůli celkové klimatické změně v oblasti.

Zatímco v okolí jsou hodnoty LST v obou letech podobné, v území města Cáceres se hodnoty LST v těchto letech podstatně liší (Tabulka 5). Zároveň lze pozorovat, že v roce 1984 se LST města a LST okolí téměř neliší. Oblast je chladnější, zároveň je katastrální území města (vyznačeno k r. 2017) zastavěno z malé části a funkční vegetací je povrch z velké části ochlazován. V roce 2007 se však LST města a LST okolí liší. Teplota povrchu okolního území je sice v okamžik pozorování chladnější, ale vegetační indexy nabývají ve sledované oblasti z důvodu sucha nižších hodnot než v roce 1984. Průměrné hodnoty NDVI indexu města (0,21) a NDVI okolí (0,27) jsou v r. 2007 podobné.

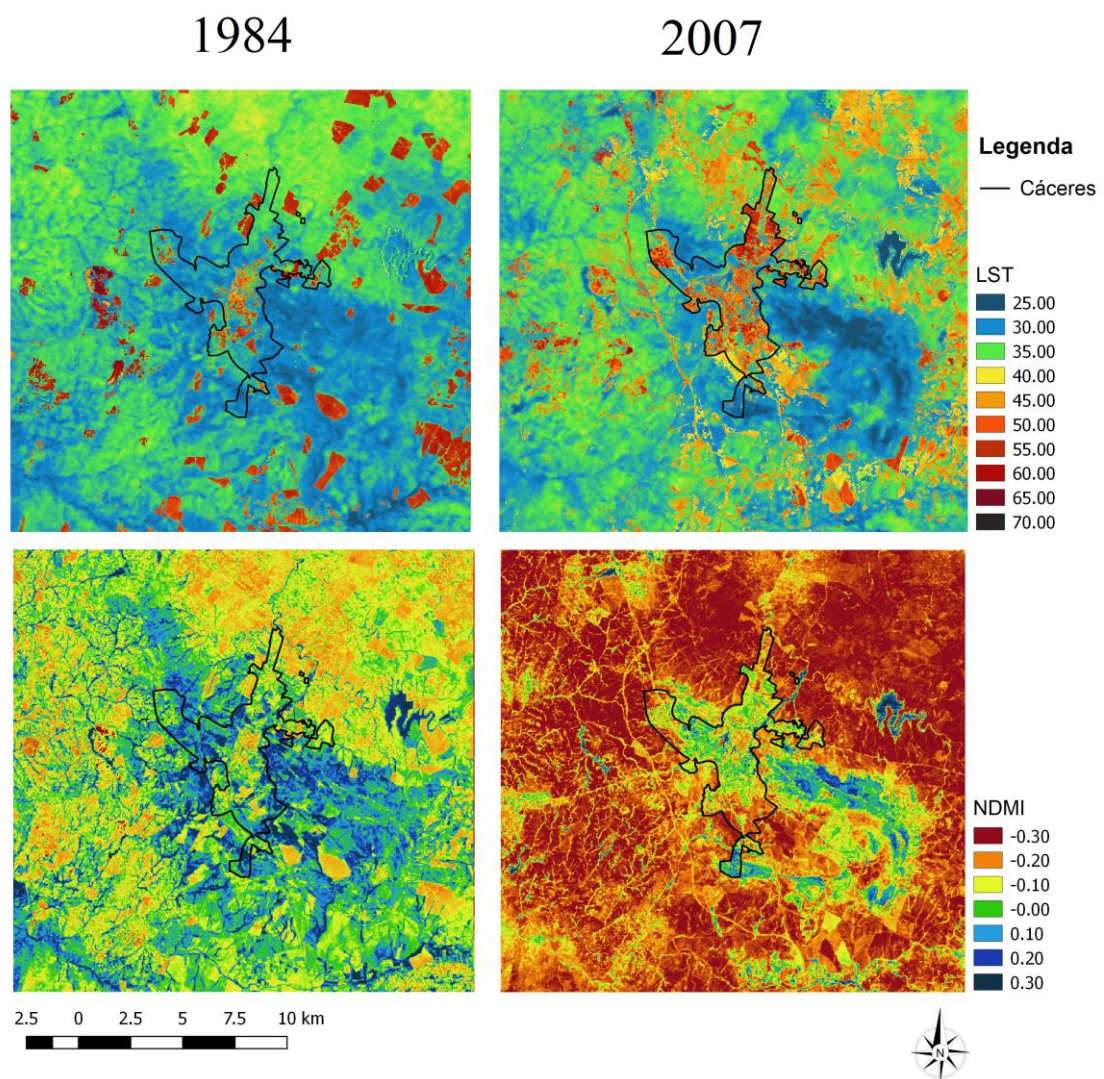
Rok	LST _{okolí}	LST _{město}
1984	34,19 °C	34,27 °C
2007	34,81 °C	41,34 °C

