

Adam Bielecki

**Metoda określania wielkości zasobów zieleni miejskiej
w miejscu zamieszkania i jego sąsiedztwie z wykorzystaniem
technik teledetekcyjnych**

A method for determining the urban greenery resources in the place of residence
and its vicinity using remote sensing techniques

**Rozprawa doktorska
w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych
w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku**

Promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. UŁ

Łódź 2024

Spis treści

Streszczenie.....	4
Abstract	6
Spis prac wchodzących w skład rozprawy	8
1. Wprowadzenie.....	11
2. Problem badawczy	17
3. Metody badawcze.....	19
3.1 Istniejące wskaźniki	19
3.2 Inwentaryzacja terenowa.....	20
3.3 Punkt wysycenia	20
3.4 Wskaźnik zazielenienia.....	21
3.5 Wskaźnik niedoboru zieleni.....	22
3.6 Wskaźnik udziału w zieleni	23
4. Wyniki	25
4.1 Dostępność terenów zieleni	25
4.2 Inwentaryzacja terenowa.....	29
4.3 Punkt wysycenia	30
4.4 Wskaźnik zazielenienia oraz tereny zieleni w Łodzi	30
4.5 Wskaźnik udziału w zieleni (GPI)	32
5. Dyskusja	34
6. Wnioski	35
7. Wykaz użytych skrótów i pojęć	36
8. Literatura (pozycje cytowane w opisie)	37
9. Kopie publikacji tworzących rozprawę doktorską	40

Podziękowania

Przede wszystkim pragnę podziękować mojemu opiekunowi naukowemu, promotorowi i mentorowi dr. hab. inż. Krzysztofowi Będkowskiemu, prof. UŁ za pomoc oraz bezcenne sugestie przy wyznaczaniu kierunku rozwoju moich badań naukowych, za nieustające wsparcie o każdej porze dnia i nocy oraz za wiarę w pomyślne ukończenie pracy doktorskiej.

Pragnę także osobno wyrazić wdzięczność Pani Angelice Bierut-Mordylak za cierpliwość i wyrozumiałość z jaką przez ostatnie 8 lat pomagała mi przebrnąć przez wszystkie formalności związane z studiami doktoranckimi.

Na koniec chciałbym w wyjątkowy sposób podziękować mojej żonie Marcie za wysłuchiwanie mnie i motywowanie każdego dnia. Bez Ciebie ta praca by nie powstała.

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia metodę szacowania stopnia zazielenienia dużych miast, będącą próbą ustandaryzowania procesu inwentaryzacji terenów zieleni. Dodatkowym aspektem pracy jest wskazanie miejsc, w których mieszkańcy mają styczność z zielenią oraz oszacowanie jej stanu w sąsiedztwie miejsca zamieszkania.

Głównym problemem badawczym jest opracowanie sposobu wyznaczania stopnia zazielenienia miast o dużej powierzchni (powyżej 150 km²). Obecnie w Polsce, nie obowiązuje jeden sposób inwentaryzacji zieleni, który miałby określone jednolite wytyczne. W konsekwencji mamy do czynienia z różnorodnością w podejściu do definiowania i inwentaryzacji zieleni miejskiej. Wielkość zasobów zieleni miejskiej określa się bowiem w oficjalnych statystykach jako łączną powierzchnię tych działek, które przeznaczone są na cele związane z zielenią (Rozporządzenie, 2021). W zależności od miasta, sposób klasyfikowania terenów zielonych może być inny. W wielu przypadkach nie uwzględnia się roślinności obecnej na nieużytkach, zaś boiska pokryte sztuczną nawierzchnią często wchodzi w skład terenów zieleni. Obszary te z kolei są przedstawiane w statystykach, na bazie których można dowiedzieć się m.in. w jakim stopniu dane miasto jest zazielenione (Rostański, 2000). Dodatkowym czynnikiem jest również wysokość roślinności oraz jej stan, który przy tworzeniu raportów nie jest brany pod uwagę.

Odrębną kwestią pozostaje rozróżnienie terenów wewnątrz miast. Dane bowiem są zagregowane do większych jednostek pomocniczych lub do całego obszaru miasta i nie odzwierciedlają realnych wartości w poszczególnych lokalizacjach. Informacje te odnoszą się również do zróżnicowanego rozkładu gęstości zaludnienia, a więc nie przedstawiają rzeczywistej wartości dla mieszkańców, którzy korzystają zarówno w sposób czynny jak i bierny z otaczającej ich zieleni. W konsekwencji nieznany jest prawdziwy poziom zazielenienia poszczególnych obszarów miejskich, jak również poziom korzyści wynikających z obecnej zieleni. Nie ma również żadnego wyznacznika pozwalającego na rzetelne porównanie miast między sobą.

Badania, które zostały przedstawione w niniejszej pracy, przeprowadzono na terenie miasta Łodzi, czwartego pod względem liczby mieszkańców oraz szóstego pod względem powierzchni miasta w Polsce (GUS, 2024). Dla tego obszaru pozyskano dane źródłowe w postaci zdjęć satelitarnych, danych skaningu laserowego, danych z baz geoprzestrzennych i spisu wyborców, a także dane z przeprowadzonych podstawowych badań terenowych.

Celem pracy, poza opracowaniem metody oszacowania wielkości zasobów zieleni w miejscu zamieszkania oraz ich dostępu dla mieszkańców, była również weryfikacja miejsc, w których istnieje potencjał do dalszego rozwoju zieleni z uwzględnieniem rozmieszczenia miejscowej ludności. W konsekwencji opracowano następujące wskaźniki: wskaźnik zazielenienia (GI – Greenness Index), wskaźnik niedoboru zieleni (GDI – Greenery Deficiency Index) oraz wskaźnik udziału w zieleni (GPI – Greenery Participation Index).

Słowa kluczowe: zieleń miejska, teledetekcja, zobrażenia satelitarne i lotnicze, pokrycie terenu, skanowanie laserowe

Abstract

This paper presents a method for estimating the degree of greenery of individual basic fields in a large city, which is an attempt to standardize the process of inventorying green areas. An additional aspect of the paper is to indicate places where residents have contact with greenery and to estimate its condition in the vicinity of their place of residence.

The main research problem was the method of determining the greenery of cities in Poland, which in many cases is not specified in any guidelines. As a result, we are dealing with diversity in the approach to defining and inventorying urban greenery. The size of urban greenery resources is defined in official statistics as the total area of those plots that are intended for greenery-related purposes (Regulation, 2021). Depending on the city, the method of classifying green areas may be different. In many cases, vegetation present on wastelands is not taken into account, while pitches covered with artificial surfaces are often included in green areas. These areas, in turn, are presented in statistics, on the basis of which one can find out, among other things, to what extent a given city is green (Rostański, 2000). An additional factor is also the height of vegetation and its condition, which is not taken into account when creating reports.

A separate issue is the differentiation of areas within cities. The data is aggregated to larger auxiliary units or to the entire city area and does not reflect the real values in individual locations. This information also refers to the varied distribution of population density, so it does not represent the real value for residents who use the surrounding greenery both actively and passively. As a result, the real level of greenery in individual urban areas is unknown, as well as the level of benefits resulting from the current greenery. There is also no indicator that would allow for a reliable comparison of cities with each other.

The research presented in this paper was conducted in the city of Łódź, the fourth largest city in Poland in terms of population and area. For this area, source data was obtained in the form of satellite images, laser scanning data, data from geospatial databases and the voter list, as well as basic field research.

The aim of the work, apart from developing a method for estimating the size of greenery resources in the place of residence and their access for residents, was also to verify places where there is potential for further development of greenery, taking into account the distribution of the local population. As a result, the following indicators were developed:

Greenness Index (GI), Greenery Deficiency Index (GDI) and Greenery Participation Index (GPI).

Key words: urban greenery, remote sensing, satellite imagery, aerial imagery, land cover, laser scanning

Spis prac wchodzących w skład rozprawy

Rozprawa składa się z siedmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, dotyczących wykorzystania danych teledetekcyjnych oraz baz danych przestrzennych w procesie szacowania wielkości zasobów zieleni miejskiej. Poniżej zaprezentowano, w porządku chronologicznym, noty bibliograficzne publikacji wchodzących w skład rozprawy:

1. Będkowski Krzysztof, **Bielecki Adam**: *Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza*, Teledetekcja Środowiska, vol. 57, 2017, s. 5-14,
<https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2a077004-bb4e-4205-a7b2-1133d9d1d443>
(6 pkt. wg listy MNiSW aktualnej w roku ukazania się publikacji)
2. **Bielecki Adam**: *Porównanie oprogramowania do przetwarzania danych LiDAR w zakresie generowania NMT i NMPT*, Teledetekcja Środowiska, vol. 58, nr 1, 2018, s. 5-11,
<https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-16b2f7be-6c87-449a-9c23-273e575fa579>
(MNiSW, 6 pkt.)
3. Worm Artur, Będkowski Krzysztof, **Bielecki Adam**: *Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi*, Teledetekcja Środowiska, vol. 60, nr 1, 2019, s. 5-20,
<https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-4a024b76-0072-48be-94a6-ceeda9e001322>
(MNiSW, 20 pkt.)
4. **Bielecki Adam**, Będkowski Krzysztof: *The Issue of Green Area Accessibility - the Example of the City of Łódź*, Studia Miejskie, vol. 40, 2020, s. 55-70, DOI:10.25167/sm.1304
(MNiSW: 40 pkt.)
5. **Bielecki Adam**, Będkowski Krzysztof: *The degree of greenery in Łódź city, Poland – clearing up discrepancies between official statistics and satellite data*, Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, vol. 21, nr 4, 2022, s. 489-512, DOI:10.31648/aspal.7623,
(MEiN, 70 pkt.)

6. **Bielecki Adam:** *Pluralizm definicji zieleni miejskiej w literaturze. Standardy, aspekty przyrodnicze i techniczne.* Konwersatorium Wiedzy o Mieście, 2024, vol 37, nr 9 – przyjęty do publikacji.

Praca została włączona do rozprawy doktorskiej mimo braku publikacji, gdyż w świetle art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz Komunikatu Rady Doskonałości Naukowej nr 19/2020 w sprawie składania rozpraw doktorskich z 09.11.2020 r. dopuszczalne jest, aby rozprawa doktorska, jako praca pisemna, składała się po części z prac opublikowanych, jak i takich, których wyniki jeszcze nie zostały opublikowane.

(MNiSW, 40 ptk.)

7. **Bielecki Adam, Będkowski Krzysztof:** *The use of socio-environmental indicators to assess the needs for the development of urban greenery*, Sustainability, vol. 16, nr 21, 2024, 9230. <https://doi.org/10.3390/su16219230>

(MNiSW, 100 ptk.)

W pierwszej publikacji, pt. *Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza*, korzystając ze wskaźnika roślinności NDVI przeanalizowano zależność pomiędzy gęstością zaludnienia w mieście i stopniem zazielenienia, co w rezultacie wykorzystano do przedstawienia stanu wyposażenia w zieleń miejską miejsc zamieszkania i ich bezpośredniego otoczenia.

Artykuł *Porównanie oprogramowania do przetwarzania danych LiDAR w zakresie generowania NMT i NMPT* dotyczy analizy aspektów technicznych obróbki chmury punktów LiDAR na komputerze osobistym w wyposażeniu podstawowym. Celem artykułu była weryfikacja, czy przeciętne jednostki obliczeniowe (np. takie, w które są wyposażone urzędy miejskie) są wystarczające do pracy z danymi przestrzennymi, jakimi są chmury punktów dla terenu dużego miasta.

Praca pt. *Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi* przedstawia rozszerzenie badań teledetekcyjnych wykorzystujących wskaźnik NDVI o dane fotogrametryczne z chmury punktów LiDAR, umożliwiające wykazanie nie tylko gęstości i kondycji roślinności w danym miejscu, ale także jej objętości. Wyniki przedstawiono w podziale na kwartały ulic w Łodzi, a następnie wzbogacono je o analizę dostępności obszarów pokrytych zielenią.

Rozszerzone wyniki badań przedstawiono w pozycji czwartej tj. *The degree of greenery in Łódź city, Poland – clearing up discrepancies between official statistics and satellite data*, w której to skupiono się na dostępności terenów zieleni, ale wyłącznie pełniących funkcję wypoczynkowo-rekreacyjną (tj. parki, zieleńce). Przeanalizowano także odległości w linii prostej od miejsca zamieszkania do terenu zieleni dla całej populacji Łodzi. W konsekwencji otrzymano mapę obszarów z utrudnionym dostępem do publicznej zieleni i miejsc rekreacji, a następnie przeprowadzono również analizy demograficzne na tych terenach.

Opracowanie pt. *Pluralizm definicji zieleni miejskiej w literaturze. Standardy, aspekty przyrodnicze i techniczne* ma na celu wykazanie niekonsekwencji oraz braku koordynacji w nazewnictwie, definicji czy interpretacji terenów zieleni miejskiej, co w konsekwencji daje podstawy do dowolności przy sporządzaniu oficjalnych statystyk i zestawień. W pracy przedstawiono wytyczne oraz standardy zawarte w publicznych przepisach i regulacjach prawnych, jak i definicje zawarte w literaturze naukowej, bez względu na odniesienie terytorialne.

Ostatni artykuł pt. *The use of socio-environmental indicators to assess the needs for the development of urban greenery*, stanowi podsumowanie całego cyklu prac o tematyce zieleni miejskiej i problemie jej rzeczywistego oszacowania w aspekcie czynnika demograficznego. Ma na celu przedstawienie propozycji rozwiązania ww. problemu poprzez zaproponowaną metodę do oszacowania zasobów zieleni miejskiej oraz jej rozmieszczenia względem gęstości zaludnienia.

Siedem powyższych pozycji stanowi pewną całość w podejściu do szacowania i zarządzania obszarami zieleni na obszarach zurbanizowanych, począwszy od sposobów jej inwentaryzacji, zależności w stosunku do gęstości zaludnienia, kwestię dostępności, a także usług ekosystemowych. Powyższe analizy zostały uzupełnione o wnikliwy przegląd dostępnych opracowań i regulacji prawnych, a także o testy odnoszące się do aspektów technicznych związanych z opracowaniem danych ze źródeł publicznych. Opracowane, w ramach przeprowadzonych badań, metody analiz przestrzennych stanowią zatem propozycję rozwiązania kwestii pluralizmu w aspekcie zieleni miejskiej, która to może być z powodzeniem zastosowana w praktycznym zarządzaniu przestrzenią miejską.

1. Wprowadzenie

W literaturze wielokrotnie definiowano tereny zieleni miejskiej. Znane definicje obejmowały zagadnienie bardzo szeroko, opisując je na przykład jako „wszystkie tereny biologicznie czynne, bez względu na rodzaj użytkowania czy własności” (Boehm, 1999), czy też „obszary znajdujące się w miastach i pokryte roślinnością, która w sposób dominujący przeważa w analizowanym miejscu, bez względu na jej funkcje” (Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016).

Oficjalny opis terenów zieleni miejskiej, według Ustawy o ochronie przyrody z 2004 roku, mówi, że są to zespoły roślinności, które muszą być celowo utrzymywane oraz publicznie dostępne (Ustawa, 2004). Zatem jest to podejście do tego terminu, które pomija tereny prywatne oraz te, w których znajduje się dobrze rozwinięta roślinność, lecz która pojawia się w sposób niezaplanowany.

Odrębną kwestią jest określenie zasobów zieleni. W niniejszej rozprawie autor utożsamia ją nie tylko z samym obszarem zajęтым przez roślinność, ale bierze pod uwagę także całą jej kubaturę oraz kondycję, w jakiej się znajduje. Motywacją do takiego podejścia jest fakt, iż zieleń niska pełni znacznie mniejszą rolę środowiskotwórczą, niż zieleń wysoka (Batala, 2009; Wężyk 2021). Również kondycja znajdującej się roślinności na danym terenie ma kluczowy wpływ na poziom świadczonych przez nią usług środowiskowych (Wu et al., 2019).

Roślinność pełni szereg funkcji istotnych dla życia na Ziemi. Szczególną rolę pełni na obszarach zurbanizowanych, gdzie występuje znacznie mniej terenów naturalnych w porównaniu z innymi obszarami. Rośliny bowiem odpowiedzialne są za oczyszczenie środowiska i niwelowanie negatywnych zjawisk (Białobok, 1976). Obszary bogate w zieleń podnoszą jej atrakcyjność, co z kolei ma swoje odzwierciedlenie zarówno w sferze społecznej (Durecka, 2017; Bożetka, 2008), jak i ekonomicznej (Mierzejewska, 2001).

Istnieje zatem obiektywna potrzeba, by weryfikować procesy zachodzące na obszarach miejskich, dotyczące obszarów zieleni w nich się znajdujących. Regularne tworzenie i analizowanie raportów zawierających dane o obszarach zieleni w mieście, pomaga lokalnym władzom w weryfikacji obecnej oraz tworzeniu nowej polityki przestrzennej miasta. Dodatkowo istnieje możliwość zestawiania powyższych danych w odniesieniu do innych aspektów, tj. powierzchni całkowitej, liczby mieszkańców czy poziomu zanieczyszczenia miasta.

Naturalną konsekwencją wyżej wymienionego raportowania jest konieczność porównania stanu rzeczy między różnymi ośrodkami miejskimi. W rezultacie otrzymać można informację o tym, które miasto jest lepiej wyposażone w zieloną infrastrukturę, jaki jest udział mieszkańców w powierzchni zieleni miejskiej czy też w konsekwencji, pośrednio, również jakie są warunki życia obywateli danego miasta.

Obecnie głównym źródłem danych, na których bazują wszelkiego rodzaju raporty, są dane Głównego Urzędu Statystycznego. Dane te prezentują łączną powierzchnię terenu, którego funkcja jest jednoznacznie kojarzona z obecnością zieleni miejskiej. Są to głównie lasy miejskie, parki, zieleńce ale też cmentarze czy tereny rekreacji. Mając na uwadze szczególnie dwa ostatnie przeznaczenia możemy mieć także do czynienia z obszarem głównie pokrytym kamiennymi nagrobkami, którym towarzyszą wybrukowane aleje lub boiska do sportów pokryte sztuczną nawierzchnią lub bardzo niską roślinnością trawiastą, będącą w złym stanie technicznym. Co więcej obszary te liczone są często poprzez sumowanie pola powierzchni działek ewidencyjnych o danym przeznaczeniu w Ewidencji Gruntów i Budynków, nie uwzględniając faktu, iż roślinność nie zawsze kończy się lub dochodzi do granicy obszaru wyznaczonego geodezyjnie.

Dane, na których opierają się obecnie dostępne raporty, nie są spójne w kontekście poszczególnych obszarów. Ewidencja Gruntów i Budynków, Baza Danych Obiektów Topograficznych, czy zestawienia miejscowych ośrodków geodezyjnych, w wielu przypadkach nie zgadzają się ze sobą (Rycina 1). Tym samym różne bazy danych mogą w odmienny sposób przedstawiać wartość powierzchni zajętej przez tereny zielone (Bielecki, Będkowski, 2022).



Ryc. 1 Porównanie zasięgów przestrzennych terenów zieleni z różnych baz danych na przykładzie Parku Helenów w Łodzi

Źródło: Bielecki, 2024

Mimo ważnej roli terenów zieleni w życiu mieszkańców miast, przestrzenie te są często niedoszacowane i mniej doceniane w procesach planowania urbanistycznego. Brak jednolitego miernika, który mógłby rzetelnie ocenić stan terenów zieleni w miastach, utrudnia skuteczne zarządzanie tymi obszarami. Wynika to m.in. z wielości istniejących definicji zieleni miejskiej (Tabela 1). Dane dotyczące stopnia zazielenienia poszczególnych miast opierają się najczęściej na polu powierzchni terenu o funkcji zaklasyfikowanej jako teren zieleni. Tymczasem kluczowe znaczenie ma nie tyle sama powierzchnia zajęta przez roślinność, ile jej całkowita objętość oraz kondycja (Rżańska-Wieczorek, 2016).

Tabela 1. Wybrane definicje zieleni miejskiej oraz ich autorzy

Definicja zieleni miejskiej	Autor, rok
-----------------------------	------------

Wszystkie tereny biologicznie czynne w granicach miasta	Böhm w Walkowicz, 2002
Przestrzeń porośnięta roślinnością na obszarach miejskich	Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016
Obszary krajobrazowe wraz z elementami z nimi związanymi porośnięte roślinnością, pełniące funkcje publiczne	Ustawa, 2004
Parki, działki, lasy i ich obrzeża, pojedyncze drzewa, tereny wykorzystywane rolniczo, ogrody, obszary doświadczeń przyrodniczych oraz obszary zbliżone do natury towarzyszące obszarom komunikacyjnym	Niemiecka federalna ustawa o ochronie przyrody i krajobrazie, 2009
Wszelkie formy zieleni otwartej i zielonej zabudowy, parki, cmentarze, ogrody działkowe, ugory, place zabaw, tereny sportowe, zieleń uliczną, zieleń osiedlową, tereny zielone na budynkach użyteczności publicznej, obszary ochrony przyrody, lasy i ogrody prywatne oraz ziemia rolna, elewacje i dachy porośnięte roślinnością, roślinność na obiektach infrastrukturalnych oraz zieleń we wnętrzach budynków	Federalne Ministerstwo Środowiska, Ochrony Przyrody, Budownictwa i Bezpieczeństwa Jądrowego Niemiec, 2015
Element przyrody tworzący określoną wartość dla człowieka	Parlamentarne Biuro Nauki i Technologii Wielkiej Brytanii, 2016
Las miejski (urban forestry) - obszary leśne, ale także grupy drzew, pojedyncze drzewa, a także krzewy i roślinność występującą w parkach, cmentarzach i na terenach ogrodowych	Konijnendijk i in. 2006; Escobedo i in. 2011; Ferrini i in. 2017
Zielona infrastruktura – tereny zdolne do absorpcji wód opadowych	Grabowski, 2022; Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska, 2019
Sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych, zaprojektowanych i zarządzanych w taki sposób, aby zapewnić jak największe spektrum usług ekosystemowych wyłącznie na obszarze miejskim	Komisja Europejska 2013
Niebiesko-zielona infrastruktura - lasy, naturalne tereny zielone, rzeki, potoki i inne ciekі, obszary naturalnej retencji, łąki, pola, pastwiska, tereny przybrzeżne, drzewa i krzewy	Solarek, 2016
Tereny zielone i zbiorniki wodne, tereny podmokłe, ogrody prywatne, drzewa przyuliczne, obszary porośnięte koronami drzew oraz tereny przeznaczone do użytku publicznego	Europejska Agencja Środowiskowa, 2019
Parki, skwery i zadrzewione cmentarze (nie wszystkie) zlokalizowane w granicach zabudowy miejskiej	Corine Land Cover, EEA, 2017

Zurbanizowane obszary zielone, obszary sportu i rekreacji, obszary rolne, pół-naturalne, bagna oraz lasy	Urban Atlas, EEA 2009
Parki krajobrazowe, skwery, tereny zielone (ale tylko te poza ulicami), ogrody botaniczne, ogrody działkowe oraz tereny zieleni nieurządzonej niesklasyfikowane jak lasy i tereny porośnięte drzewami i krzewami	Rozporządzenie, 2019
Tereny zalesione, drzewa i krzewy, cmentarze oraz trawniki	BDOT
Tereny sportowo-rekreacyjne, tereny zielone, cmentarze, roślinność (cała), tereny rolne, lasy, zagajniki, stepy	Niemiecki Urząd Statystyczny
Lasy, krzewy, użytki zielone, powierzchnie samoistnie odnowione	LUCAS
Wszystkie drzewa, niezależnie od tego, czy występują w lasach, czy występują w grupach, czy pojedynczo, i są zlokalizowane w obszarach miejskich lub podmiejskich	FAO
Teledetekcyjny wskaźnik wegetacyjny NDVI powyżej 0,7	Tomaszewska i in. 2011
NDVI powyżej 0,2 dla ortofotomapy oraz NDVI powyżej 0,5 dla zdjęć satelitarnych	Pluto- Kossakowska i in. 2018
NDVI > 0,1	Pyra i Adamczyk 2018, Robak i in. 2019
NDVI > 0,3	Bielecki i Będkowski 2022

Źródło: Bielecki, 2024

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na ocenę stanu zazielenienia danego obszaru są relacje między terenami zieleni a obszarami zabudowanymi. Miasta zostały stworzone z myślą o potrzebach ich mieszkańców, co implikuje, że obecna w nich roślinność powinna w możliwie największym stopniu spełniać wymagania i oczekiwania lokalnych społeczności. Dlatego też w pracy wykorzystano dane demograficzne pochodzące z rejestru wyborców dla poszczególnych jednostek pomocniczych – czyli osiedli w Łodzi, w celu określenia dostępności miejscowej ludności do terenów zieleni pod różnymi aspektami (Bielecki, Będkowski, 2020).

Podstawowym źródłem danych w przeprowadzonych badaniach były dane teledetekcyjne. W pracy wykorzystano dane satelitarne misji Landsat 8 oraz chmurę punktów z lotniczego skaningu laserowego z projektu ISOK (projekt Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami). Zdjęcie satelitarne wykonano 3 czerwca 2015 roku (track p189, line r024), pobrano je z repozytorium US Geological Survey (EarthExplorer). Obraz ten cechuje się rozdzielczością przestrzenną (GSD) wynoszącą 30m × 30m,

będącą w dalszych krokach determinantą dla pól podstawowych, dla których wyliczano wartości poszczególnych wskaźników.

W ramach badań korzystano również z danych przechowywanych w publicznych repozytoriach prowadzonych przez instytucje publiczne w Polsce. Przeanalizowano dane gromadzone przez Główny Urząd Statystyczny (Bank Danych Lokalnych), Główny Urząd Geodezji i Kartografii (Ewidencja Gruntów i Budynków), Marszałka województwa łódzkiego (BDOT10k) oraz Łódzki Ośrodek Geodezji (Mapa zieleni Miejskiej). Dane te były szczególnie pomocne przy porównaniu wyników analiz na bazie autorskiej metody.

Należy podkreślić, iż wyniki otrzymane w ramach badań nie stanowią szczegółowo dokładnej informacji o rodzaju, kondycji i gęstości zieleni w danym miejscu. Metoda została opracowana dla miasta dużego, o powierzchni powyżej 150 km². Taką powierzchnię zajmuje obecnie 15 miast w Polsce (GUS, 2024), co z kolei stanowi porównywalną liczbę do liczby stolic regionów (województw) w Polsce, których mamy łącznie 18 (14 stolic oraz 4 miasta posiadające częściowe funkcje stolic województwa). W uproszczeniu można przyjąć, iż metoda opisana w niniejszym opracowaniu przeznaczona jest dla miast wojewódzkich.

Niniejsza rozprawa stanowi propozycję rozwiązania problemu braku jednorodności w podejściu do szacowania terenów zieleni miejskiej występującego zarówno w Polsce jak i za granicą. Dodatkowo wykorzystując dane demograficzne przedstawiono rzeczywistą sytuację związaną z warunkami życia w Łodzi oraz zaproponowano metodę do wykorzystania przy wyznaczaniu miejsc, w których pilnie należy zwiększyć dostępność zieleni w miejscach zamieszkania. Metoda może znaleźć zastosowanie w innych dużych miastach.

2. Problem badawczy

Głównym celem niniejszej rozprawy jest opracowanie sposobu (metody) wykorzystania darmowych i ogólnodostępnych danych teledetekcyjnych oraz fotogrametrycznych do przedstawienia rzeczywistego stanu terenów zieleni w dużych aglomeracjach miejskich. Analiza skupia się na możliwościach wykorzystania tych danych przez osoby posiadające ograniczone doświadczenie w zakresie ich przetwarzania oraz z wykorzystaniem podstawowego sprzętu komputerowego.

Kolejny aspekt to problem uwzględniania rozmieszczenia ludności, a w konsekwencji pokazania, jakie warunki występują w bezpośrednim otoczeniu miejsca zamieszkania oraz jej dostępność dla mieszkańców. Autorska metoda oraz analizy wykonane za jej pomocą, przedstawiają faktyczny stan dostępności i możliwości korzystania z obszarów pokrytych zielenią na terenie całego miasta.

Jednym z kluczowych założeń badawczych było stworzenie warunków umożliwiających porównanie poszczególnych fragmentów miasta oraz różnych miast o podobnej skali. Realizacja tego celu wymagała opracowania wymiennych wskaźników, które zostały ustalone przy zastosowaniu opisanego wcześniej podejścia metodologicznego.

Ostatnim zagadnieniem poruszonym w niniejszej pracy był problem możliwości integrowania publicznych rejestrów z danymi uzyskanymi za pomocą opisywanej metody. Aby osiągnąć rzeczywistą wartość praktyczną, konieczne byłoby publikowanie danych wyliczonych w przedstawiony sposób w centralnym, dostępnym publicznie repozytorium. Takie rozwiązanie umożliwiłoby zainteresowanym stronom swobodny dostęp do tych informacji oraz ich wykorzystanie w dalszych badaniach i analizach.

Podsumowując, zaproponowana metoda, spełnia pierwotne założenia i posiada następujące własności:

1. Korzysta z publicznych, darmowych danych przestrzennych (brak kosztów i konieczności zamawiania specjalistycznych danych, brak konieczności samodzielnego zbierania danych)
2. Jest względnie łatwa w implementacji
3. Wykorzystuje dane przestrzenne, będące w posiadaniu urzędów
4. Nie wymaga stosowania zaawansowanego sprzętu komputerowego (Bielecki, 2019)

5. Jest niezależna od fizjonomii i morfologii miasta
6. Uniwersalna dla miast klimatu umiarkowanego
7. Rezultaty końcowe są kompatybilne (porównywalne) z obecnymi danymi

3. Metody badawcze

3.1 Istniejące wskaźniki

W pracy wykorzystano znane i dobrze opisane wskaźniki teledetekcyjne bazujące na satelitarnych obrazach wielospektralnych oraz na chmurze punktów LiDAR będącej wynikiem lotniczego skaningu laserowego. Podstawowym wskaźnikiem wykorzystanym w pracy był wskaźnik NDVI (ang. Normalized Difference Vegetation Index - Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji) (Rouse et. al.1974):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

NIR – wartość odbicia spektralnego z zakresu bliskiej podczerwieni (ang. : Near InfraRed),

RED – wartość odbicia spektralnego z zakresu czerwonego (ang.: Red).

Wartość NDVI dla poszczególnych form pokrycia terenu zależy od ich właściwości spektralnych, tj. zdolności do odbijania, pochłaniania i przepuszczania promieniowania elektromagnetycznego (Bannari et. all, 1995). Należy jednak zaznaczyć, iż na obszarze pokrytym przez pojedynczy piksel, zazwyczaj występuje wiele różnych form pokrycia terenu, nie tylko zieleń (Wirth i in. 1982, Kressler i in. 2000). W takim przypadku zarejestrowana wartość NDVI jest średnią ważoną wartości indeksu wszystkich obiektów w obszarze pikseli, przy czym wagą jest udział powierzchni tych obiektów w obszarze pikseli.

W pracy posłużono się również wskaźnikiem VHM (ang. Vegetation Height Model – Wysokościowy Model Roślinności), który obliczono za pomocą sklasyfikowanej chmury punktów LiDAR. Dane źródłowe stanowiły chmury punktów o gęstości nie mniejszej niż 12 punktów na metr kwadratowy, poddane automatycznej klasyfikacji na poniższe klasy:

- punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane,
- punkty leżące na gruncie,
- **punkty reprezentujące niską roślinność, tj. w zakresie 0-0.40 m,**
- **punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0.40-2.00 m,**
- **punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2.00 m,**
- punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie,
- szum,
- punkty reprezentujące obszary wód,
- punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia.

W dalszych krokach wykonano Numeryczny Model Terenu (NMT) na podstawie punktów sklasyfikowanych jako grunt oraz Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) dla roślinności (punkty sklasyfikowane jako roślinność wysoka, średnia i niska oraz grunt). Następnie odjęto wartości NMT od NMPT uzyskując tym samym informację o wysokości zieleni w danym polu podstawowym (30m × 30m).

3.2 Inwentaryzacja terenowa

Zgromadzone dane zostały uzupełnione wynikami przeprowadzonej inwentaryzacji terenowej, której celem było pozyskanie informacji, niemożliwych do uzyskania za pomocą metod teledetekcyjnych z poziomu nadziemnego. Pomiary skoncentrowały się na ustaleniu podstawowych wymiarów drzew, w tym wysokości podstaw koron. Podjęto decyzję o pomiarze drzew usytuowanych w pobliżu skrzyżowań ulic, ponieważ w takich lokalizacjach wysokości podstaw koron drzew są zwykle największe, co jest zgodne z regulacjami dotyczącymi widoczności dla uczestników ruchu drogowego. Celem tych badań była chęć określenia minimalnej wartości grubości warstwy roślinności dla drzew wysokich. W trakcie pomiarów wykorzystano zaawansowane narzędzia, takie jak dalmierz laserowy, wysokościomierz optyczny, taśmę mierniczą oraz aplikację mobilną ArcGIS Collector, co zapewniło dokładność i precyzję uzyskanych danych.

Proces wyboru próby terenowej był następujący:

1. Pobrano dane o drogach publicznych z bazy BDOT10k.
2. Wybrano jednojezdniowe drogi główne, lokalne i zbiorcze – wyznaczono tym sposobem 1418 skrzyżowań na terenie miasta Łodzi.
3. Spośród wyznaczonych skrzyżowań wybrano jedynie te, które mają 4 wloty. W konsekwencji otrzymano 336 takich miejsc.
4. Z uwagi na ograniczone możliwości zdecydowano się na wylosowanie 20% skrzyżowań (69), na których przeprowadzono inwentaryzację terenową.

3.3 Punkt wysycenia

Punkt wysycenia wartości NDVI był następnym elementem składowym opracowanych wskaźników. Opiera się on na przyjęciu wartości grubości warstwy zieleni, po osiągnięciu której NDVI nie wzrasta, tym samym nie przedstawia już rzeczywistej ilości zieleni znajdującej się na danym obszarze (Huete et. al., 2007; Gu et. al., 2013). Punkt ten wyznaczono poprzez wyznaczenie krzywej zależności wartości NDVI dla wszystkich pól podstawowych,

pokrytych w całości przez roślinność, od wartości wskaźnika VHM dla tych obszarów. Punkt wysycenia wskazano w miejscu, gdy wykres w widoczny sposób przestaje znacząco przyrastać.

Wszystkie wartości przestrzenne wyliczono bazując na wielkości rastra o wymiarach $30\text{m} \times 30\text{m}$ o położeniu zgodnym z pikselami rastra zobrazowania Landsat 8. Przyjęto założenie, iż dla dużego miasta w skali Polski (powyżej 150 km^2 powierzchni, Łódź - o powierzchni 293 km^2) jest to rozdzielczość wystarczająco dokładna, zaś nie spowoduje zapotrzebowania na zaawansowane jednostki obliczeniowe. W rezultacie uzyskano 325 683 jednostki bazowe.

Wielkość jednostki podstawowej podyktowana była również chęcią określenia wielkości sąsiedztwa, która ma bezpośredni wpływ na warunki życia w danym miejscu zamieszkania (Kuczyńska, 2008). Na potrzeby tej pracy uznano, iż otoczenie w promieniu 50 metrów spełnia to kryterium.