Tabulka 5 – LST okolí a města v letech 1984 a 2007

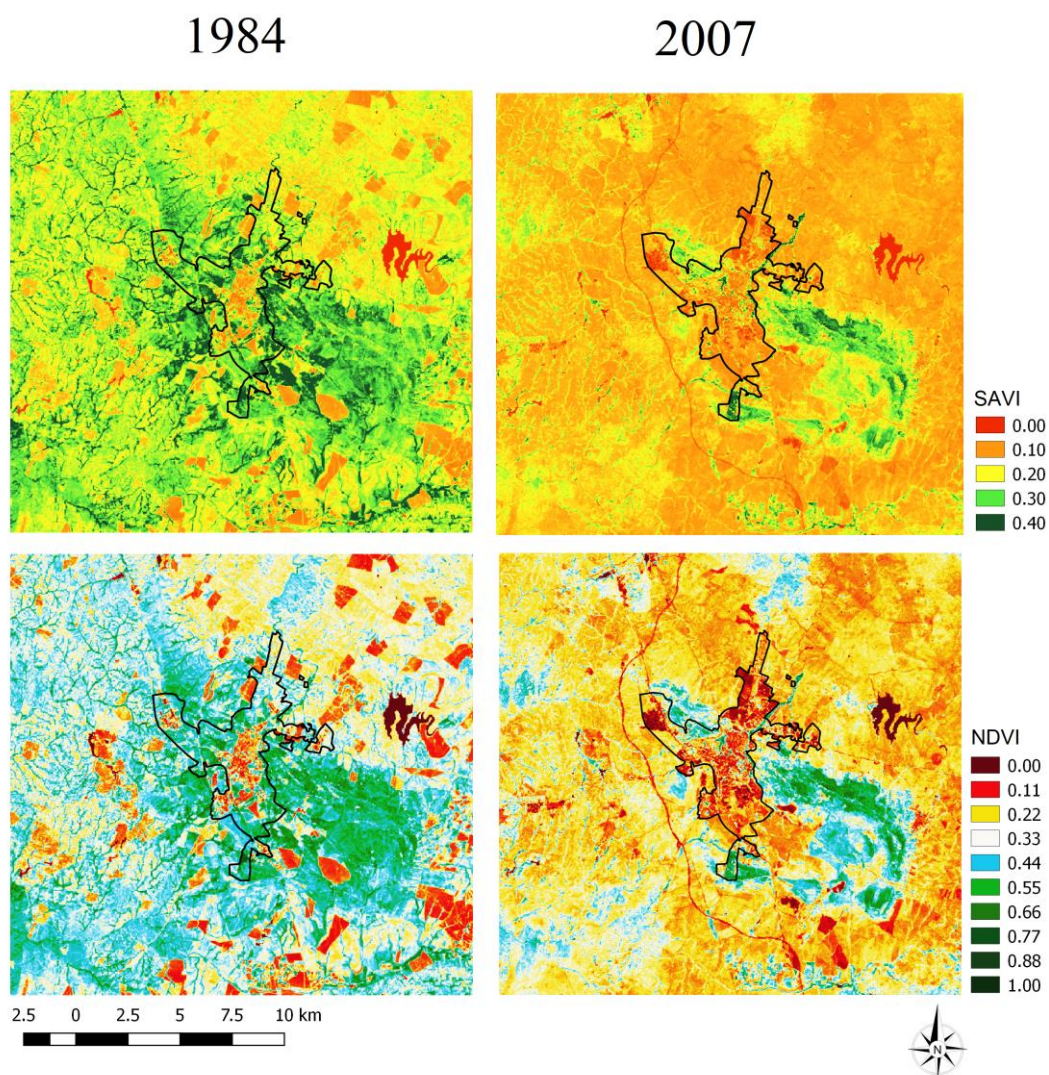
LST studovaného území mohla být v roce 2007 např. vlivem studené fronty nižší. Hodnoty vegetačních indexů zůstávají nízké. Vegetace tedy na teplotu povrchu v daném roce nemá podstatný vliv. Ačkoli však LST okolí v době pozorování roku 2007 klesla, ve městě je LST zřejmě z důvodu akumulace tepla materiálem zástavby vyšší. V území města však průměrný index NDMI nabývá v r. 2007 nepatrně vyšších hodnot (-0,10) než ve zbytku referenčního území (-0,21). I z mapy NDMI (Obr. 22A) lze pozorovat vyšší vlhkost města oproti většině přilehlého okolí. Vlhkost může být způsobena spíše

zkrácením ulic města a zaléváním městské vegetace nežli jejím zastoupením, a to z důvodu nízké hodnoty NDVI indexu.

Zvýšení efektu UHI rozšířením intravilánu města je ve studované oblasti pozorovatelný především porovnáním těchto let (1984 a 2007), jelikož celková LST referenčního území je v těchto letech podstatně nižší než v ostatních pozorovaných letech. Při velmi vysokých teplotách povrchu v území totiž dochází k tomu, že rozdíl LST města od LST okolí se i přes postupnou zástavbu v letech výrazněji neprojevuje.