3.4 Wskaźnik zazielenienia

Wielkość zasobów zieleni w analizowanych polach podstawowych scharakteryzowano za pomocą wskaźnika zazielenienia (Greenness Index – GI), którego celem jest wyrażenie ilości zasobów zieleni w analizowanych polach podstawowych. Przy jego konstruowaniu szczególną wagę przywiązano do punktu wysycenia NDVI (NDVI_{sat}). Przyjęto, że do tego momentu wskaźnikiem ilości zieleni jest sama wartość NDVI, a następnie miarą ilości zieleni jest grubość warstwy roślinności.

$$GI_i = \frac{\text{NDVI}_i}{2\text{NDVI}_{\text{sat}}}, \text{ for } h_i < h_{\text{sat}} \quad (2)$$

$$GI_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(h_i - h_p) - (h_{\text{sat}} - h_p)}{(h_{\text{max}} - h_p) - (h_{\text{sat}} - h_p)} \right), \text{ for } h_i \geq h_{\text{sat}} \quad (3)$$

gdzie:

h_i – wysokość roślinności na i-tym polu podstawowym

h_p – średnia wysokość podstawy korony

h_{sat} – wartość punktu wysycenia

h_{max} – wysokość najwyższej zieleni (drzew) na danym terenie (w mieście)

NDVI_i – wartość NDVI w i-tym polu podstawowym

NDVI_{sat} – wartość NDVI dla punktu wysycenia

Ponieważ wartości h_p w powyższym wzorze się redukują, wzór 3 można uprościć do następującej postaci:

$$GI_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_i - h_{sat}}{h_{max} - h_{sat}} \right), \text{ for } h_i \geq h_{sat} \quad (4)$$

Dzięki takiej strukturze wskaźnik zazielenienia może osiągnąć wartość $0 \leq GI \leq 1$, przy czym GI wynosi 0,5 w punkcie nasycenia. Znaczenie poszczególnych składowych równania (4) zależy od wysokości zieleni. Dla obszarów o niskich wartościach wysokości zieleni kluczowa jest wartość wskaźnika NDVI, ale wraz ze wzrostem wysokości zieleni coraz ważniejsza staje się średnia wysokość zieleni oparta na Modelu Wysokościowym Roślinności (VHM) (Nelson, 1997), a NDVI staje się mniej istotne (zgodnie z opisem problemu nasycenia wartości NDVI).

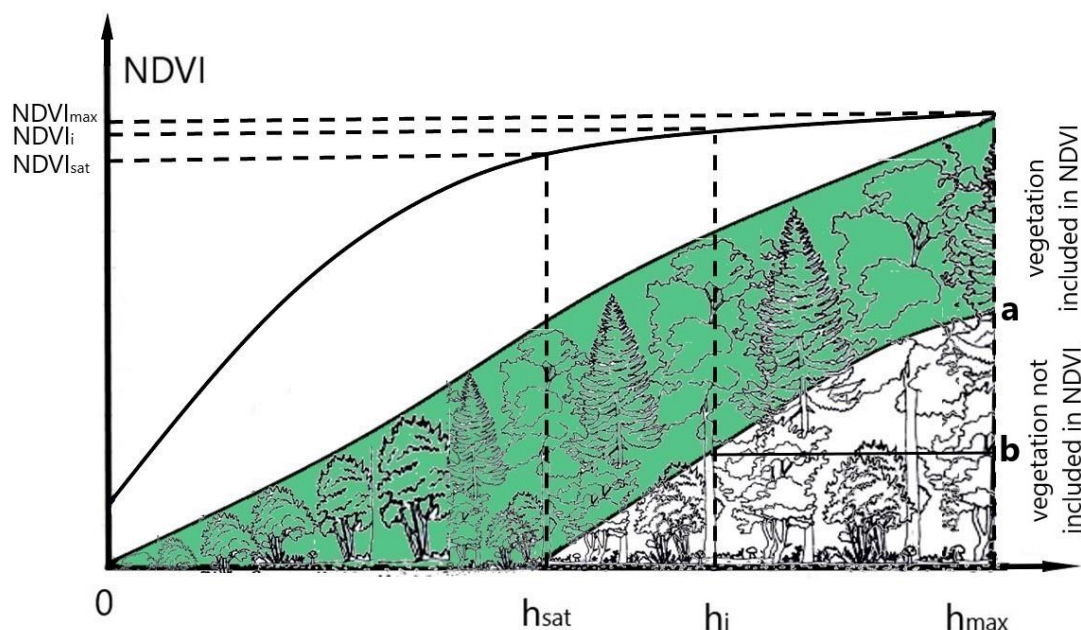
3.5 Wskaźnik niedoboru zieleni

Wskaźnik zieleni GI przekształcono w wartość, którą nazwano wskaźnikiem niedoboru zieleni (GDI - Greenery Deficiency Index). Jego celem jest wyrażenie ilości niedoboru zieleni w analizowanym i -tym polu bazowym, a tym samym zasygnalizowanie potrzeby jego uzupełnienia:

$$GDI_i = 1 - GI_i \quad (5)$$

GI_i – wartość wskaźnika zazielenienia w i -tym polu.

W formie zaproponowanej we wzorze 5 wskaźnik GDI spełnia warunek $1 \leq GDI_i \leq 0$, przy czym wartość 1 występuje na obszarach bez zieleni, a 0 tam, gdzie występuje w pełni rozwinięta roślinność. Wskaźnik GDI_i wyraża zatem postulat (oczekiwanie), że na danym i -tym obszarze (polu podstawowym) poziom „ilości” zieleni odpowiada położeniu punktu h_{max} (Ryc.2), który można uznać za optymalny, a więc przynajmniej teoretycznie może być również powiązany z $NDVI_{max}$, czyli najwyższymi wartościami wysokości roślinności i NDVI na badanym obszarze. W tym podejściu $GDI_i = 0$ odpowiadałoby obszarom parków miejskich lub lasów.



Ryc. 2. Wzajemne powiązania wskaźnika NDVI i wysokości roślinności: po przekroczeniu punktu nasycenia (h_{sat} , $NDVI_{sat}$) wskaźnik NDVI nie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu wysokości warstwy roślinności, linia **a** wskazuje granicę zamierania gałęzi drzew z powodu braku dopływu energii świetlnej, linia **b** wskazuje wysokość, do której drzewa są ogoławane z gałęzi w warunkach miejskich w celu zapewnienia widoczności i komunikacji.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2024

3.6 Wskaźnik udziału w zieleni

Aby wskazanie rozmieszczenia miejsc z niedoborem zieleni, dokonane przy użyciu wskaźnika GDI, było kompletne, tj. odpowiadało rzeczywistym potrzebom, konieczne jest uwzględnienie parametrów charakteryzujących rozmieszczenie ludności. W tym celu zaproponowano utworzenie wskaźnika udziału w zieleni (GPI - Greenery Participation Index). Podział bowiem terenów zielonych w miastach powinien być ustalany na podstawie wielkości populacji, gęstości zaludnienia i użyteczności dzielnic miejskich (Lanxin et. al., 2017).

Liczbę mieszkańców z rejestru wyborców dla każdego osiedla podzielono przez łączną powierzchnię wszystkich kondygnacji budynków mieszkalnych w danej jednostce, tym samym otrzymano średnią powierzchnię w budynku mieszkalnym przypadającą na jednego mieszkańca. Na tej podstawie otrzymano liczbę mieszkańców w danym polu podstawowym (P_i).

Do obliczenia wskaźnika GPI (7) wykorzystano dwa wskaźniki pomocnicze: wskaźnik niedoboru zieleni GDI (5) oraz wskaźnik populacji lokalnej LPI (Local Population Index) (6):

$$LPI_i = \frac{P_i}{P_{max}} \quad (6)$$

P_i – liczba mieszkańców w danym polu podstawowym,

P_{max} – najwyższa wartość liczby mieszkańców w polu podstawowym badanego obszaru.

W tym podejściu LPI_i staje się wagą, czyli wskaźnikiem określającym rangę i-tego pola bazowego, gdyż zakładamy, że pilność rozbudowy zieleni jest również wprost proporcjonalna do liczby mieszkańców. Ostatecznie wartość wskaźnika GPI należy zatem obliczyć w następujący sposób:

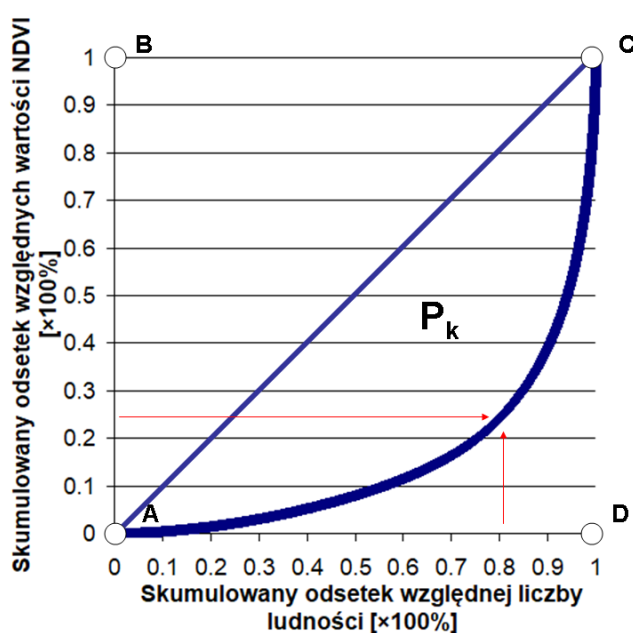
$$GPI_i = GDI_i \times LPI_i \quad (7)$$

Obliczony wskaźnik uwzględnia zarówno roślinność już istniejącą na danym polu, w sąsiadujących z nim polach podstawowych, jak i liczbę mieszkańców na tym konkretnym polu. Wskaźnik ten ma ponownie charakter porządkujący, tzn. klasyfikuje pola podstawowe (30m × 30m), ustalając kolejność miejsc uwzględniając warunki życia pod względem udziału mieszkańców w otaczającej zieleni. Im niższa wartość, tym sytuacja jest lepsza.

4. Wyniki

4.1 Dostępność terenów zieleni

Według wyników, mieszkańcy miasta korzystają z zasobów zieleni w różnym stopniu oraz w zależności od ich miejsca zamieszkania. Powierzchnia pola wieloboku koncentracji oraz współczynnik koncentracji wynoszą odpowiednio 0,355 i 0,710 (Ryc. 3). Taka wartość współczynnika wskazuje na znaczną koncentrację zarówno ludności, jak i NDVI. Według Ryciny 3, około 80% mieszkańców ma dostęp do jedynie 25% zasobów zieleni dostępnych w ich okolicach.

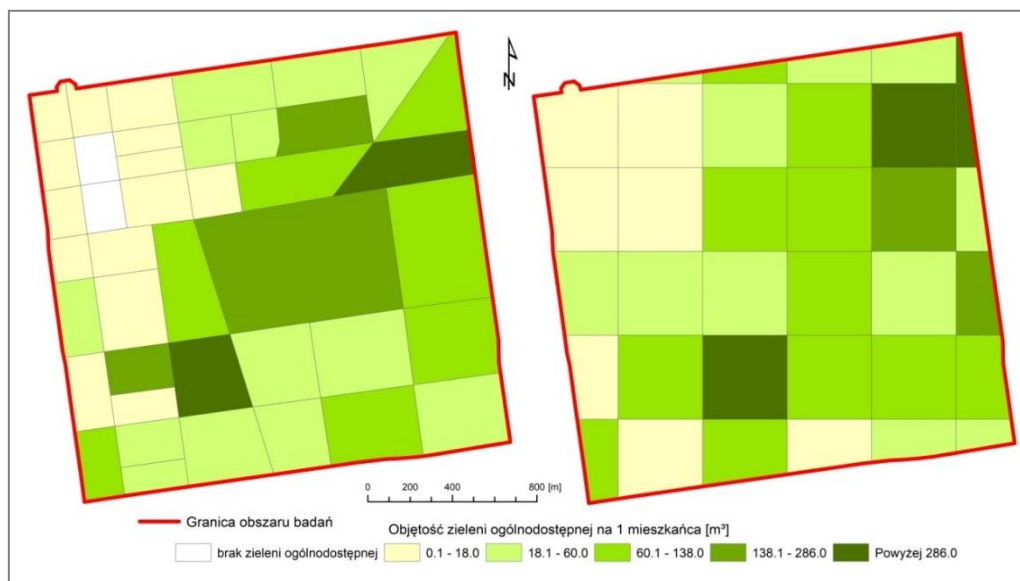


Ryc. 3. Wielobok koncentracji wyznaczony za pomocą skumulowanej względnej wartości NDVI oraz skumulowanej względnej liczby mieszkańców.

Źródło: Będkowski, Bielecki 2017

Następne wyniki odnoszą się do fragmentu centrum Łodzi, o kształcie zbliżonym do kwadratu o boku około 2 km. Obliczono objętość roślinności ogólnodostępnej w przeliczeniu na jednego mieszkańca dla każdego pojedynczego pola podstawowego (Ryc.4). W wynikach znaleźć można jednostki nieposiadające roślinności ogólnodostępnej (zaznaczone na biało). Pozostałe 5 przedziałów objętości wyznaczono za pomocą metody przedziałów naturalnych uśrednionych do wartości w kwartałach i siatce. Do ich reprezentacji wykorzystano barwy od jasnej żółtej, symbolizującej wyjątkowo mały zasób roślinności ogólnodostępnej w jednostce

odniesienia, aż do jasnych i ciemnych odcieni barwy zielonej, dla największych wartości zasobów.



Ryc. 4. Objętość roślinności ogólnodostępnej w przeliczeniu na 1 mieszkańca - w kwartałach i regularnej siatce.

Źródło: Worm et. al., 2019

Szczegółowe wyniki dla wszystkich analiz przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry charakteryzujące roślinność na badanym obszarze

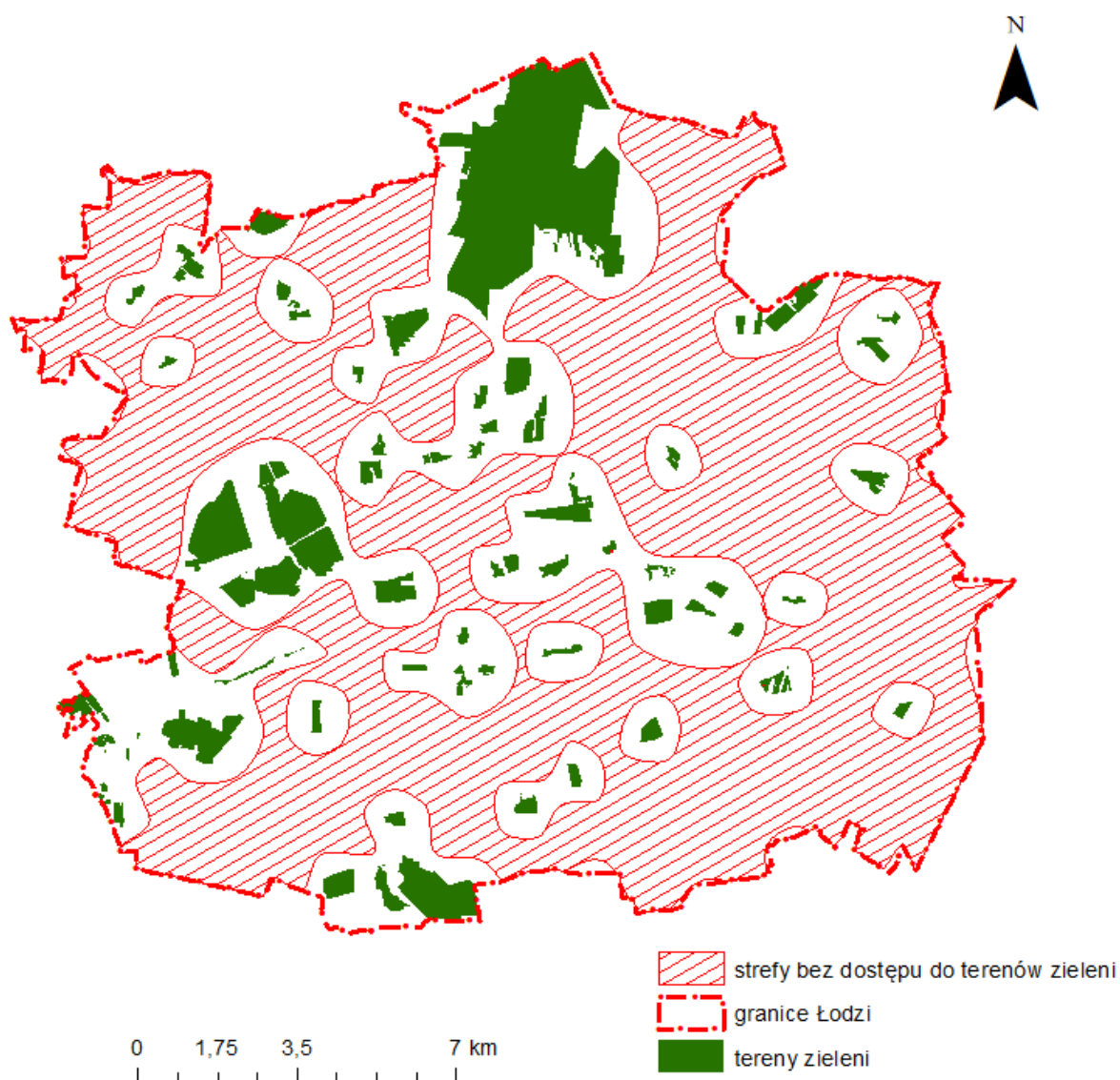
Kategoria	Parametr	Wartość	Na jednego mieszkańca	Na 1 m ² obszaru
Roślinność ogółem	Powierzchnia	679681,6 m ²	17,46 m ²	0,17 m ²
	Objętość	5994219 m ³	153,99 m ³	1,5 m ³
Roślinność wysoka	Powierzchnia	507157,6 m ²	13,03 m ²	0,13 m ²
	Objętość	5719372 m ³	146,93 m ³	1,43 m ³
Roślinność ogólnodostępna	Powierzchnia	305967,7 m ²	7,86 m ²	0,08 m ²
	Objętość	2874494 m ³	73,85 m ³	0,72 m ³
Roślinność ogólnodostępna wysoka	Powierzchnia	231353,3 m ²	5,94 m ²	0,06 m ²
	Objętość	2759698 m ³	70,9 m ³	0,69 m ³

Źródło: Worm et. al., 2019

Kolejne wyniki reprezentują zieleń w miejscu zamieszkania, tj. w polu o wymiarach $90\text{ m} \times 90\text{ m}$. Wyznaczono 200 pikseli rastra $90\text{ m} \times 90\text{ m}$, które spełniają dwa warunki, tj. co najmniej 50% stanowią tereny zielone wg EGiB i są terenami mieszkalnymi (na 14 569 zamieszkałych pól podstawowych). Mieszka w nich 2537 osób (na 624372 mieszkańców Łodzi wyznaczonych metodą mieszkaniową), co stanowi zaledwie 0,41% wszystkich mieszkańców Łodzi. Zdefiniowana powierzchnia stanowi 0,54% powierzchni Łodzi.