Obr. 22A – Porovnání stavu zkoumané oblasti v letech 1984 a 2007



Obr. 22B – Porovnání stavu zkoumané oblasti v letech 1984 a 2007

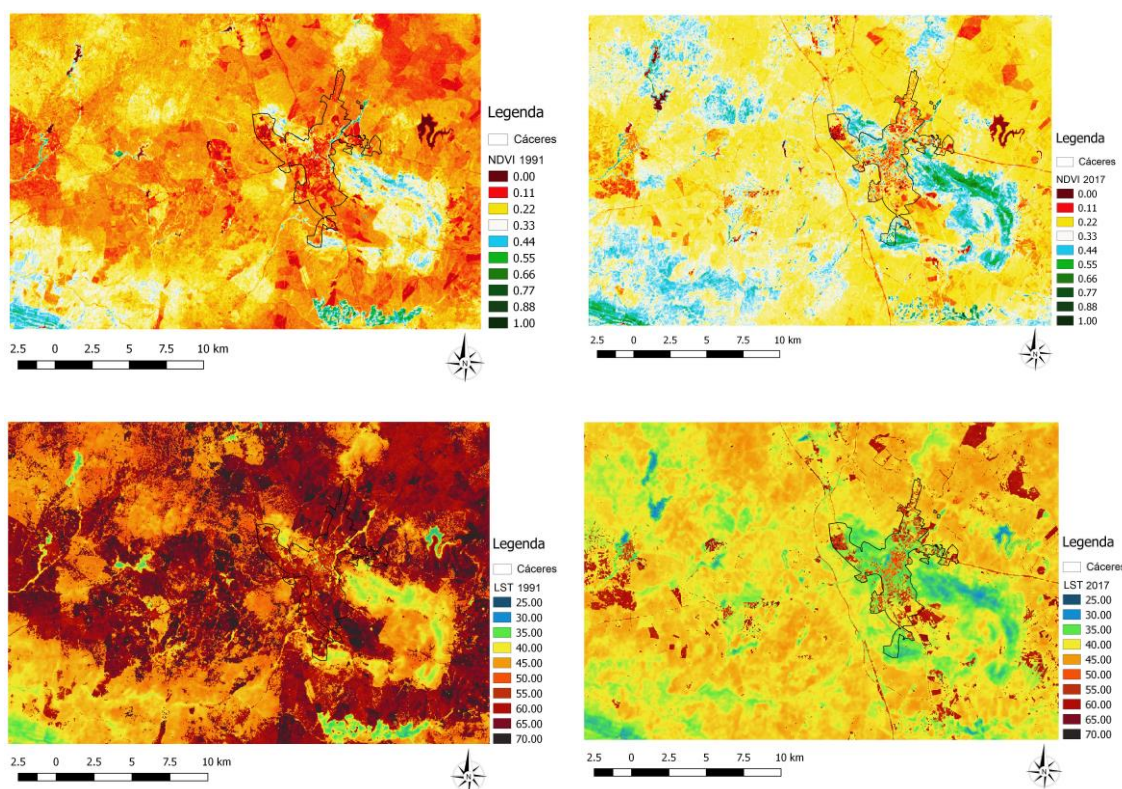
Srovnání LST v letech 1991 a 2017

Vliv celkového stavu sledovaného území na stav města a projev efektu UHI lze posoudit i porovnáním let 1991 a 2017 (Obr. 23). Ve správním území města Cáceres došlo k výrazným změnám (území města se v průběhu dvaceti šesti let zastavělo), avšak rozdíl LST mezi městem a referenčním územím se v obou letech výrazně neliší (Tabulka 6). To je způsobeno vlivem změny teploty a stavu vegetace v celém referenčním území. Zatímco v roce 1991 (červenec) trpí celé území vysokými teplotami, v roce 2017 (červen) je teplota celého území podstatně nižší. Průměrná hodnota NDVI indexu, tedy stavu vegetace, je v území města v roce 1991 0,17, v roce 2017 je vyšší, 0,25, a to ačkoli je město více zastavěné. Důvodem nižšího vegetačního indexu roku 1991 je právě velké sucho v celé sledované oblasti.

Rok	LST _{okolí}	LST _{město}
1991	55,25 °C	57,51 °C
2017	41,53 °C	42,63 °C

Tabulka 6 – LST okolí a města v letech 1991 a 2017

Tento příklad slouží pro pouhé teoretické porovnání vlivu celkové teploty, resp. celkového stavu vegetace, na LST intravilánu města. Efekt UHI se z důvodu velmi vysokých teplot a celkového sucha v celé referenční oblasti nejeví závislý na postupné zástavbě města.



Obr. 23 – Porovnání stavu zkoumané oblasti v letech 1991 a 2017

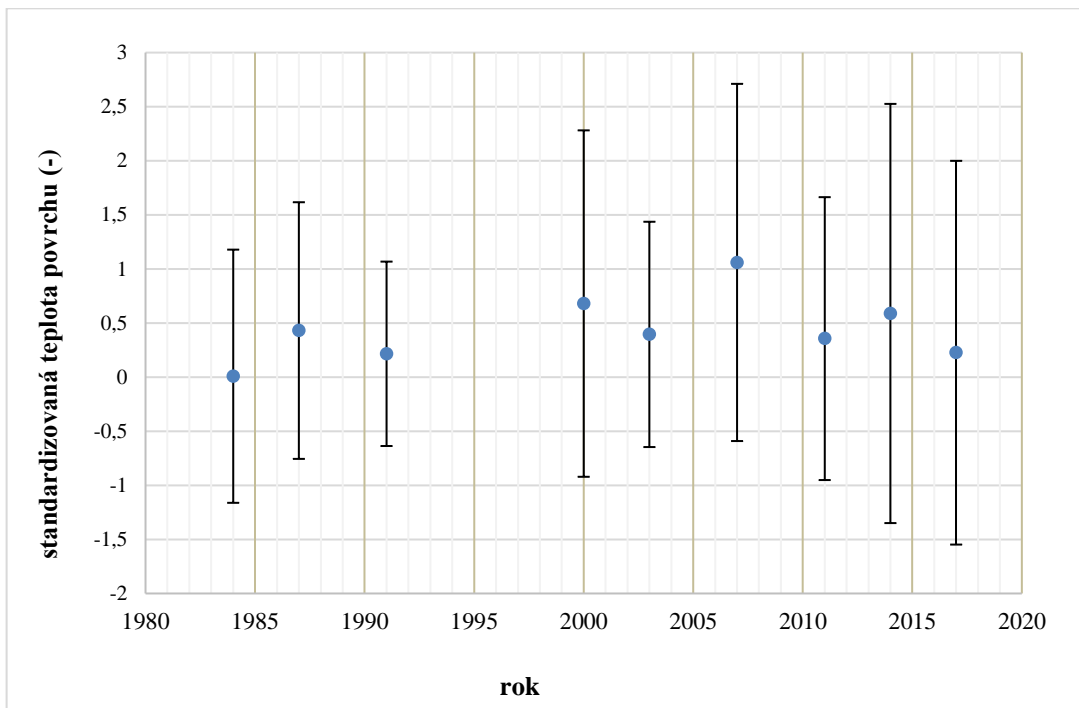
7.2.2 Celkový vývoj LST

Pro zhodnocení celkového vývoje LST v letech je porovnávána standardizovaná teplota města s okolím (Obr. 24). Průměrná teplota povrchu ve městě je ve všech letech vyšší než průměrná teplota povrchu v celém referenčním území (hodnoty nad nulou).

V roce 1984 je hodnota standardizované průměrné LST ve městě velmi podobná jako v referenčním území, zároveň je tato teplota nejnižší z řady pozorování. V tomto roce bylo katastrální území města Cáceres (vyznačené k roku 2017) vzhledem k dalším rokům pozorování zastavěno minimálně, je zde značné množství vegetace, logicky tedy NDVI, resp. SAVI a NDMI index nabývá v roce 1984 svého maxima.

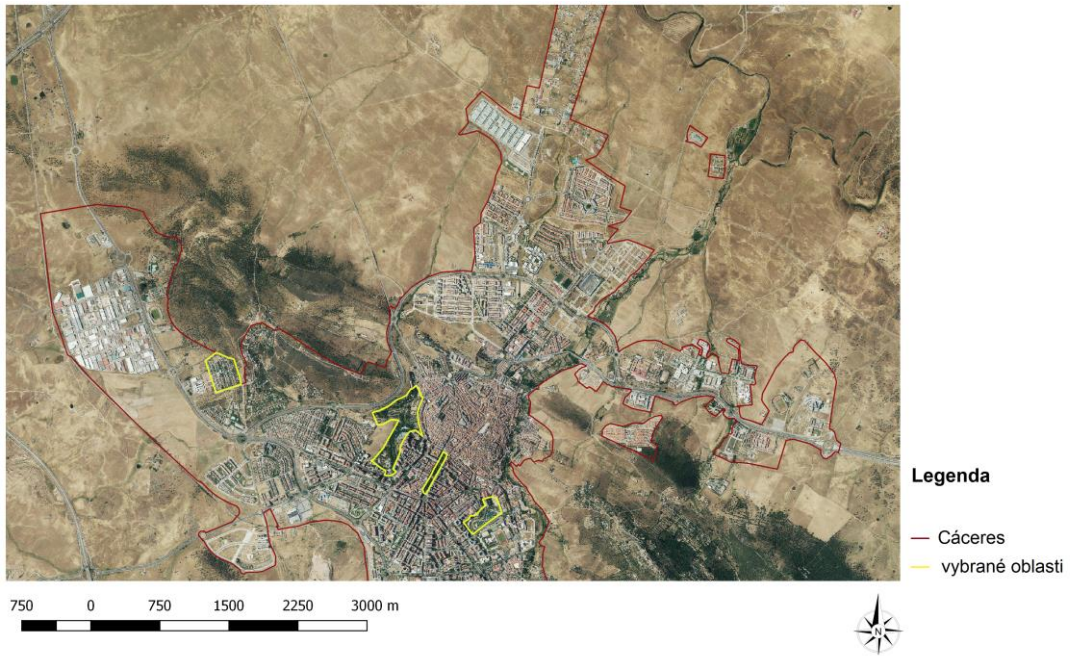
Největší odchylku zaznamenala v grafu hodnota teploty v roce 2007, kdy standardizovaná hodnota nabývá 1,06, a tedy město se nejvíce liší svou teplotou od referenční oblasti. Hodnota vegetačních indexů pro správní území města Cáceres je v tomto roce nízká, nicméně nenabývá minim v časové řadě pozorování. Ačkoli nelze pozorovat výrazné změny v zástavbě ani v rozložení teploty povrchu města od roku 2003, je možné usoudit, že s nižší celkovou teplotou povrchu celého území se teplotní rozdíl mezi urbánní zónou a referenční zónou zvyšuje.

Porovnáním hodnot LST intravilánu města s LST referenčního území, kdy hodnota LST je kolísavá, je zjevné, že nelze prokázat zvýšení intenzity městského tepelného ostrova v závislosti na postupné zástavbě města.

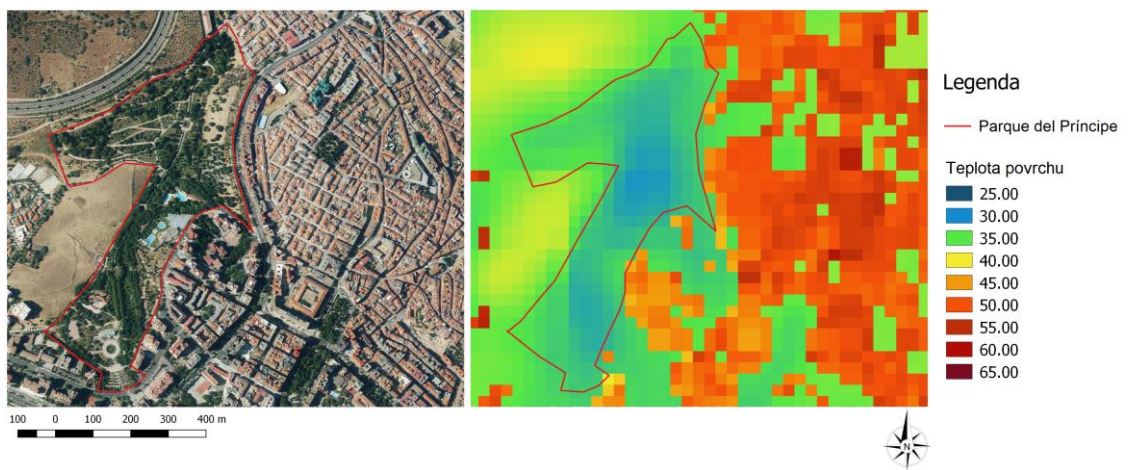


Obr. 24 – Graf standardizované průměrné teploty povrchu města Cáceres směrodatnou odchylkou