W przypadku zieleni w pobliżu miejsc zamieszkania, tj. w strefie o promieniu 500 m, dla każdego piksela rastra $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ sprawdzano, czy w promieniu do 500 m od ich centralnego punktu znajdują się piksele, które zostały włączone do terenów zielonych. Dodatkowo analiza uwzględnia wielkość terenów zielonych – rozważano dwa warianty: zieleń, w jednym kompleksie, co najmniej 1 pole podstawowe (0,81 ha) lub 6 pól podstawowych (4,86 ha).

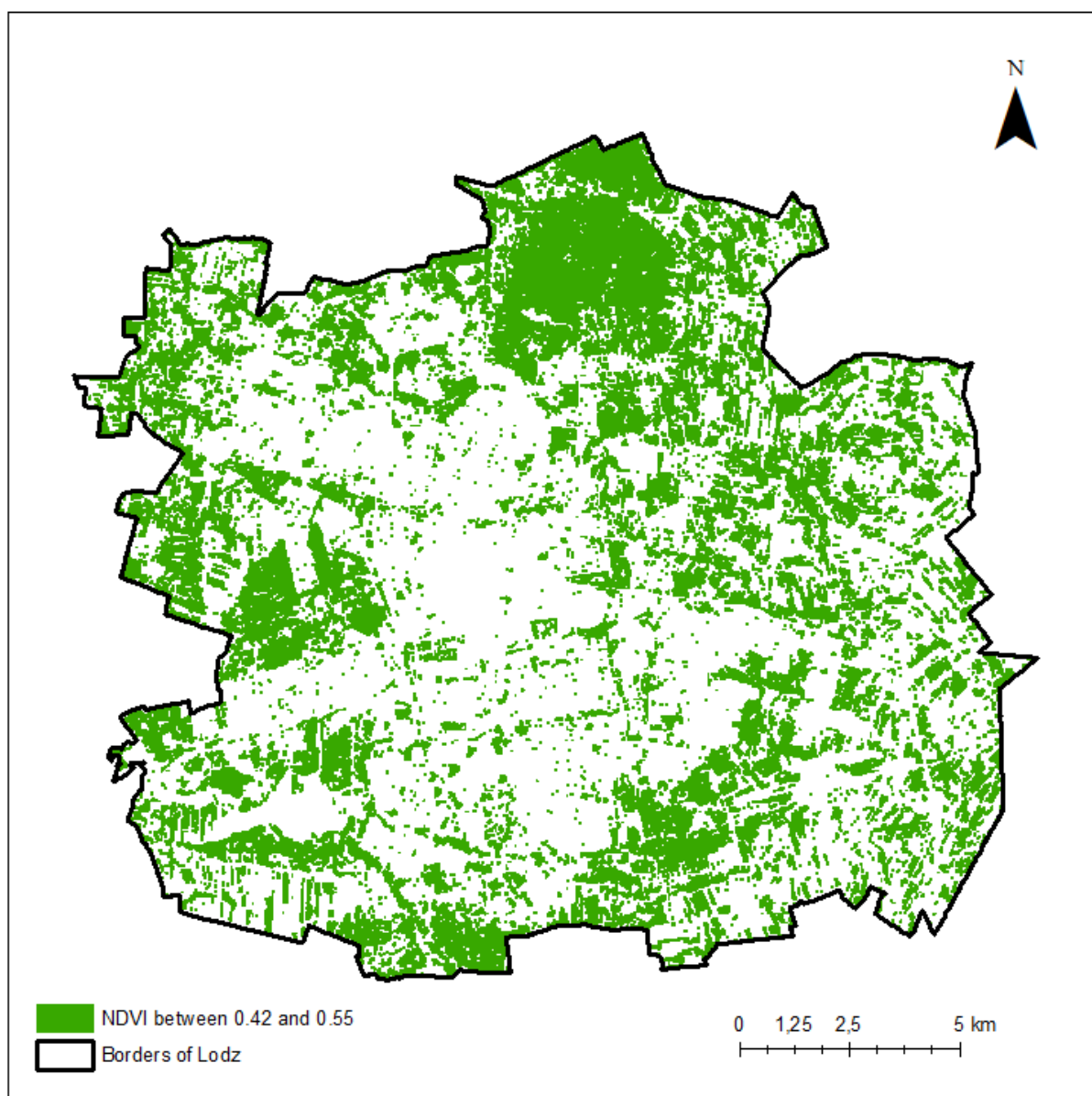
Strefa, której mieszkańcy nie mieli dostępu do nawet niewielkiego terenu zielonego (0,81 ha), zajmuje $139,5\text{ km}^2$, co stanowi 47,6% całkowitej powierzchni miasta (Ryc. 5). Wykorzystując wcześniej wspomniany sposób obliczania gęstości zaludnienia, obliczono, że w tej strefie mieszka około 20% wszystkich mieszkańców miasta. Wyznaczono także największą odległość do terenów zielonych, która wynosi 1498 m. Zwiększenie wymagań, poprzez zmianę wymagań dotyczących minimalnej powierzchni dostępnej dla rastra o wielkości 6 pikseli (4,86 ha), spowodowało, że strefa bez dostępu do zieleni wzrosła do 172 km^2 (około 60% powierzchni miasta). Na tak oznakowanym obszarze mieszka prawie połowa mieszkańców Łodzi (293 tys., 45%). Największa odległość do parku wynosi w tym przypadku 1928 m.



Ryc. 5. Strefy, w których odległość do terenu zielonego (objętego EGİB) o powierzchni co najmniej 0,81 ha (odpowiadającej powierzchni 1 oczka ekranu) przekracza 500 m.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2020

W kolejnym artykule na podstawie wyznaczonych charakterystycznych wartości NDVI dla poszczególnych typów terenów zielonych w Łodzi, sporządzono mapę terenów położonych w granicach Łodzi, na których gęstość i jakość roślinności jest zbliżona do tych form użytkowania gruntów, które są uznawane za obszary rekreacji i wypoczynku (Ryc. 6).



Ryc. 6. Tereny o wartości wskaźnika NDVI mieszczącej się w granicach charakterystycznych dla terenów oficjalnie uznanych za tereny zielone w Łodzi ($0,42 < \text{NDVI} \leq 0,55$).

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2022

4.2 Inwentaryzacja terenowa

Pomiarom w terenie poddano wyłącznie drzewa znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie skrzyżowań dróg. Łącznie zinwentaryzowano 237 drzew. Z kolei przy 9 skrzyżowaniach nie znajdowało się żadne drzewo. Uzyskano następujące średnie wartości:

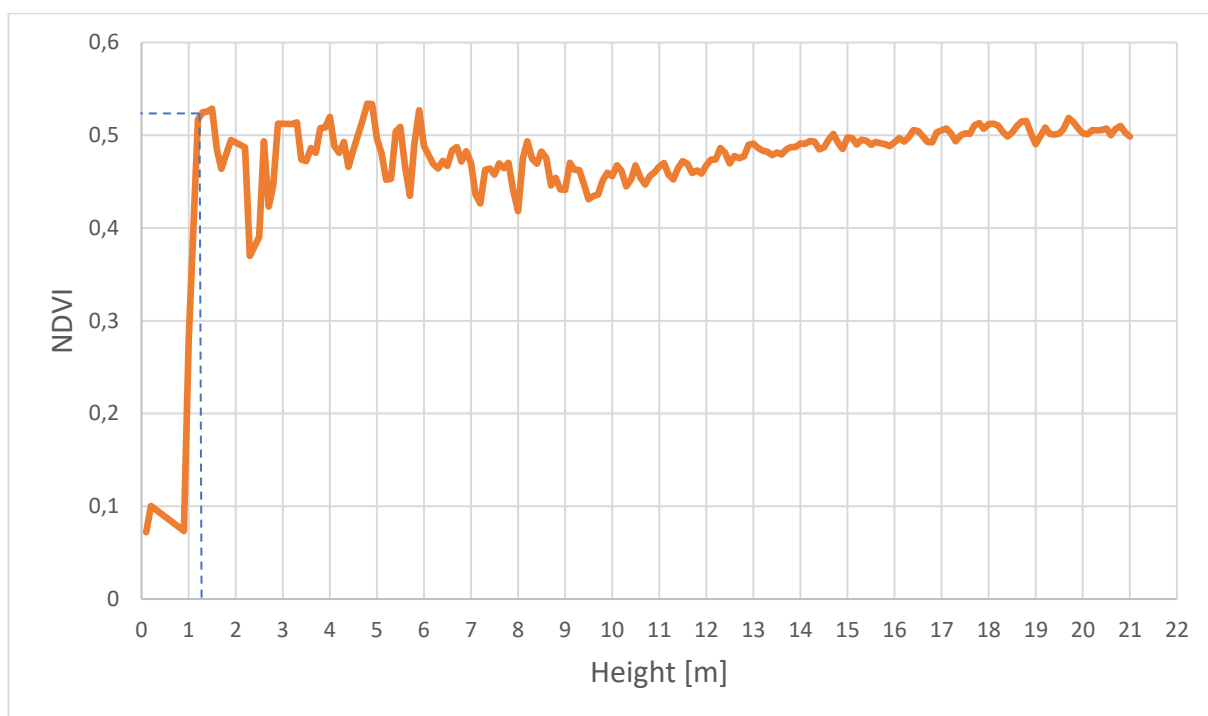
- Obwód pnia – 1,09 m
- Średnica korony – 8,18 m

- Wysokość podstawy korony – 2,90 m
- Wysokość drzewa – 11,07 m

Kluczową dla dalszego postępowania wartością była średnia wysokość podstawy korony wynosząca 2,9 m.

4.3 Punkt wysycenia

Zjawisko wysycenia NDVI jest wyraźnie widoczne na Rycinie 7, który przedstawia wykres średniej ruchomej wartości NDVI w zależności od argumentu wysokości roślinności. Na wykresie tym wyznaczono próg, dla którego wartość NDVI przestaje gwałtownie wzrastać, a jednocześnie amplituda wartości NDVI staje się coraz mniejsza. Wartość ta jest wyraźnie widoczna i została przyjęta arbitralnie. W ten sposób wyznaczyliśmy położenie i wartość NDVI punktu nasycenia ($h_{\text{sat}} = 1,2 \text{ m}$, $\text{NDVI}_{\text{sat}} = 0,53$).



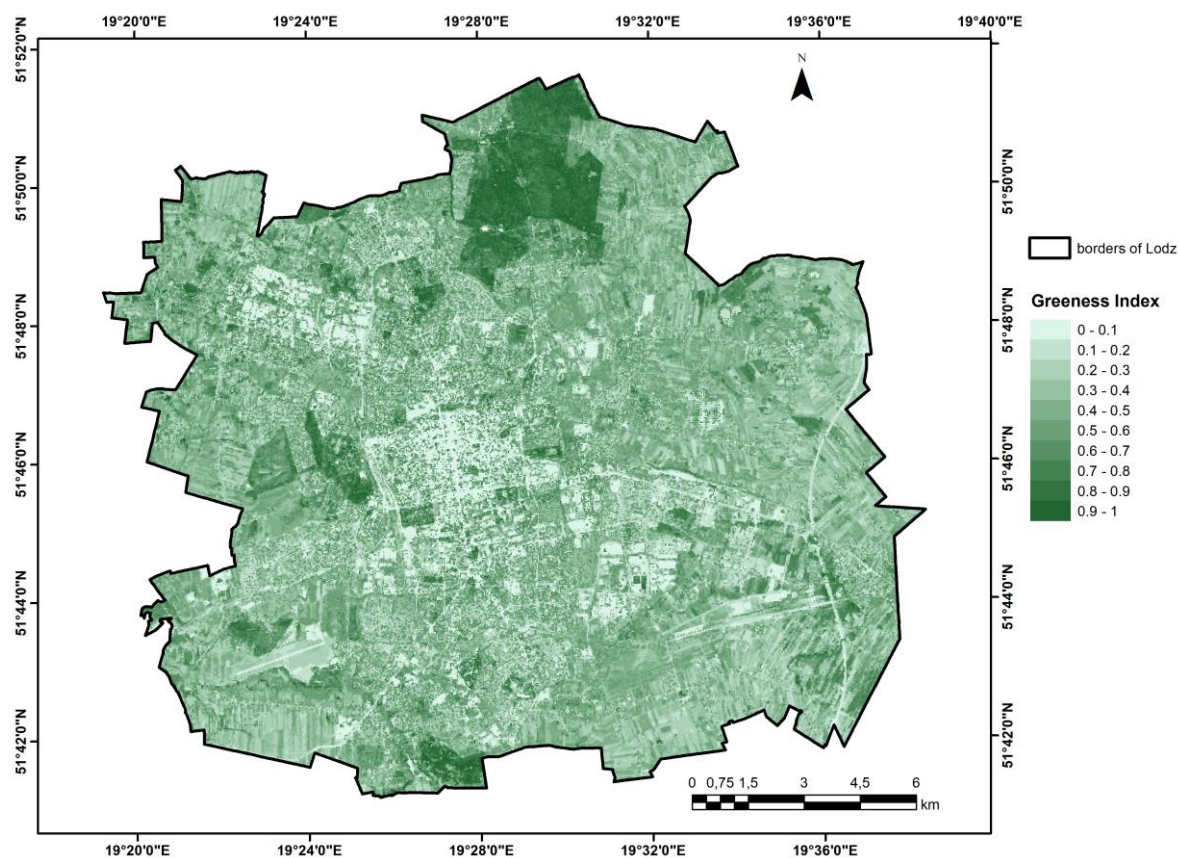
Ryc. 7. Wartość NDVI w odniesieniu do średniej wysokości zieleni w polach podstawowych, pokrytych zielenią w 100%.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2024

4.4 Wskaźnik zazielenienia oraz tereny zieleni w Łodzi

Obliczając wskaźnik zazielenienia (GI) uzyskano mapę stopnia rozwoju roślinności w poszczególnych miejscach Łodzi, co można interpretować jako ilość zieleni w danej lokalizacji.

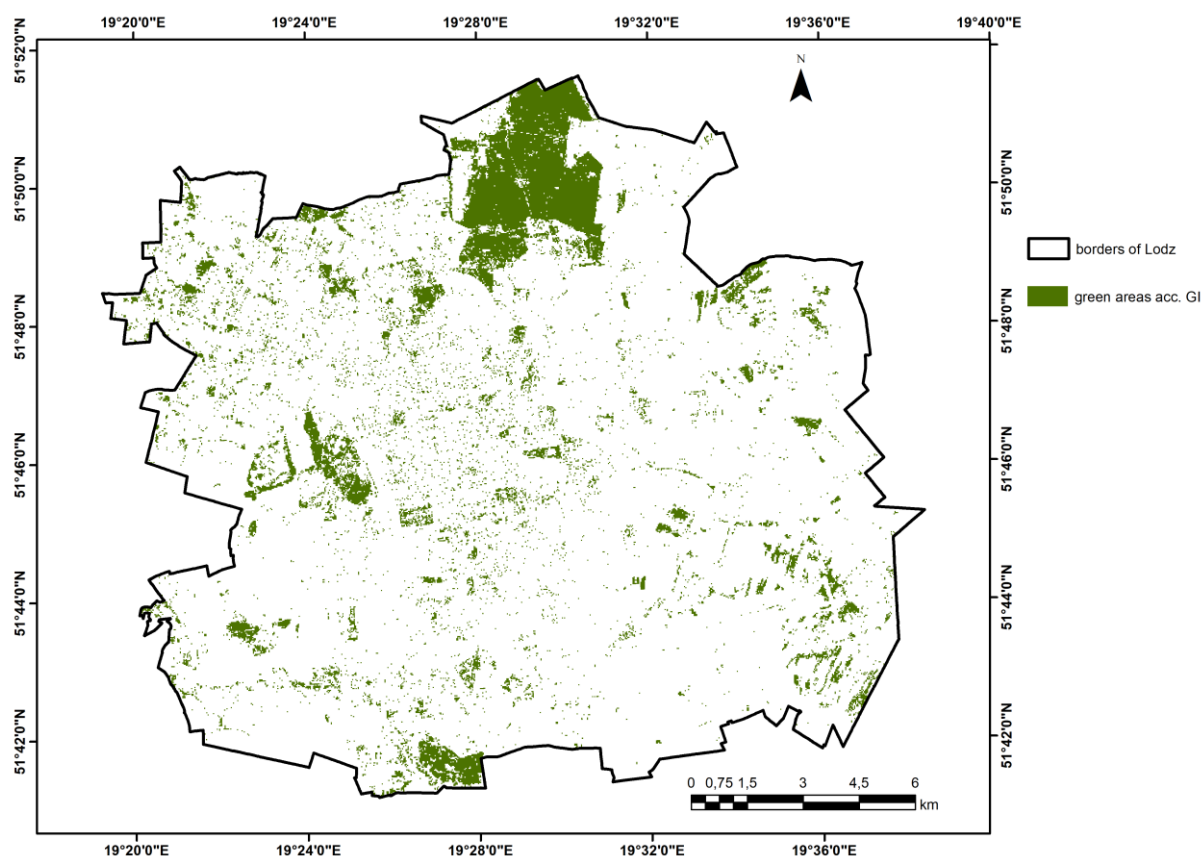
Rozkład przestrzenny tego wskaźnika przedstawiono na Rycinie 8. Średnia wartość wskaźnika zieleni dla Łodzi wynosi 0,58.



Ryc. 8. Rozkład przestrzenny wartości wskaźnika zazielenienia (GI) w Łodzi.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2024

Na podstawie wyznaczonego wzoru ustalono, które obszary Łodzi można zakwalifikować jako tereny zieleni. Dokonano tego poprzez ustalenie średniej wartości wskaźnika zazielenienia (GI) dla oficjalnych terenów zielonych według danych ŁOG, która wynosi 0,68 (co odpowiada 0,67% wszystkich pól podstawowych). Następnie dla całego miasta Łodzi wybrano pola podstawowe, w których wartość wskaźnika zazielenienia GI wynosiła co najmniej 0,68. W rezultacie ustalono, że wyznaczone tereny zielone w Łodzi zajmują powierzchnię 32,20 km², co stanowi 10,99% całkowitej powierzchni Łodzi (Rycina 9).

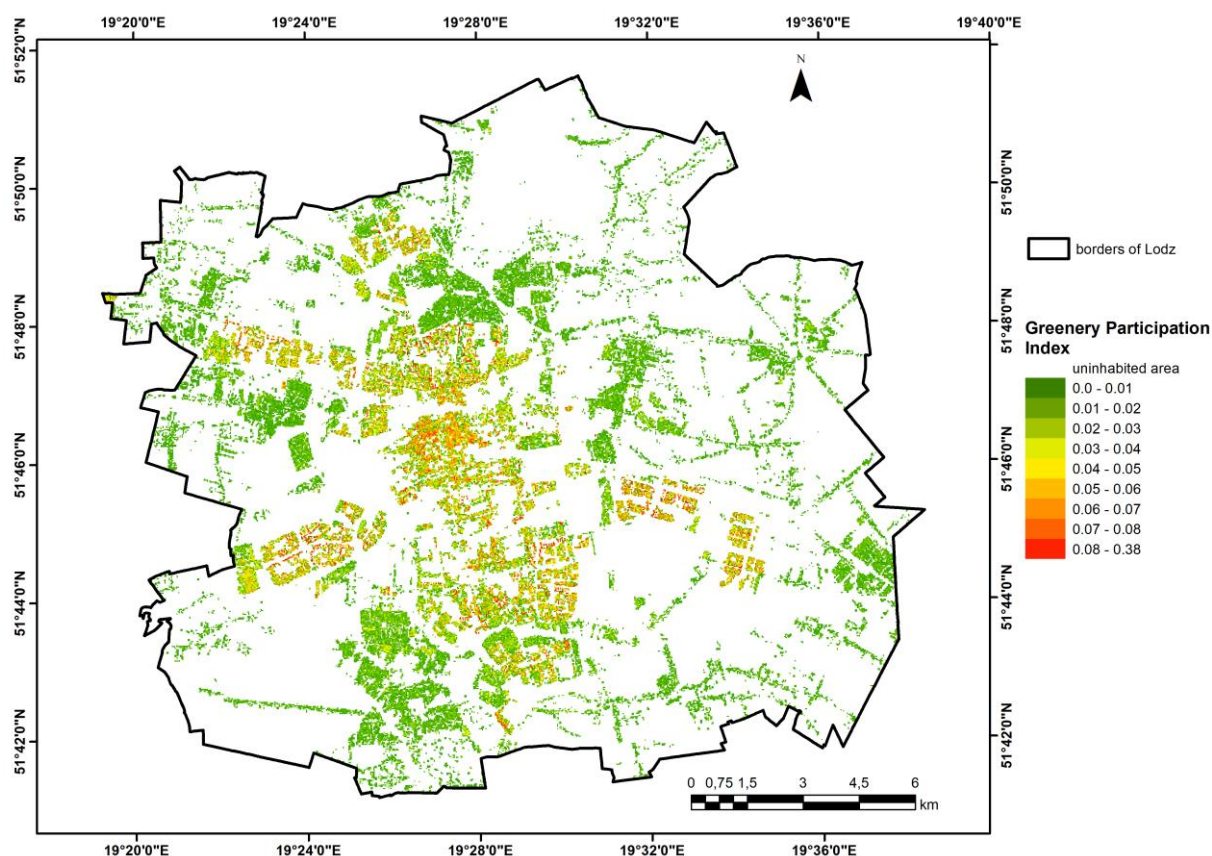


Ryc. 9. Tereny zielone w Łodzi wyznaczone metodą wskaźnika zazielenienia.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2024

4.5 Wskaźnik udziału w zieleni (GPI)

Dla każdego pola bazowego obliczono również wskaźnik udziału zieleni (GPI) lokalnej ludności w danym miejscu. Rozkład przestrzenny GPI przedstawiono na Rycinie 10.



Ryc. 10. Rozkład przestrzenny wskaźnika udziału w zieleni (GPI) w Łodzi.

Źródło: Bielecki, Będkowski, 2024

Wartości GPI w Łodzi zawierają się w granicach od 0 do 0,38. Wartość zerowa w większości przypadków oznacza teren niezamieszkany. Możliwe jest jednak osiągnięcie maksymalnej wartości wskaźnika zieleni dla danego miasta na terenie zamieszkałym - w takim przypadku wartość GPI będzie również zmierzać do najniższej możliwej wartości, tj. do 0. Z kolei maksymalne wartości, tj. powyżej 0,30, oznaczają obszary o dużej koncentracji ludności i jednocześnie małej ilości zieleni.

5. Dyskusja

W przywołanych wynikach pierwszym kluczowym zagadnieniem może być ocena stopnia pewności zgodności zastosowanej metody. Bazą do obliczeń są zdjęcia i pomiary wykonane w konkretnych, często różnych terminach. Dodatkowo mogą być one na dzień wykonywania obliczeń już nieaktualne (wiatrołomy, planowane wycięcia i inwestycje). Jednakże, nie ulega wątpliwości, iż wyliczenia i raporty są wykonywane w pewnej częstotliwości (raz na rok lub rzadziej), co w naturalny sposób jest związane faktem, iż dane te będą z biegiem czasu coraz mniej aktualne.

Metoda, w której korzysta się z danych satelitarnych o niskiej rozdzielczości przestrzennej (30m x 30m) może rodzić wątpliwości, co do precyzji dokonywanych analiz za pomocą tych zasobów. Jednakże w przypadku miasta dużego (powyżej 150 km²) wynikowa suma pól podstawowych i tak jest bardzo duża i może prowadzić do długiego procesu przygotowawczego podczas którego korzysta się z mocy obliczeniowej przeciętnego komputera osobistego.

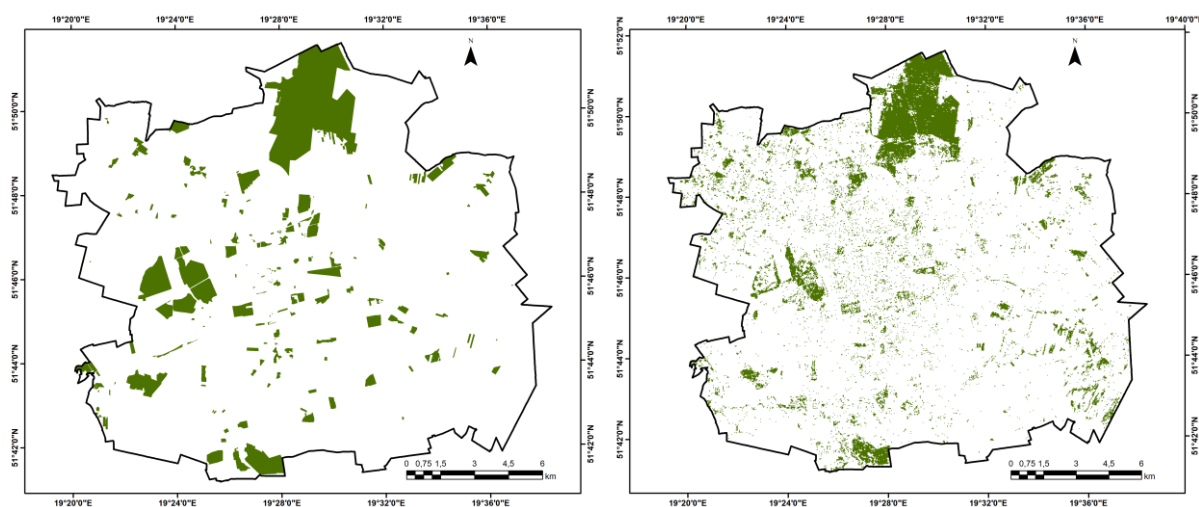
Istotnym aspektem pracy jest fakt, iż w metodzie domyślnie uwzględniane jest założenie, że w przypadku roślinności wysokiej pod koroną drzew nie znajduje się już żadna inna zieleń. Jest to pewne uproszczenie mające na celu przedstawić wariant minimum przy wyznaczaniu grubości warstwy roślinnej. Dzięki temu, metoda jest uniwersalna w swoim zastosowaniu. Dla analiz powierzchni powyżej 150 km², pomiary zieleni głębokiej, tj. znajdującej się w niższych warstwach, stanowiłyby olbrzymie utrudnienie oraz zwiększałyby koszty analiz zarówno czasowe jak i narzędziowe.

Mimo, iż metoda ma charakter pomocniczy dla procesów planowania przestrzennego, zwłaszcza w kontekście zwiększania zazielenienia poszczególnych fragmentów miasta, nie uwzględnia ona innych barier uniemożliwiających osiągnięcie odpowiedniego poziomu wskaźnika zazielenienia. Występują bowiem ograniczenia wynikające z fizjonomii zabudowy (zabudowa ciasna, czynszowa), konieczności wyposażenia w infrastrukturę (standardy mówiące o ilości miejsc parkingowych na 1 mieszkanie, dojazdy do posesji itp.), czy też wynikające z funkcji danego obszaru (funkcje towarzyszące obszarom zabudowy mieszkaniowej, takie jak sklepy wielkopowierzchniowe, obiekty użyteczności publicznej o dużej powierzchni itp.). Aspekty te powinny być uwzględniane przy każdej analizie możliwości inwestycji w nowe nasadzenia czy obszary zielone.

6. Wnioski

Zaproponowana metoda szacowania wielkości zasobów zieleni, jak również związana z nią metoda określania udziału lokalnej populacji w tych zasobach, jest niezależna od jakichkolwiek dowolności w interpretacji czy definicji terenu zieleni. W związku z tym jest ona obiektywna i możliwa do zastosowania przy przygotowywaniu analiz służących porównaniu obszarów miejskich sobą, jak również umożliwia wykrywanie zmian w dowolnym przedziale czasowym.

Niezaprzeczalną wartością zaproponowanej metody jest fakt, iż jest ona mierzalna i w sposób wymierny umożliwia przedstawienie stanu zazielenienia w różnych miejscach w mieście. Doskonałym przykładem może być zestawienie obszarów zieleni zgodnych z danymi Łódzkiego Ośrodka Geodezji a rezultatem zastosowania wskaźnika zazielenienia (Rycina 11). Mimo podobnych wartości powierzchniowych, na pierwszy rzut oka widoczne jest większe rozdrobnienie obszarów zieleni, co może z kolei wskazuje na większą dostępność do niej dla mieszkańców.



Ryc. 11. Porównanie rozkładu przestrzennego terenów zieleni wg bazy EGiB oraz wyznaczonego za pomocą wskaźnika zazielenienia (GI).

Źródło: Bielecki, Będkowski 2024

Metoda ta wprowadza strukturalny porządek w obszarze zarządzania zielenią miejską oraz umożliwia klasyfikację w dowolnym momencie, zależnie jedynie od stopnia aktualizacji danych źródłowych.

Opracowaną metodę można zastosować w każdym dużym mieście znajdującym się w strefie klimatu umiarkowanego.

7. Wykaz użytych skrótów i pojęć

BDL – Bank Danych Lokalnych GUS

BDOT – Baza Danych Obiektów Topograficznych

CLC - Corine Land Cover

EEA – Europejska Agencja Środowiska (ang. *European Environment Agency*)

EGiB - Ewidencji Gruntów i Budynków

FAO - Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (ang. *Food and Agriculture Organization*)

GDI - wskaźnik niedoboru zieleni (ang. *Greenery Deficiency Index*)

GI – wskaźnik zazielenienia (ang. *Greeness Index*)

GIS - system informacji geograficznej (ang. *Geographic Information System*)

GPI – wskaźnik udziału w zieleni (ang. *Greenery Participation Index*)

GNSS - globalny system nawigacji satelitarnej (ang. *Global Navigation Satellite Systems*)

GSD - terenowa odległość próbkowania (ang. *Ground Sampling Distance*)

GUS – Główny Urząd Statystyczny

ISOK - projekt Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami

LAI – wskaźnik pokrycia liściowego (ang. *Leaf Area Index*)

LiDAR – skanowanie laserowe (ang. *Light Detection And Ranging*)

LUCAS - Badanie powierzchni i zasięgu użytkowania gruntów (ang. *Land Use and Coverage Area frame Survey*)

ŁOG – Łódzki Ośrodek Geodezji

NDVI - znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*)

NMT - Numeryczny Model Terenu (ang. *Digital Terrain Model; DTM*)

zNMPT - znormalizowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (ang. *normalized Digital Surface Model; nDSM*)

8. Literatura (pozycje cytowane w opisie)

- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. (1995). *A Review of Vegetation Indices*. Remote Sensing Reviews, Vol. 13: 95-120.
- Białobok S. (1976). *Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka*, [w:] Michajłow W. i in. (red.), *Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka*, PWN, Warszawa: 223–245.
- Będkowski K., Bielecki A. (2017). *Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza*, *Teledetekcja Środowiska*, vol. 57: 5-14. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bielecki A. (2018). *Porównanie oprogramowania do przetwarzania danych LiDAR w zakresie generowania NMT i NMPT*, *Teledetekcja Środowiska*, vol. 58, nr 1: 5-11. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bielecki A. (2024). *Pluralizm definicji zieleni miejskiej w literaturze. Standardy, aspekty przyrodnicze i techniczne*. *Konwersatorium Wiedzy o Mieście*, 2024, vol 37, nr 9 – przyjęty do publikacji. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bielecki A., Będkowski K. (2020). *The Issue of Green Area Accessibility - the Example of the City of Łódź*, *Studia Miejskie*, vol. 40: 55-70, DOI:10.25167/sm.1304. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bielecki A., Będkowski K. (2022). *The degree of greenery in Łódź city, Poland – clearing up discrepancies between official statistics and satellite data*, *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, vol. 21, nr 4, 2022: 489-512, DOI:10.31648/aspal.7623. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bielecki A., Będkowski K. (2024). *The use of socio-environmental indicators to assess the needs for the development of urban greenery*, *Sustainability*, vol. 16, nr 21: 9230. <https://doi.org/10.3390/su16219230>. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Bożętka B. (2008). *Systemy zieleni miejskiej w Polsce – ewaluacja i problemy kształtowania*. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 22: 49–63.

- Durecka, I. (2017). *Parki jako element struktury przestrzennej miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego*, praca doktorska. Wydział Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Gu, Y., Wylie, B. K., Howard, D. M., Phuyal, K. P., & Ji, L. (2013). *NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA*. *Ecological Indicators*, 30: 1-6.
- GUS. *Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2024 roku*. <http://stat.gov.pl>. [dostęp 2024-10-23].
- Huete, A. R., Liu, H., & van Leeuwen, W. J. (1997). *The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation*. In *IGARSS'97. 1997 IEEE international geoscience and remote sensing symposium proceedings. Remote sensing-a scientific vision for sustainable development*, vol. 4: 1966-1968
- Kressler F., Mucher C.A., Steinnocher K., Thunnissen H. A. M. (2000). *Evaluation of medium-resolution satellite images for land use monitoring using spectral mixture analysis*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B7, Amsterdam: 709-716.
- Kuczyńska, A. (2008). *Miejsca i sąsiedztwa. Badania 2004-06*. *Konteksty*, vol. 03-04: 283-285.
- Lanxin, D. A. I., Qiang, X. U., Xuanmei, F. A. N., Ming, C. H. A. N. G., Qin, Y. A. N. G., Fan, Y. A. N. G., Jing, R. E. N. (2017). *A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment*. *Journal of Engineering Geology*, 25(4): 1151-1164.
- Łukasiewicz A., Łukasiewicz S. (2016). *Rola i kształtowanie zieleni miejskiej*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Mierzejewska L. (2001). *Tereny zielone w strukturze przestrzennej Poznania*. Wydawnictwo Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Poznań.
- Nelson, R. (1997). *Modelling forest canopy heights: The effects of canopy shape*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 60, no. 3: 327-334.
- Rostański, A. (2000). *Trawy spontanicznie zasiedlające nieużytki przemysłowe w aglomeracji katowickiej*. *Grassland Science in Poland*, vol. 3: 141–150.