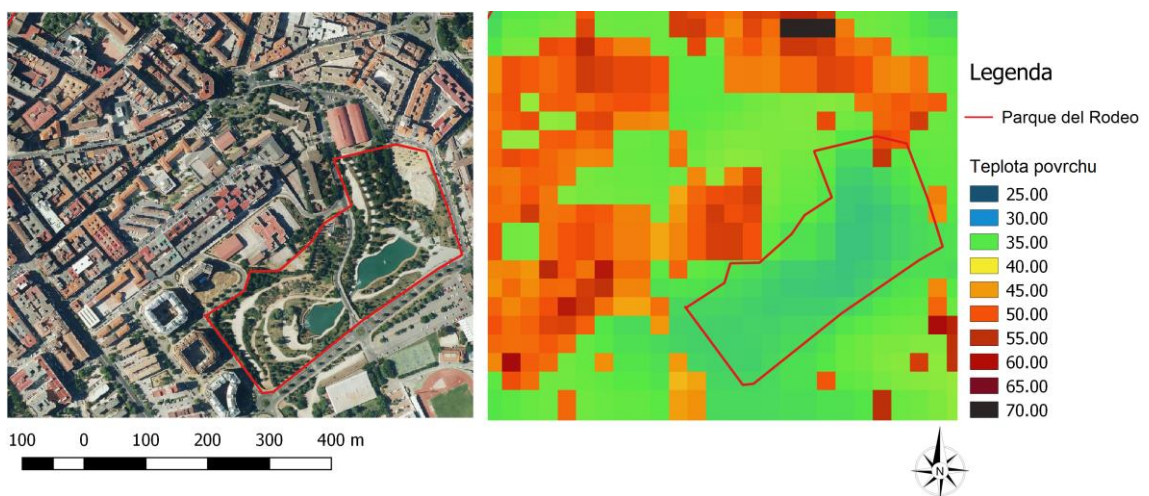
Oblasti s vegetací, ať již parky či nová zástavba s doprovodnou zelení, tvoří ve vytvořených teplotních mapách zjevný kontrast k zastavěným oblastem. Lze pozorovat pozitivní vliv na teplotu povrchu (Obr. 25 – Obr. 29).



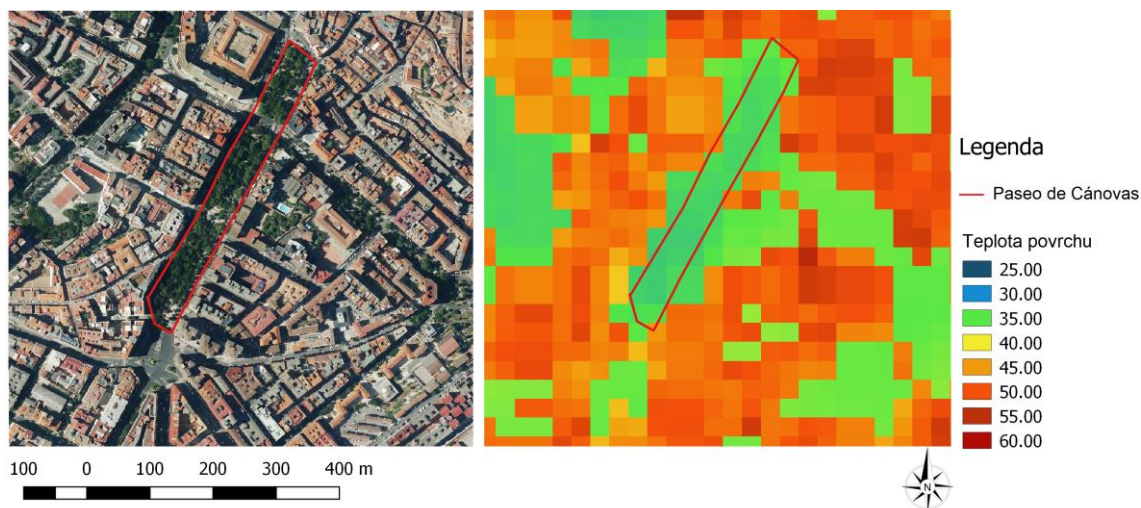
Obr. 25 – Ortofoto mapa – vybrané oblasti



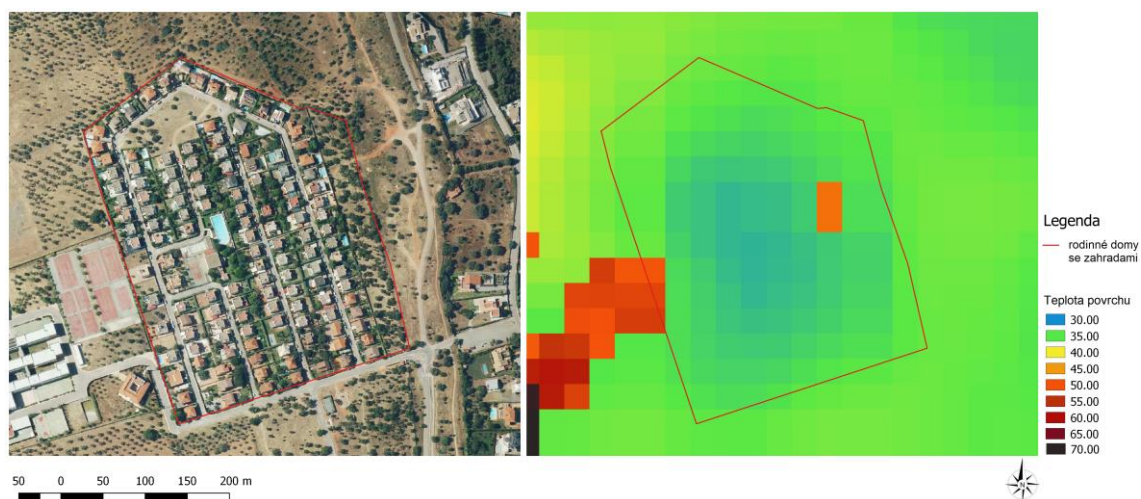
Obr. 26 – LST Parque del Príncipe (2017)