- Rouse Jr, J. W.; Haas, R. H.; Deering, D. W.; Schell, J. A.; Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. NASA Technical Report Server, no. E75-103541974.
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz mapy zasadniczej* (Dz.U. 2021 poz. 1385)
- Rzańska-Wieczorek, M. (2016). *Naturalna metoda ochrony zieleni miejskiej*. Zieleń Miejska, vol. 1: 42-44.
- Ustawa 2004: Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (tekst jednolity Dz.U. z 20 października 2015 r., poz. 1651).
- Walkowicz, T. (2002). *Społeczne i ekologiczne aspekty tworzenia i utrzymania terenów zieleni w miastach*. W: Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast, Janusz Słodczyk (red), Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego, Opole: 347-358.
- Wirth H., Schilbach G., Wirth A. (1987). *Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich*, Vermessungstechnik 33(2): 56–59.
- Worm A., Będkowski K., Bielecki A. (2019). *Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi*, Teledetekcja Środowiska, vol. 60, nr 1: 5-20. **Publikacja stanowi część rozprawy.**
- Wu, W., Wang, M. X., Zhu, N., Zhang, W., Sun, H. (2019). *Residential satisfaction about urban greenness: Heterogeneous effects across social and spatial gradients*. Urban forestry & urban greening, 38: 133-144.

9. Kopie publikacji tworzących rozprawę doktorską

Adam Bielecki
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

Łódź, 18 października 2024

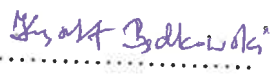
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy pt. *Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza*, Teledetekcja Środowiska, vol. 57, 2017, s. 5-14, autorstwa: Krzysztof Będkowski, Adam Bielecki

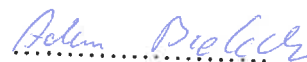
udział poszczególnych współautorów polegał na:

- **Krzysztof Będkowski** (70%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, analiza danych, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Adam Bielecki** (30%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, wizualizacje, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu

Krzysztof Będkowski


.....
podpis

Adam Bielecki


.....
podpis

Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza

*Assessment of the availability of greenery in the place of residence
in cities using NDVI and the Lorenz's concentration curve*

Krzysztof BĘDKOWSKI
Adam BIELECKI

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast i Turystyki, Zakład Geoinformacji
ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź
krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl
adam_biel@o2.pl

Streszczenie

Oficjalne statystyki terenów zieleni znajdujących się w miastach uwzględniają zespoły roślinności znajdujące się na gruntach, których głównym przeznaczeniem jest utrzymanie zieleni – parki, zieleńce, zieleń osiedlowa, ogrody zoologiczne, ogrody botaniczne, rezerваты przyrody, parki krajobrazowe, a także część zieleni ulicznej. Miernikiem wielkości zasobów zieleni jest powierzchnia tych gruntów. W raportach nie ujmuje się tej części zieleni, która znajduje się na innych obszarach. Tereny zabudowane, komunikacyjne, czasowo wyłączone z funkcji przemysłowych i in. również mogą mieć obfite zasoby zieleni, w postaci powierzchni trawiastych, pojedynczych krzewów i drzew oraz ich grup, które mają duże znaczenie dla kształtowania środowiska w mieście. Dla oceny warunków życia w miastach oraz umożliwienia porównywania miast pod względem zasobów zieleni niezbędne jest wypracowanie sposobu oceny całości posiadanej przez nie zieleni. Poznanie proporcji, jaka część ludności, do jakich zasobów zieleni w miejscu zamieszkania ma dostęp, może dużo powiedzieć o warunkach i jakości życia w poszczególnych miastach. W teledetekcji do analizy roślinności używany jest m.in. znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności NDVI, którego ważną cechą jest związek z „ilością” i „jakością” zieleni występującej na danym obszarze. W pracy przedstawiono, na przykładzie Łodzi, propozycję sposobu oceny dostępności zieleni dla mieszkańców miasta (w miejscach zamieszkania), z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. Obszar miasta podzielono na pola podstawowe o wymiarach 90×90 m. Na obszarze Łodzi zamieszkanym jest 14 568 pól podstawowych (40,25% powierzchni miasta). Tylko 1,72% mieszkańców Łodzi ma w miejscu zamieszkania zasoby zieleni o wysokiej wartości wskaźnika $NDVI \geq 0,4$ odpowiadającej terenom parkowym i zalesionym. Znaczna część mieszkańców miasta (54,02%) ma w miejscu zamieszkania NDVI w granicach od 0,2 do 0,3. Stwierdzono, że są to obszary miasta, w których zabudowie towarzyszy rozwinięta zieleń. Rejony, w których $NDVI \geq 0,2$ stanowią 85,96% powierzchni miasta, w której z kolei mieszka 72,99% ludności. Mieszkańcy miasta w różnym stopniu korzystają z zasobów zieleni, jakie posiadają w miejscach zamieszkania, bowiem wartość współczynnika koncentracji $K = 0,710$ jest stosunkowo wysoka i wskazuje na znaczną koncentrację ludności oraz NDVI. Około 80% mieszkańców ma w miejscu zamieszkania dostęp tylko do około 25% zasobów zieleni.

Abstract

The official statistics of the green areas in cities take into account the plants of vegetation located on the land, the main purpose of which is the maintenance of greenery – parks, lawns, estate greenery belts, zoological gardens, botanical gardens, nature reserves, landscape parks, and a part of the street greenery. The meter's size of green resources is the area of these lands. In the reports, the green in other areas is not recognised. Built-up areas, communication, areas temporarily excluded from industrial functions and others can also have abundant resources of greenery, in the form of grassland, individual shrubs and trees and their groups, which are of great importance for shaping the environment in cities. To assess urban living conditions and to allow cities to be compared in terms of green resources, it is necessary to develop a way of assessing the whole of their greenery.

Knowing the proportion of what part of the population has access to which greenery resources in the place of residence, can say a lot about the conditions and quality of life in cities. In remote sensing for the analysis of vegetation we mainly use a normalized differential vegetation index NDVI, which important feature is the relationship to the "quantity" and "quality" of greenery occurring in a given area. The paper presents, on the example of Łódź, a way of assessing the availability of greenery for the city's residents (in places of residence), using NDVI and the Lorenz's concentration curve. The area of the city is divided into fields measuring 90×90 m. 14 568 fields (40,25% of the city area) are inhabited in Łódź. Only 1.72% of inhabitants of Łódź have green areas with a high NDVI value ≥ 0.4 corresponding to park and wooded areas. A significant part of the city residents (54.02%) have NDVI in their place of residence ranging from 0.2 to 0.3. It was found that these are the areas of the city where the urban development is accompanied by well-developed greenery. Areas in which $\text{NDVI} \geq 0.2$ represent 85.96% of the city's area, in which 72.99% of the population lives. Inhabitants of the city use the greenery resources which they have in their places of residence to varying degrees. The value of the concentration coefficient $K = 0.710$ is relatively high and indicates a significant concentration of population and NDVI. About 80% of residents have access to only 25% of green resources in their place of residence.

Keywords: urban greenery, accessibility, remote sensing, vegetation indices, concentration of spatial phenomena.

Słowa kluczowe: zieleń miejska, dostępność, teledetekcja, wskaźniki wegetacyjne, koncentracja zjawisk przestrzennych.

Wprowadzenie

Terenami zieleni miejskiej są przestrzenie pokryte roślinnością na obszarach miast (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016), natomiast Böhm 1999 (cyt. wg Walkowicz 2002) pojęciem tym obejmuje „wszystkie tereny czynne biologicznie w obrębie miast, niezależnie od tego jak są użytkowane oraz kto jest ich właścicielem”.

Według oficjalnej definicji, zielenią miejską są te zespoły roślinności, które znajdują się na terenach zieleni urządzonej i pełnią funkcje publiczne, a więc: „parki, zieleńce, promenady, bulwary, ogrody botaniczne, zoologiczne, jordanowskie i zabytkowe, cmentarze, zieleń towarzysząca drogom na terenie zabudowy, placom, zabytkowym fortyfikacjom, budynkom, składowiskom, lotniskom, dworcom kolejowym oraz obiektom przemysłowym” (Ustawa 2004). We wcześniejszym akcie (Ustawa 1980, art. 42.2) wskazywano, że zieleń miejską stanowi zieleń na terenach przeznaczonych w planie zagospodarowania przestrzennego na cele wypoczynkowe, zdrowotne i estetyczne. Decydował zatem fakt przeznaczenia terenu oraz znajdującej się na nim roślinności. Do terenów zieleni według stanu geodezyjnego (Statystyka 2018) zalicza się także użytki rolne (w tym grunty orne, sady, łąki i pastwiska trwałe) oraz grunty leśne, zadrzewione i zakrzewione.

Roślinność jest ważnym elementem przestrzeni miejskiej, istotnie decydującym o warunkach i jakości życia mieszkańców. Pełni wiele ważnych funkcji (Białobok 1976): chroni przed kurzem, sadzą i trującymi substancjami lotnymi, zwiększa wilgotność powietrza, łagodzi różnice temperatur, osłania przed wiatrami,

poprawia bilans wodny, tłumi hałas i wibracje powietrza, jest źródłem wrażeń estetycznych, ma też znaczenie dydaktyczne i wychowawcze (kolekcje w ogrodach botanicznych). Respondenci licznych badań „wskazują zieleń jako czynnik jakości życia, jeden z najważniejszych elementów przy wyborze miejsca zamieszkania, najważniejszy element warunkujący ich szczęście i którego chcą w miastach więcej” (Durecka 2017). Bliskość terenów zieleni uważana jest za najważniejszy czynnik atrakcyjności osiedli mieszkaniowych (Mierzejewska 2001, Bułhak 2004).

Uważa się, że tereny zieleni powinny stanowić integralną część powierzchni miasta. Na przestrzeni dziesięcioleci opracowanych zostało wiele koncepcji oraz wskaźników dotyczących kształtowania zieleni na terenach miejskich. Wśród najbardziej znanych należy wymienić m.in. koncepcję miast-ogrodów, która w Polsce została zastosowana do kształtowania terenów zieleni m.in. w podwarszawskich miejscowościach, takich jak Milanówek, Podkowa Leśna, Brwinów itd. Rozwijane m.in. przez Ebenezera Howarda koncepcje miast-ogrodów zakładały duży udział terenów zieleni, np. w opracowanych z jego udziałem propozycjach dla podmiejskich gmin Krakowa określono, że stosunek powierzchni terenów zabudowanych do niezabudowanych powinien być jak 1 do 10. Jednak w Letchworth, mieście będącym sztandarowym przykładem zrealizowanej koncepcji miasta-ogrodu, stosunek ten wyniósł tylko 1:2 (Czyżewski 2001). Wodiczko (1937) pisze, że $\frac{1}{3}$ powierzchni miasta powinny stanowić obszary z roślinnością naturalną, bez upraw rolnych. Według zarządzenia Ministerstwa Budownictwa i Przemysłu

Materiałów Budowlanych (Zarządzenie 1964), norma tzw. zieleni wypoczynkowej wnosila 8–15 m², a ogólnodostępnej 10,6 m² na 1 mieszkańca, w tym 1,5–2,5 m² parków osiedlowych o powierzchni min. 2 ha oraz 1,5–2,5 m² zieleni. Ptaszycka (1950) podaje, że w zespołach mieszkaniowych powinno być co najmniej 15 m² terenów zieleni na 1 mieszkańca, natomiast Myczkowski (1976) szacuje, że „aby człowiek mógł mieć w środowisku miejskim odpowiednie warunki zdrowotne potrzeba mu 50 m² terenów zielonych”. Zieleńce i parki powinny być położone w odległości do ok. 500 m, co odpowiada 15 min spaceru (Czarnecki 1968, Orzeszek-Gajewska 1984, Czerwieniec i Lewińska 1996), a ich minimalna wielkość wynosić 0,55 ha (Alexander 2008), 2 ha (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016) lub nawet 5 ha (Czarnecki 1968). Wszystkie tereny zieleni powinny tworzyć układ powiązanych ze sobą przestrzennie elementów – tzw. system zieleni miejskiej – bowiem tylko w takich warunkach można zapewnić ich efektywność, zwiększyć odporność na liczne zagrożenia oraz sprawnie zarządzać (Bożetka 2008). W miastach dużą rolę pełnią również tereny zieleni w postaci parków dzielnicowych, parków centralnych lub lasów strefy podmiejskiej i in., z reguły odległe od miejsc zamieszkania, a akceptowany czas dojazdu do nich środkami komunikacji miejskiej wynosi 15–30 minut (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016).

W Polsce występuje bardzo duże zróżnicowanie wielkości terenów zieleni w miastach w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Bardzo zielonym miastem jest Pszczyna (ok. 600 m²), natomiast do najmniej zasobnych miast należy Kalisz (ok. 50 m²) (Mierzejewska 2002, 2004). Miejskie tereny zieleni w Łodzi tworzą parki, zieleńce, zieleń osiedlowa, ogrody zoologiczne, ogrody botaniczne, rezerваты przyrody, parki krajobrazowe i zieleń uliczna. Ich łączna powierzchnia w 2017 roku wynosiła 3 836,3 ha (13,08% powierzchni miasta, 54,7 m² na 1 mieszkańca) (Statystyka 2018). W Łodzi jest też 11 670 ha użytków rolnych i 2 489 ha gruntów leśnych, zadrzewionych i zakrzewionych, co stanowi odpowiednio 16,9 i 3,6% powierzchni miasta (154 i 36 m² na 1 mieszkańca). Średnia powierzchnia miejskich terenów zielonych w Polsce wynosi 21,6 m² na 1 mieszkańca miasta (Rocznik 2018).

Publikowane statystyki dotyczące zieleni opierają się na danych uwzględniających formalny status terenów, a podstawowym miernikiem jest ich powierzchnia. Nie ujmuję się tej części zieleni, która znajduje się na innych obszarach. A przecież także tereny zabudowane, komunikacyjne, czasowo wyłączone z funkcji przemysłowych itp. również mogą mieć obfite zasoby zieleni, w postaci powierzchni trawiastych, pojedynczych krzewów i drzew oraz ich grup. Każde z nich pełni te wszystkie funkcje, które wymieniono wcześniej.

Układy zieleni są zróżnicowane i miasta posiadające bardzo dużo zieleni na terenach nieuwzględnianych w statystykach, a jednocześnie z małą ilością parków, zieleńców, zieleni osiedlowej i in., mogą być paradoksalnie uznane za mało ‘zielone’ w porównaniu z tymi, w których obiekty oficjalnie uznawane za zieleń występują, lecz na małych powierzchniach. Dla umożliwienia porównywania miast niezbędne jest zatem wypracowanie

sposobu oceny ilości posiadanej przez nie zieleni, opracowanie mierników opartych nie na polu powierzchni danych kategorii użytkowania gruntów, lecz potencjale do pełnienia różnorodnych funkcji. Oczywiście jest, że inne znaczenie ma trawnik, jeszcze inne powierzchnia pokryta nieuporządkowaną spontaniczną roślinnością, grupy krzewów czy też drzewa. Inny jest ich „wkład” do ogólnego bilansu pełnionych przez roślinność usług ekosystemowych.

W miastach najczęściej mamy do czynienia z nierównomiernym przestrzennym rozłożeniem mieszkańców oraz zieleni – koncentracją ludności w śródmieściach, a zieleni na obrzeżach. Znaczna część mieszkańców ma w swoim najbliższym otoczeniu gęstą zabudowę, często bez najmniejszego nawet skrawka zieleni. Z drugiej strony na obrzeżach miast często występują lasy miejskie, które wprowadzają licząc się do ogólnego bilansu terenów zielonych, lecz jednocześnie na ich terenie mieszka niewiele osób. Poznanie proporcji, jaka część ludności, do jakich zasobów zieleni w miejscu zamieszkania ma dostęp, może dużo powiedzieć o warunkach i jakości życia w poszczególnych miastach.

Współczesne techniki geoinformacyjne umożliwiają szybkie uzyskiwanie stosunkowo precyzyjnych informacji o pokryciu terenu. Należą do nich np. wysokorozdzielcze zdjęcia lotnicze i zobrazowania satelitarne oraz dane skanowania laserowego LiDAR. Zdjęcia lotnicze są jednak kłopotliwe, gdyż dla uzyskania odpowiednich danych należy przetworzyć dużą ich liczbę, a najczęściej dostępny produkt przetworzenia – ortofotomapy – mają często zniekształcenia radiometryczne i geometryczne. Aby natomiast efektywnie przetwarzać dane skanowania laserowego LiDAR niezbędne jest posiadanie sprzętu spełniającego stosunkowo wysokie wymagania, aby podobał bardzo dużym zbiorom danych w realnym czasie. W kontraście do wymienionych, zobrazowania satelitarne mają pewne zalety – jedno zobrazowanie o dobrych parametrach geometrycznych (rzut zbliżony do ortogonalnego) obejmuje całe miasto, przetworzone do odpowiednich wskaźników wegetacyjnych zawiera informację o rozmieszczeniu, ilości i jakości zieleni w mieście. Piksele nie są zbyt małe, dzięki czemu obraz nie zawiera nadmiaru szczegółów, lecz uogólniają informację z pewnego wycinka obszaru.

Do analizy roślinności używanych jest wiele wskaźników spektralnych, wśród których ważne miejsce zajmuje znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności NDVI (Deering 1978, Jackson i Huete 1991). Stosowany jest do analizy zarówno zdjęć lotniczych, jak i obrazów z pułapu satelitarnego, w ocenie wielkości biomasy roślin – w różnych skalach przestrzennych – od pojedynczych pól uprawnych aż po globalne strefy roślinności (Tucker 1979), rozpoznawaniu roślinności (Wang i in. 2009) i jej kondycji (Lhermitte i in. 2010, Olpenda i Paringit 2011, Kopańczyk i Fitryk 2016), analizie dojrzałości upraw (Jackson i Huete 1991, Panda i in. 2010, Nasiłowska i Kubiak 2016), wielkości powierzchni projekcyjnej liści LAI – Leaf Area Index (Colombo i in. 2003), ilości promieniowania absorbowanego przez rośliny w procesie fotosyntezy (Badgley i in. 2017), biomasy (Wang i in. 2011), badaniach fenologicznych (Lüdecke i in. 1996, Zarzecki i Pasierbiński 2009, Yan i in. 2018) i wielu innych.