Obr. 27 – LST Parque del Rodeo (2017)



Obr. 28 – LST Paseo de Cánovas (2017)



Obr. 29 – LST zástavba – rodinné domy se zahradami (2017)

7.2.3 Základní statistická vyhodnocení – LTS

Koeficient determinace R^2 lineárního trendu standardizované teploty nevyjadřuje shodu mezi lineárním trendem a trendem dat, a to i přes aplikaci tohoto koeficientu od roku 1987 (rok 1984 z důvodu odlehlé hodnoty vyřazen). Trend je neprůkazný na hladině pravděpodobnosti 5 %, což je způsobeno malým počtem pozorování (Tabulka 7).

LST	R^2	Významnost F	n	P
LST _{města}	0,01	0,8	8	n. s.

Tabulka 7 – Statistické posouzení modelu – LST

Mezi hodnotou LST_{města} a LST_{okolí} byla prokázána zjevná závislost. Míra korelace ve sledování od roku 1987 nabývá 0,96.

8. Diskuse

Z výsledků práce je zřejmá korelace mezi hodnotou vegetačních indexů města a okolí, a také korelace mezi teplotou povrchu města a okolí. Efekt městského tepelného ostrova (UHI) je ovlivňován mnoha faktory, přičemž v diplomové práci byl zkoumán faktor vegetačního pokryvu a postupné zástavby města na teplotu povrchu.

Vývoj NDVI indexu je ve městě i v okolí velmi podobný. Pouze mezi lety 1984 a 1987 došlo k výraznému snížení hodnoty NDVI. V těchto letech se též výrazněji zvýšila průměrná teplota povrchu obou sledovaných oblastí. Vyšší teplota v krajině zřejmě zapříčinila vysychání krajiny, tedy snížení hodnoty NDVI indexu. Roku 2000 dochází k velmi pozvolnému zvýšení NDVI indexu jak v okolí, tak ve městě. Vzhledem k podobnosti vývoje NDVI indexu ve městě jako v okolí, lze usuzovat, že s postupnou zástavbou v letech si město udržuje poměr funkční vegetace k nepropustným/suchým oblastem, který se podobá poměru funkční vegetace k suchým oblastem v okolní krajině. Hodnoty indexu SAVI pak jen potvrzují výsledky získané zpracováním hodnot NDVI.

Celé referenční území je vegetačně chudé. Očekávaně je hodnota NDVI města nižší než v okolí, nicméně vlhkostní index NDMI nabývá ve všech letech pozorování ve městě hodnot vyšších, což znamená, že město je v průměru vlhčí než okolí referenčního území. A to i přes nízké hodnoty vegetačního indexu NDVI. Lze tak soudit, že v semiaridní až aridní oblasti, jako je tato, město slouží vzhledem k NDMI indexu jako oáza. Nejlépe je tento jev viditelný od roku 2007, kdy dochází k podstatně většímu rozdílu mezi hodnotami NDMI indexu města a okolí. Přesné příčiny vyšší hodnoty vlhkostního indexu ve městě nejsou známy. Lze se domnívat, že ke zvýšení NDMI indexu dochází mimo jiné zkráplením ulic, popř. zavlažováním vegetace, nicméně faktorů může být více. Je však zřetelné, že postupná zástavba města nemá na vývoj NDMI indexu v tomto případě vliv. Závislost LST města na NDMI města z výsledných hodnot nelze prokázat, nicméně dochází-li ke zkráplení ulic a zavlažování vegetace (nejspíše pro teplotní komfort obyvatelstva), teplota města je zmírněna.

Vyšší teplota ve městě než v okolí ve všech letech pozorování, dokazuje existenci efektu UHI. Celkové kolísavé výsledky teploty povrchu v intravilánu města však ukazují, že v této semiaridní oblasti s vysokými teplotami nelze použitou metodou intenzitu efektu UHI v závislosti na postupné horizontální expanzi města prokázat.

Porovnáním roku 1984 a 2007, kdy se teplota celého referenčního území velmi podobá, a zároveň je podstatně nižší než v ostatních letech, je rozdíl LST města oproti LST okolí v roce 2007 daleko výraznější než v roce 1984. Takové porovnání vede k úsudku, že při snížení celkové teploty povrchu sledovaného území je vývoj efektu městského tepelného ostrova v závislosti na zástavbě intravilánu znatelnější. Naopak porovnání LST z let 1991 a 2017, kdy teplota povrchu města se od okolí lišila v obou letech přibližně stejně, poukazuje na to, že s vysokými teplotami v referenčním území dochází k vyrovnání teplotního režimu města s krajinou, a nelze tak hodnotit vývoj UHI v závislosti na postupné zástavbě.