Ważną cechą NDVI jest jego związek z „ilością” i „jakością” zieleni występującej na danym obszarze (Jarocińska i Zagajewski 2008). Jeżeli w skład piksela obrazu wchodzi różne obiekty (np. budynki, jezdnia z nawierzchnią asfaltową lub betonową, korony drzew, ogrody oraz trawniki), wówczas NDVI jest wypadkową współczynników NDVI indywidualnych obiektów, ważoną ich udziałem w powierzchni piksela (Wirth i in. 1987). Do pewnego stopnia NDVI reaguje także na pionową budowę zespołów roślinnych – jest większy na obszarach, na których roślinność jest rozbudowana, wielopiętrowa.

W pracy przedstawiono, na przykładzie Łodzi, propozycję sposobu oceny dostępności zieleni dla mieszkańców miasta (w miejscach zamieszkania), z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. Zaproponowany sposób może być wykorzystany do porównywania warunków życia mieszkańców różnych miast.

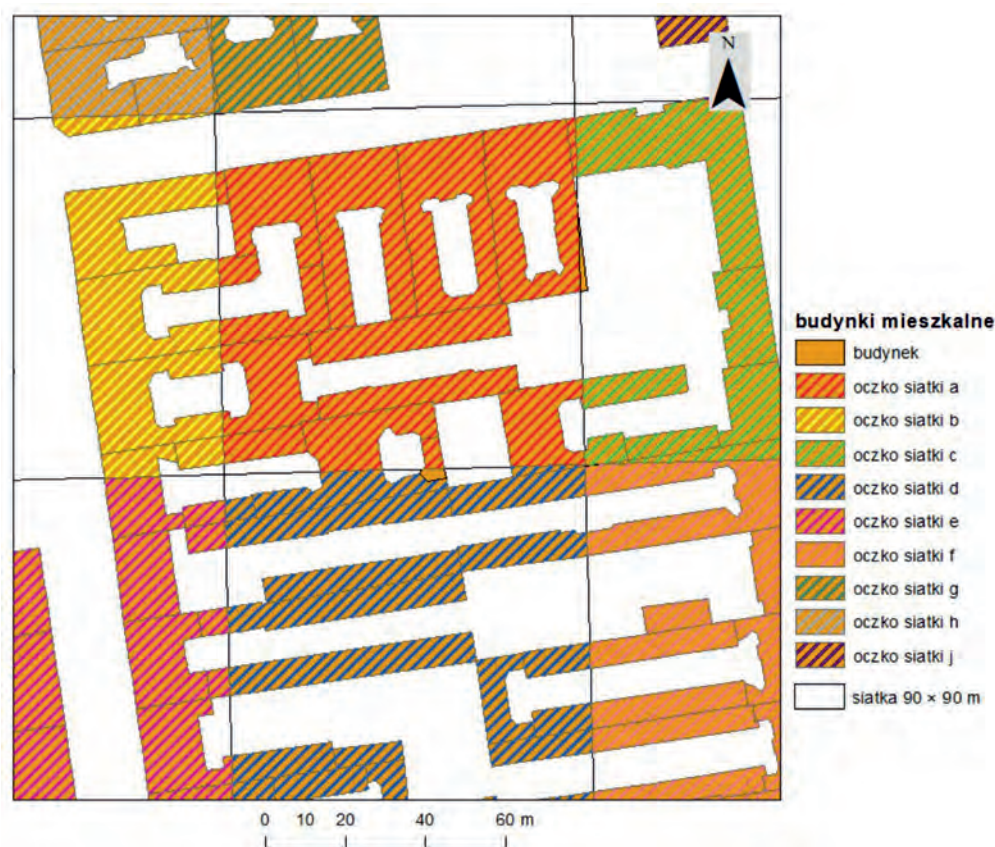
Materiały i metody

Rozmieszczenie ludności

Na potrzeby zaplanowanych analiz ustalono liczbę osób mieszkających w każdym z pól podstawowych kwadratowej siatki o wymiarach 90×90 m, odpowiadających wielkością oraz zasięgiem 9 pikselom obrazu satelitar-

nego. Siatka schematycznie dzieli przestrzeń miasta, w tym poszczególne osiedla i pojedyncze budynki, na mniejsze fragmenty. Przybliżoną liczbę mieszkańców w poszczególnych polach podstawowych obliczono w następujący sposób:

1. Ustalono liczbę mieszkańców w każdej z 36 administracyjnych jednostek pomocniczych miasta Łodzi. Niezbędne dane pochodziły z Łódzkiego Ośrodka Geodezji.
2. Na podstawie warstw wektorowych Ewidencji Gruntów i Budynków oraz informacji o powierzchni obrysów budynków i liczbie kondygnacji, ustalono całkowitą powierzchnię wszystkich kondygnacji każdego budynku mieszkalnego.
3. Obliczono wskaźnik powierzchni mieszkaniowej na 1 mieszkańca w poszczególnych administracyjnych jednostkach pomocniczych. Uzyskane wartości wahały się w granicach od $35,06 \text{ m}^2$ (osiedle Chojny-Dąbrowa) do $115,57 \text{ m}^2$ (osiedle nr 33)¹.
4. Na podstawie ustalonej w p. 2 powierzchni budynków oraz w p. 3 wartości wskaźnika, określono przybliżoną liczbę mieszkańców każdego budynku mieszkalnego.
5. Przypisania liczby mieszkańców do pól podstawowych dokonano uwzględniając zawarte w nich odpowiednie części budynków (ryc. 1).



Ryc. 1. Budynki i ich części w polach podstawowych 90×90 m
Fig. 1. Buildings and their parts within 90×90 m cells

¹ Dla porównania, w 2002 r. średnia powierzchnia mieszkania w Łodzi wynosiła $60,7 \text{ m}^2$ ($20,5 \text{ m}^2$ powierzchni użytkowej mieszkania na 1 osobę). Jedno mieszkanie było zamieszkiwane przez 2,95 osób, a jed-

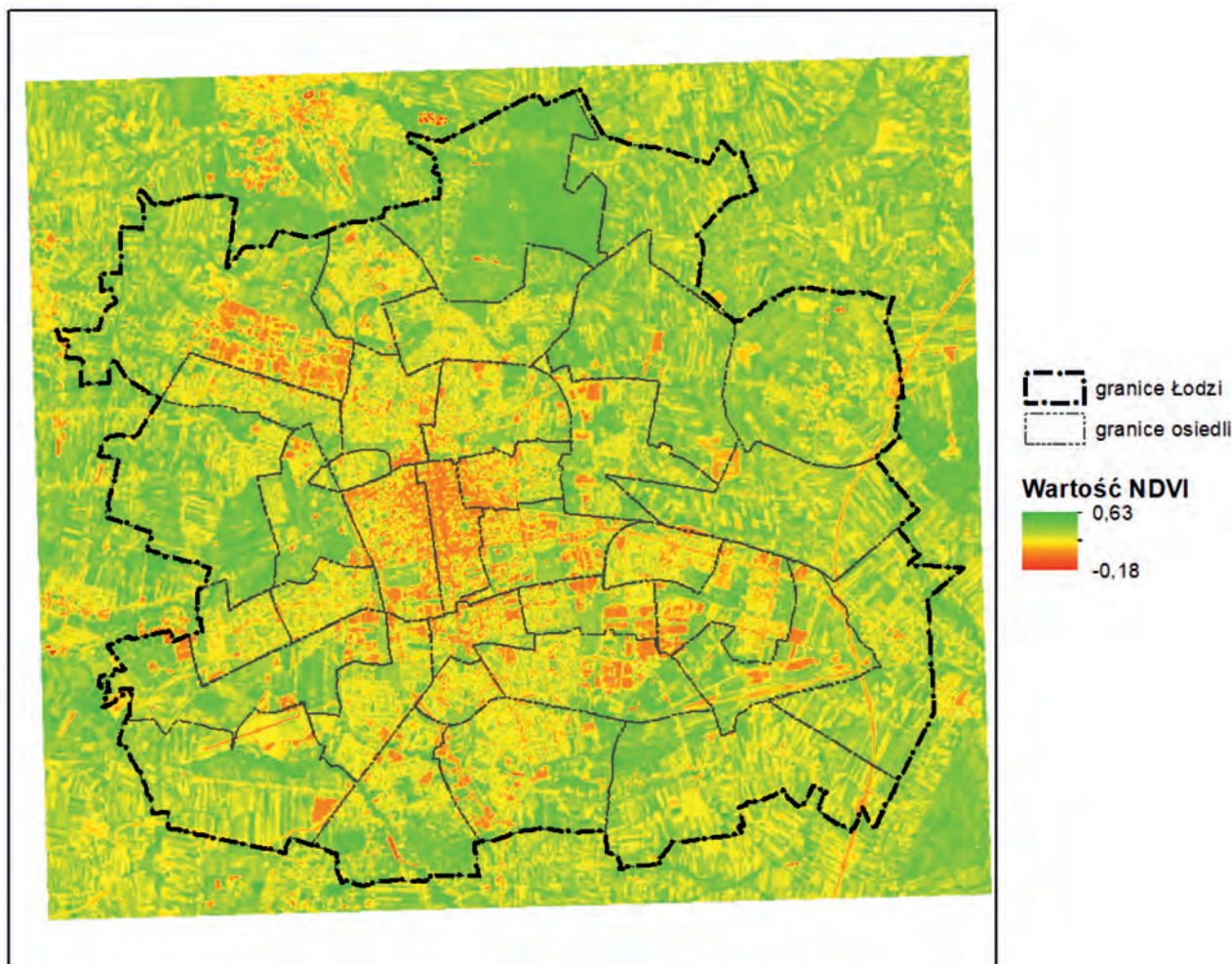
na izba przez 0,84 osób (Parysek 2004). Natomiast w latach 2011–2016 wg GUS (Rocznik 2015), średnia powierzchnia mieszkania w Łodzi wahała się w granicach $53\text{--}54 \text{ m}^2$, a na 1 osobę przypadało $27\text{--}28 \text{ m}^2$.

Rozmieszczenie zieleni w Łodzi

W pracy wykorzystano scenę satelitarną Landsat 8 z 3 lipca 2015 roku (ścieżka p189, wiersz r024), pozyskaną z US Geological Survey (EarthExplorer), która w momencie wykonywania badań była ostatnią dostępną sceną z okresu pełni sezonu wegetacyjnego oraz nie miała pokrywy chmur. Kanały 4 (zakres czerwieni, RED) i 5 (bliska podczerwień, NIR) wykorzystano do obliczenia wartości wskaźnika NDVI według klasycznego wzoru (Rouse i in. 1973):

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

Ponieważ obraz miasta Łodzi w całości mieścił się w zakresie jednej sceny satelitarnej i nie planowano porównań z innymi miastami, nie wykonywano korekty słonecznej oraz atmosferycznej zobrazowań. Wartości wskaźnika zawierały się w granicach od -0,18 do 0,63 (ryc. 2).



Ryc. 2. NDVI dla obszaru miasta Łodzi w rastrze 30 × 30 m

Fig. 2. NDVI of Łódź city area in cells 30 × 30 m

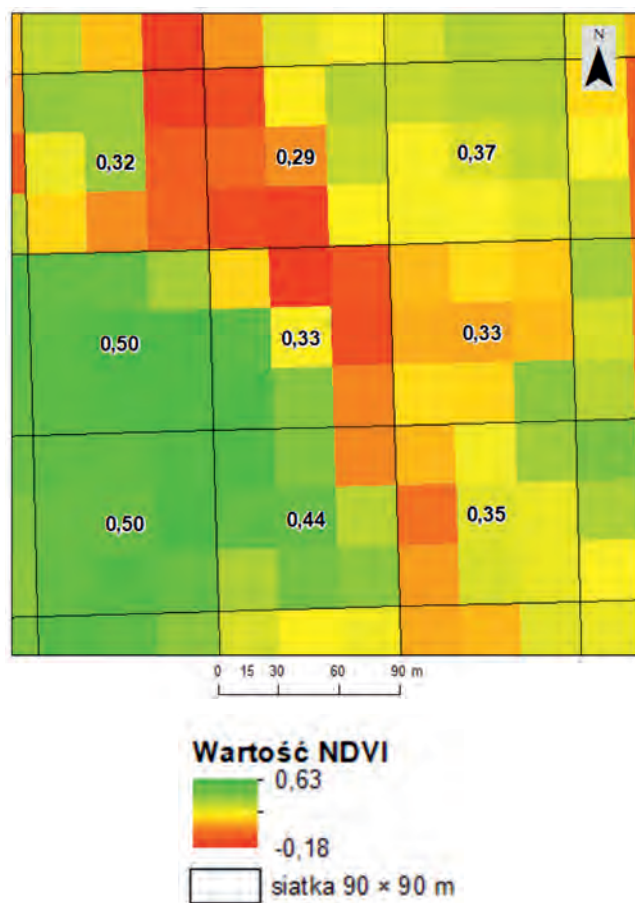
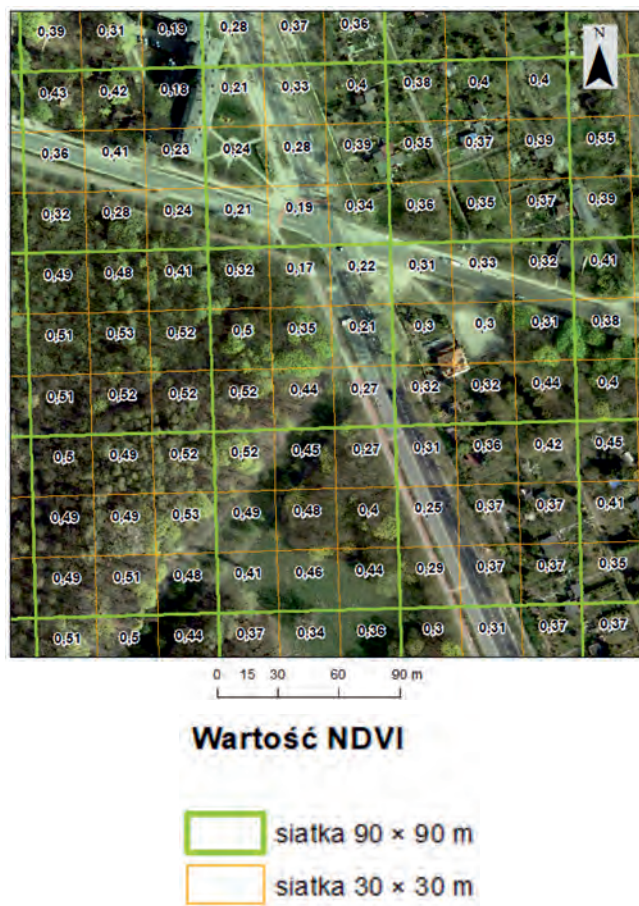
Na podstawie przestrzennego rozkładu wartości wskaźnika NDVI (ryc. 3) można wyraźnie wyodrębnić rejony stosunkowo gęstej zabudowy mieszkaniowej, położone głównie w centralnej części miasta i zabudowy przemysłowej w części północno-zachodniej oraz południowo-wschodniej. W centrum miasta widoczne są lokalne wyspy podwyższonych wartości NDVI związane z parkami miejskimi, a na obrzeżach ze stosunkowo dużymi obszarami lasów, w tym Lasu Łagiewnickiego – jednego z większych lasów miejskich w Polsce – w północnej części miasta.

W celu ustalenia, do jakich zasobów zieleni mają dostęp mieszkańcy Łodzi w miejscach zamieszkania przyjęto, że o wielkości tych zasobów w każdym polu podsta-

wowym świadczy poziom wskaźnika NDVI, zaś suma wartości NDVI tych pól mówi o całkowitej ilości zieleni w zamieszkanym polu podstawowym w granicach miasta. Podstawową jednostką przestrzenną były oczka siatki kwadratów o wielkości 90 × 90 m, odpowiadające 9 pikselom obrazu satelitarnego o rozdzielczości 30 m. Przesłanką wyboru wielkości pola podstawowego była chęć uwzględnienia w badaniach stanu roślinności w miejscu zamieszkania oraz w jego najbliższym otoczeniu. Przyjęto, że najbliższym otoczeniem jest przestrzeń zawarta w promieniu około 50 m, a ta jest w przybliżeniu równoważna kwadratowi 90 × 90 m. W konsekwencji wyznaczone wartości NDVI należało przeliczyć, poprzez uśrednienie, z siatki pikseli na siatkę jednostek

podstawowych 90×90 m (ryc. 3). Operacja ta tylko nieznacznie zmieniła zakres wskaźnika na wartości od $-0,11$ do $0,60$. Dokonano podziału przestrzeni miasta na 7 swobodnie dobranych stref według wartości NDVI oraz ustalono liczbę mieszkańców tych stref

(tab. 1). Przy wyborze przedziałów dla NDVI uznano, że podział w odstopniowaniu $\Delta\text{NDVI} = 0,1$ jest odpowiedni, gdyż pozwala na pokazanie zróżnicowania stopnia zazielenienia miasta przy stosunkowo niedużej liczbie stref.