Vybranou konkrétní zónou města – jižního cípu katastrálního území, kde lze pozorovat změnu v zástavbě území, bylo porovnáním let 1984 a 2017 zjištěno, že k zásadnímu teplotnímu rozdílu v teplotě povrchu vůči okolí nedochází. Pozitivní vliv v nově zastavěném území mají zahrádky mezi jednotlivými domy, které jsou opatřeny vzrostlými stromy a udržovanou vegetací. Lze tedy konstatovat, že k efektu UHI v této vybrané části města vlivem nové zástavby nedochází. Zástavba je vzhledem k problematice UHI řešena vhodně, je zde použita doprovodná zeleň a vybudované udržované golfové hřiště působí na okolí z hlediska LST pozitivně.

Mnoho studií zabývajících se teplotou parků a lesních porostů poukazuje na nižší teplotu vzduchu, než v místech se zástavbou či nefunkční/suchou vegetací (Bowler et al., 2010). Zaměřením se na konkrétní oblasti města s parky a funkční vegetací lze potvrdit, že funkční vegetační pokryv a vodní plochy významně snižují teplotu povrchu. Naopak zastavěné nepropustné plochy, ale i vyschlé plochy vykazují hodnoty LST vysoké. Z těchto výsledků však nelze soudit přesný vliv na teplotu vzduchu či prostorový přesah tohoto vlivu. Je zřejmé, že je teplota vzduchu ovlivněna, nicméně přesná přenosová funkce mezi teplotou povrchu a teplotou vzduchu v blízkosti povrchu známa není (Weng et al., 2004). Oblasti jako jsou parky bývají často předmětem výzkumu chladného ostrovního efektu (UCI; urban cool island) (Chang et al., 2007), tzn. negativního efektu UHI. Studie se však často zaměřují na tento efekt pouze v konkrétních vegetačních zónách města. Méně studií je pak na výzkum efektu UCI města jako celku. Existence UCI města byla prokázána ve studii Dubaje v porovnání s pouštní oblastí (Rasul et al., 2017), kde město díky dodatečnému zvýšení vlhkosti, a tedy odpařováním skrze latentní teplo, vykazuje snížené hodnoty LST. Ačkoli město Cáceres efekt UCI nevykazuje, lze se domnívat, že v suché a horké oblasti, která je předmětem této studie, je velikost efektu

UHI zmírněna. Ke zmírnění povrchové teploty města zjevně dopomáhá vyšší vlhkost, ale mohou to být i další faktory (např. řešení geometrické konstrukce zástavby, Sky view faktor atd.), které v rámci této práce zkoumány nebyly.

Snímky Landsat jsou získány pouze pro konkrétní datum každého roku. Vzhledem k tomu, že nejde o průměr hodnot získaných např. z celého měsíce června, ale pouze o jeden den – jeden čas, nelze ze studie soudit věrohodnost výsledků v kontextu časového vývoje města, resp. oblasti. Na teplotu povrchu i vegetační indexy může mít vliv nejen změna celkového podnebí, ale také aktuální stav počasí, který se mohl v letech k pozorovanému datu měnit, a ovlivnit tak výsledné hodnoty.

9. Závěr

Analýza družicových snímků ukázala, že funkční vegetační pokryv a vodní plochy významně snižují teplotu povrchu, a mohou tak mít vliv na zmírnění efektu UHI. Studie však neprokázala vliv expanze města na průměrnou teplotu povrchu (LST) města, a tedy i na intenzitu efektu městského tepelného ostrova. Oblast celého referenčního území je tak suchá, že v průměru vykazuje podobný vývoj hodnot LST, resp. vegetačních indexů, jako postupně zastavované město. Hodnoty vlhkostního indexu NDMI dokonce dokazují, že město je v porovnání s okolím referenčního území vlhčí. A to i přes to, že vegetační index NDVI, resp. SAVI, ve městě nabývá hodnot nižších než v okolí. Hodnotu NDMI indexu ve městě mohou ovlivňovat různé faktory, jedním z nich může být zkrápění ulic, které zmírní teplotu vzduchu, případně umělé zavlažování vegetace.

10. Seznam literatury

ALMUTAIRI, B., BATTAY, A.E., BELAID, M.A., MUSA, N. *Comparative Study of SAVI and NDVI Vegetation Indices in Sulaibiya Area (Kuwait) Using Worldview Satellite Imagery*. International Journal of Geosciences and Geomatics, vol. 1, 2013, 50–53 p.

BARATI, S., RAYEGANI, B., SAATI, M., SHARIFI, A., NASRI, M. *Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, vol. 14, 2011, 49–56 p.

BARLOW, J.F. *Progress in observing and modelling the urban boundary layer*. Urban Climate, vol. 10, 2014, 216–240 p.

BHATTA, B. *Causes and consequences of Urban Growth and Sprawl*. In: *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 17–36 p.

BOWLER, D.E., BUYUNG-ALI, L., KNIGHT, T.M., PULLIN, A.S. *Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence*. Landscape and Urban Planning, vol. 97, 2010, 147–155 p.

DWIVEDI, A., MOHAN, B.K. *Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island*. Remote Sensing Applications: Society and Environment, vol. 10, 2018, 56–69 p.

FRUMKIN, H. *Urban Sprawl and Public Health*. Public Health Reports, vol. 117, 2002, 201–2017 p.

GAGE, E.A., COOPER, D.J. *Urban forest structure and land cover composition effects on land surface temperature in a semi-arid suburban area*. Urban Forestry & Urban Greening, vol. 28, 2017, 28–35 p.

GANDHI, G.M., PARTHIBAN, S., THUMMALU N., CHRISTY, A. *NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District*. Procedia Computer Science, vol. 57, 2015, 1199–1210 p.

GAO, B.C. *NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space*. Remote Sensing of Environment, vol. 58, 1996, 257–266 p.

GEIGER, R., ARON, R.H., TODHUNTER, P. *The Climate Near the Ground*. 6th ed. Lanham, Md: Rowman & Littlefield, 2003, 528 p.

- HESSLEROVÁ, P., POKORNÝ, J., BROM, J., REJŠKOVÁ-PROCHÁZKOVÁ, A. *Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperature cultural landscape: Consequences for the local climate*. Ecological Engineering, vol. 54, 2013, 145–154 p.
- HUETE, A.R. *A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment, vol. 25, 1988, 295–309 p.
- CHANG, C.R., HUANG M.L., CHANG, S.D. *A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks*. Landscape and Urban Planning, vol. 80, 2007, 386 - 395 p.
- JACQUIN, A., MISAKOVA, L., GAY, M. *A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment*. Landscape and Urban Planning, vol. 84, 2008, 152–165 p.
- LAWLEY, V., LEWIS, M., CLARKE, K., OSTENDORF, B. *Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review*. Ecological Indicators, vol. 60, 2016, 1273–1283 p.
- LEPŠ, J., ŠMILAUER, P. *Biostatistika*. Nakladatelství Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, 2016, 440 p.
- MERSAL, A. *Sustainable Urban Futures: Environmental Planning for Sustainable Urban Development*. Procedia Environmental Sciences, vol. 34, 2016, 49–61 p.
- OKE, T.R. *Boundary layer climates*. 2nd ed. London: Routledge, 2002, 435 p.
- OKE, T.R. *Street design and urban canopy layer climate*. Energy and Buildings, vol. 11, 1988, 103–113 p.
- PÉREZ FERNÁNDEZ, M.A. *Mapa de Impactos del Cambio Climático en Extremadura*. Junta de Extremadura: Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente, 2011, 242 p.
- PEZZULLO, J. C. *Biostatistics For Dummies*. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 408 p.
- PIELKE, R.A. *Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall*. Reviews of Geophysics, vol. 39, 2001, 151–177 p.
- PRIETO CLEMENTE, J.P. *Extremadura La Tierra Que Amanece*. Badajoz: Adenex, 2003, 364 p.

- RABIN, R.M., STADLER, S., WETZEL, P.J., STENSRUD, D.J., GREGORY, M. *Observed Effects of Landscape Variability on Convective Clouds*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 71, 1990, 272–280 p.
- RAO, P.K. *Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 53, 1972, 647–648 p.
- RASUL, A., BALZTER, H., SMITH, C., REMEDIOS, J., ADAMU, B., SOBRINO, J., SRIVANIT, M., WENG, Q. *A Review on Remote Sensing of Urban Heat and Cool Islands*. Land, vol. 6, 2017, 1–10 p.
- SHARMIN, T., STEEMERS, K., MATZARAKIS, A. *Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment*. Sustainable Cities and Society, vol. 34, 2017, 293–308 p.
- SOBRINO, J.A., JIMÉNEZ MUÑOZ, J.C., PAOLINI, L. *Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5*. Remote Sensing of Environment, vol. 90, 2004, 434–440 p.
- SON, N.T., THANH, B.X. *Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Cantho city, Vietnam*. Sustainable Cities and Society, vol. 36, 2018, 81–91 p.
- STEWART, I.D., OKE, T.R. *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 93, 2012, 1879–1900 p.
- TSOU, J., ZHUANG, J., LI, Y., ZHANG, Y. *Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong*. Urban Science, vol. 1, 2017, 1–22 p.
- UNGER, J. *Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database*. International Journal of Environment and Pollution, vol. 36, 2009, 59–80 p.
- WAFFLE, A.D., CORRY, R.C., GILLESPIE T.J., BROWN, R.D. *Urban heat islands as agricultural opportunities: An innovative approach*. Landscape and Urban Planning, vol. 163, 2017, 103–114 p.
- WANG, S., MA, Q., DING, H., LIANG, H. *Detection of urban expansion and land surface temperature change using multi-temporal Landsat images*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 128, 2018, 526–534 p.
- WANG, Y., AKBARI, H., CHEN, B. *Urban Geometry and Environmental Urban Policy Development*. Procedia Engineering, vol. 169, 2016, 308–315 p.

WATSON, I.D., JOHNSON, G.T. *Graphical estimation of sky view factors in urban environments*. International Journal of Climatology, vol. 7, 1987, 193–197 p.

WENG, Q., LU, D., SCHUBRING, J. *Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies*. Remote Sensing of Environment, vol. 84, 2004, 467–483 p.

WULDER, M.A., WHITE, J.C., COOPS, N.C., ORTLEPP, S. *Remote Sensing for Studies of Vegetation Condition: Theory and Application*. In: WARNER, T.A., NELLIS, M.D., FOODY, G.M. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. London: SAGE Publications Limited, 2009, 1– 19 p.

ZHANG, X.X., WU, P.F., CHEN, B. *Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing City of China*. Procedia Environmental Sciences, vol. 2, 2010, 1438–1450 p.

ZHANG, Y., YIYUN, Ch., QING D., JIANG, P. *Study on Urban Heat Island Effect Based on Normalized Difference Vegetated Index: A Case Study of Wuhan City*. Procedia Environmental Sciences, vol. 13, 2012, 574–581 p.

ZHU, S., GUAN, H., BENNETT, J., CLAY, R., EWENZ, C., BENGER, S., MAGHRABI, A., MILLINGTON, A.C. *Influence of sky temperature distribution on sky view factor and its applications in urban heat island*. International Journal of Climatology, vol. 33, 2013, 1837–1843 p.