Ryc. 3. NDVI w kwadratach odpowiadających pikselom obrazu satelitarnego Landsat 8 o wielkości 30 m oraz jednostkom podstawowym 90×90 m

Fig. 3. NDVI in 30×30 m pixels of Landsat 8 image and in 90×90 m cells

Dostępność mieszkańców miasta do zieleni w miejscu zamieszkania wyrażono za pomocą **krzywej koncentracji Lorenza** (Luszniewicz 1980, Jażdżewska 2013). W tym celu dla każdego zamieszkanego pola podstawowego 90×90 m:

1. Zestawiono pary dwóch zmiennych – liczbę mieszkańców M_i oraz wartość NDVI_i , $i = \{1, 2, \dots, n\}$, $n = 14568$.
2. Obliczono wartość wskaźnika gęstości g_i :

$$g_i = \frac{\text{NDVI}_i}{M_i}$$

3. Ustalono kolejność pól podstawowych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika gęstości. Pola te ponumerowano odpowiednio od $j = 1$ do $j = n$.
4. Zamieniono bezwzględne wartości liczby mieszkańców M_i oraz NDVI_i na wartości względne, które określają udział danej wartości w sumie zmiennej:

$$RM_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

$$RNDVI_i = \frac{\text{NDVI}_i}{\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}$$

5. Skumulowano wartości względne liczby mieszkańców oraz wartości NDVI, obliczając dla każdego j sumę wartości względnych:

$$KRM_j = \sum_{k=1}^j RM_k \quad KRNDVI_j = \sum_{k=1}^j RNDVI_k$$

Otrzymane w punkcie 5 wartości są współrzędnymi punktów (ryc. 4), które połączone ze sobą wyznaczają, wraz z przekątną, **pole koncentracji** P_k , w kształcie wieloboku. Im większe jest pole wieloboku tym większa jest koncentracja analizowanych zjawisk.

Ograniczenie wykonanych obliczeń wyłącznie do zamieszkałych pól podstawowych jest bardzo ważnym

założeniem metodycznym. W ten sposób, zgodnie z celem badań, uwzględniamy tylko zielen najbliższego otoczenia miejsca zamieszkania, natomiast pomijamy obszary niezamieszkane – parki, lasy, cmentarze, uprawy rolne, ogrodnictwo i in. – choć mogą mieć dobrze rozwiniętą roślinność i znajdować się w niedalekiej odległości.

Liczbowym wyrazem koncentracji jest **współczynnik koncentracji**, który obliczono według wzoru:

$$K = \frac{P_k}{0,5P}$$

gdzie:

P_k – pole powierzchni wieloboku koncentracji,

P – pole powierzchni całego wykresu ograniczone współzrzednymi czterech punktów: A, B, C, D.

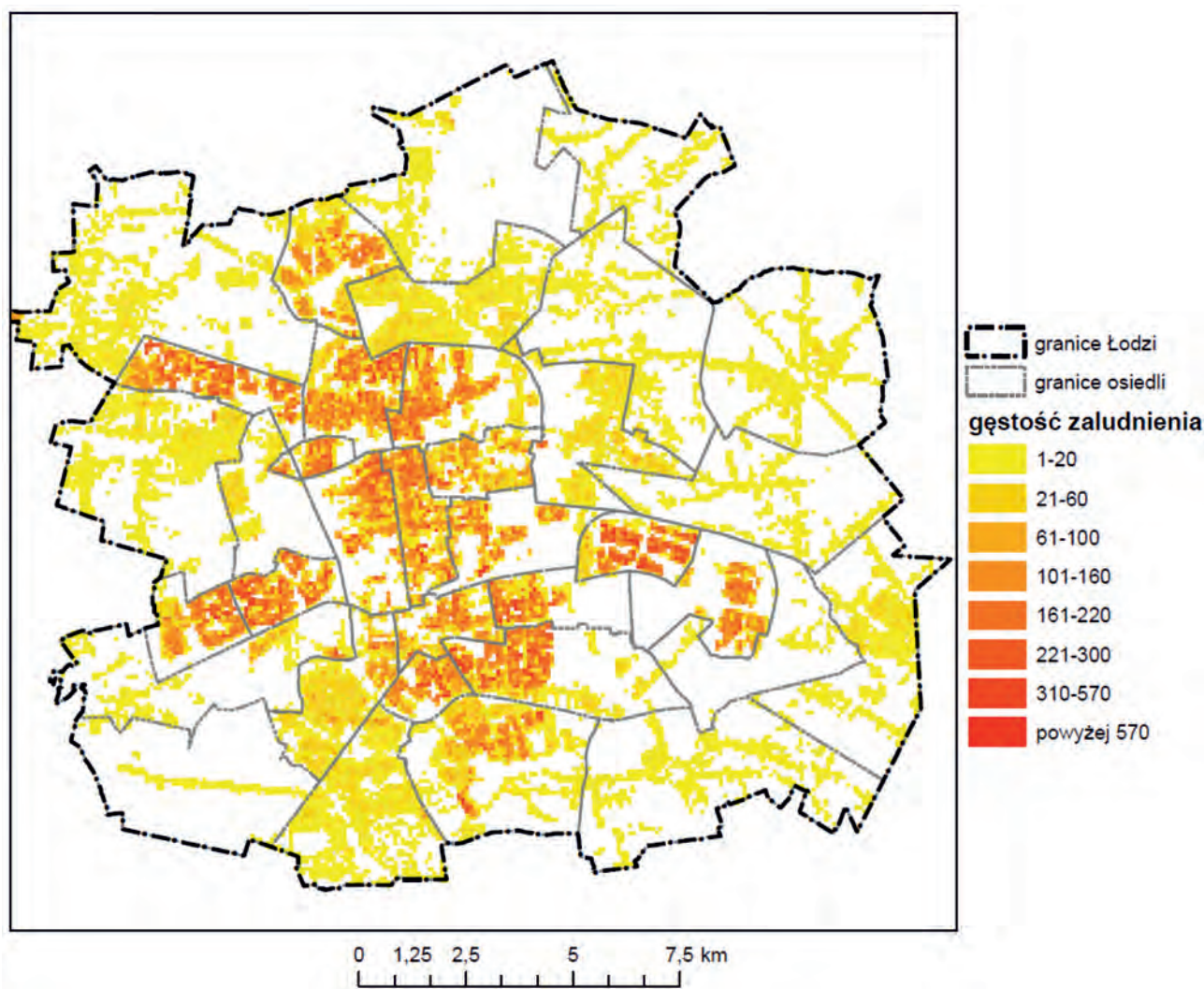
Pole P_k obliczono za pomocą stosowanego w geodezji wzoru wykorzystującego współzrzedne prostokątne wierzchołków wieloboku o ogólnej postaci:

$$P = 0,5 \sum_{i=1}^n Y_i (X_{i+1} - X_{i-1})$$

We wzorze tym P jest powierzchnią wieloboku, natomiast X oraz Y oznaczają współzrzedne prostokątne kolejnych wierzchołków wieloboku – tutaj były nimi skumulowane wartości względne liczby mieszkańców oraz skumulowane wartości względne NDVI.

Wyniki, dyskusja wyników i wnioski

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że na obszarze Łodzi zamieszkanym jest 14 568 pól podstawowych (ryc. 4), co stanowi 40,25% powierzchni miasta. Ludność koncentruje się w centrum, w którym największa gęstość zaludnienia wynosi 1 945 osób na jedno pole o powierzchni 8 100 m².



Ryc. 4. Obszary zamieszkane w Łodzi i liczba mieszkańców (w polach podstawowych 90 × 90 m)

Fig. 4. Residential areas in Łódź and the number of inhabitants within 90 × 90 m cells

Ustalono, że NDVI na obszarze zieleńców, parków i lasów ma wartość powyżej 0,4. Warunki takie można by uznać za optymalne, jednak trudno oczekiwać, aby pole podstawowe 90×90 m pomieściło jednocześnie dużo zieleni i wielu mieszkańców, bowiem niezbędna zabudowa wyklucza

obecność zieleni i odwrotnie. Stąd też tylko 1,72% mieszkańców Łodzi (tab. 1) ma w miejscu zamieszkania zasoby zieleni o tak wysokiej wartości wskaźnika. Ponad połowa mieszkańców miasta (dokładnie 54,02%) ma w miejscu zamieszkania NDVI w granicach od 0,2 do 0,3.

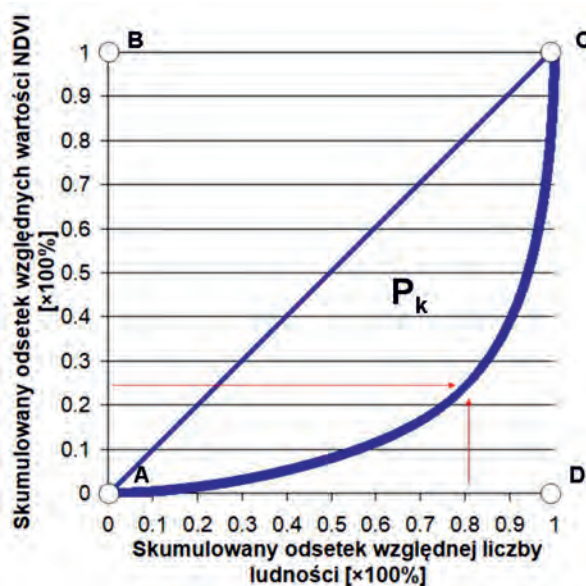
Tabela 1. Strefy NDVI w Łodzi oraz ich mieszkańcy
Table 1. NDVI zones in Łódź and their inhabitants

Strefa NDVI NDVI zone	Zakres NDVI NDVI range	Powierzchnia strefy Area		Mieszkańcy strefy Inhabitants		
		[km ²]	[%]	Liczba osób Number of inhabitants	[%]	% skumulowany % cumulated
0	-0,11 ÷ 0,0	0,02	0,01	0	0	
1	0,0 ÷ 0,1	11,19	3,82	43 941	6,74	
2	0,1 ÷ 0,2	29,95	10,22	132 173	20,27	98,28
3	0,2 ÷ 0,3	74,09	25,27	352 265	54,02	
4	0,3 ÷ 0,4	93,27	31,81	112 484	17,25	
5	0,4 ÷ 0,5	68,83	23,48	10 958	1,68	1,72
6	0,5 ÷ 1,0	15,84	5,39	242	0,04	
Razem		293,19	100,00	652 063	100,00	100,00

Ponieważ wartość $\text{NDVI} \leq 0,3$ może wydawać się stosunkowo małą, a dotyczy dużej liczby mieszkańców, postanowiono sprawdzić, w jakich rejonach miasta występuje oraz jaki jest w nich udział i sposób rozmieszczenia zieleni. Na podstawie obrazów lotniczych stwierdzono, że są to obszary miasta, w których zabudowie towarzyszy rozwinięta zieleń. Można przyjąć, że zieleń tych terenów jest ukształtowana na poziomie akceptowanym przez mieszkańców i nie ma możliwości jej dalszego zwiększania. Natomiast w polach podstawowych obszarów o $\text{NDVI} \leq 0,2$ powierzchnia zabudowy przeważa nad powierzchnią zajęta przez zieleń. Rejonami, które mają stosunkowo dobrze rozwiniętą zieleń można

uznać zatem te, w których $\text{NDVI} \geq 0,2$. Według danych tab. 1 stanowią one 85,96% powierzchni miasta, na której mieszka 72,99% ludności.

Mieszkańcy miasta w różnym stopniu korzystają z tych zasobów zieleni, jakie posiadają w miejscach zamieszkania. Wyznaczone wielkości powierzchni pola wieloboku koncentracji oraz współczynnika koncentracji (ryc. 5) wyniosły odpowiednio $P_k = 0,355$, $K = 0,710$. Wartość współczynnika koncentracji K jest zatem stosunkowo wysoka i wskazuje na znaczną koncentrację ludności oraz NDVI. Według ryc. 5 około 80% mieszkańców ma dostęp w miejscu zamieszkania tylko do około 25% zasobów zieleni.



Ryc. 5. Wielobok koncentracji wyznaczony za pomocą skumulowanej względnej wartości NDVI oraz skumulowanej względnej liczby mieszkańców. Z uwagi na dużą liczbę punktów reprezentujących pola podstawowe ($n = 14568$) nie widać połączeń pomiędzy nimi. Pole koncentracji P_k zawarte jest między przekątną AC oraz linią krzywą utworzoną przez te punkty. Około 80% ludności miasta korzysta tylko z ok. 25% zieleni znajdującej się na terenach zamieszkałych

Fig. 5. The concentration polygon determined by means of the cumulative relative NDVI value (vertical axis) and the cumulative relative number of inhabitants (horizontal axis). Due to the large number of points representing the primary fields ($n = 14568$) you can't see connections between them. The concentration field P_k is contained between the diagonal AC and the curve line created by these points. About 80% of the city's population uses only about 25% of greenery located in inhabited areas

Dla poprawnej interpretacji wskaźnika koncentracji wyznaczonego w badaniach należy pamiętać, że dotyczy on tylko tej zieleni, która znajduje się w zamieszkałych polach podstawowych. Nie uwzględniono zieleni znajdującej się w kwadratach przyległych, a więc w odległości ok. 50 m lub maks. 64 m (połowa przekątnej kwadratu 90×90 m) od punktu reprezentującego miejsce zamieszkania, ani też możliwości wynikających z mobilności mieszkańców, którzy według znanych badań (Czarnecki 1968, Orzeszek-Gajewska 1984, Czerwieniec i Lewińska 1996) są skłonni poszukiwać atrakcyjnych obiektów lub terenów, poruszając się pieszo w obszarze o promieniu ok. 500 m, poświęcając na to ok. $10 \div 15$ minut. Część mieszkańców może podejmować jeszcze dalsze wyprawy (dojazd w czasie 15–30 min) w poszukiwaniu terenów zieleni, korzystając z komunikacji publicznej lub własnych środków transportu (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016). Wprowadzie zieleni ta jest odległa, lecz także wpływa na warunki i jakość życia.

Zaproponowana metoda oceny dostępności zieleni nie pozwala określić dokładnie, w liczbach bezwzględnych i w tradycyjnie w tym celu stosowanych jednostkach miary (liczba mieszkańców na 1 m^2 lub 1 m^3 zieleni), do jakiej ilości zieleni – w miejscu zamieszkania – mają dostęp mieszkańcy miasta. Pozwala jednak na ocenę, w jakim stopniu korzystają oni z tej części zieleni miejskiej, która znajduje się łącznie we wszystkich zamieszkałych polach podstawowych. Pod pojęciem „korzystania z zieleni” należy rozumieć wszelkie formy użytkowania zieleni przez mieszkańców, a więc samo przebywanie w otoczeniu drzew (aspekt estetyczny), modyfikacja temperatury i wilgotności powietrza, zmniejszenie hałasu, oczyszczanie powietrza i wzbogacanie jego składu poprzez substancje wydzielane przez rośliny i in. „Stopień korzystania” rozumiemy natomiast jako określenie z jakiego ułamka ogólnej ilości zieleni (sumy zieleni z zamieszkałych pól podstawowych) korzystają mieszkańcy każdego pola podstawowego. Jak wykazano w Łodzi są rejony, w których mieszka wiele osób i jednocześnie są one w niewielkim stopniu zazielenione, natomiast obszary najbardziej zazielenione są zamieszkane w niewielkim stopniu.

Zielen, która najbardziej wpływa na jakość życia mieszkańców to ta, która znajduje się w miejscu zamieszkania. Ponieważ jednak trudno oczekiwać, aby w danym polu podstawowym znalazło się miejsce zarówno dla zieleni, jak i dużej liczby mieszkańców (postulaty te wykluczają się), znaczenia nabiera zieleni okoliczna. Przestrzeń miast powinna być kształtowana pasmowo: zabudowa – zielen – zabudowa – itd. Nieduże jednostki zabudowy powinny być oddzielone od innych strefami zieleni, którymi mogą być zadrzewienia dróg, wewnątrzsiedlowe zieleńce, małe parki, zieleni towarzysząca ciekom wodnym itp.

Na podstawie analizowanego materiału można wysunąć także wniosek, że na zróżnicowanie wielkości NDVI wpływa rodzaj zabudowy. Wiek zabudowy istotnie wpływa na relacje przestrzenne pomiędzy zielenią i zabudową. Tereny centrum miasta, z ciasno zabudowanymi ulicami i wąskimi podwórkami, mają najmniej zieleni. Osiedla złożone z budynków wielorodzinnych,

które powstawały jeszcze przed II wojną światową, a nawet tzw. blokowiska z okresu PRL, mają większy udział terenów zieleni. Tereny te są już ukształtowane, osiągnęły poziom wypełnienia zielenią, który jest akceptowany przez mieszkańców. Nie można w zasadzie oczekiwać, że ich zazielenienie można zwiększyć, gdyż oznaczałoby to utratę niezbędnych przestrzeni otwartych – istotnych ze względu na potrzebę zapewnienia dostępu światła słonecznego, osi widokowych, placów zabaw, a nawet komunikacji (pieszej i kołowej). To z nimi związany jest, jak zauważyliśmy w pracy, NDVI na poziomie ok. $0,2 \div 0,3$. Podkreślimy, że warunki takie (w zasadzie dobre) ma w miejscu zamieszkania znaczna liczba łódzian (54,02%).

W dalszych badaniach warto zapewne zwrócić uwagę na kształtowanie zieleni (i wartość wskaźnika NDVI) na terenach zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej oraz wielorodzinnej. Na podstawie wizualnej analizy danych można stwierdzić, że tereny te mogą mieć podobne wartości NDVI. Zabudowa wielorodzinna oznacza jednak większe zagęszczenie ludności, czyli dany fragment zieleni świadczy usługi środowiskotwórcze dla większej liczby osób.

Czynnikiem bardzo pozytywnym jest to, że proponowana metoda oceny dostępności do zieleni uwzględnia jej wszelkie rodzaje, niezależnie od formalnych zapisów klasyfikacji terenów. W tym kontekście może być używana do obiektywnego porównywania dostępności zieleni w różnych miastach. Warunkiem koniecznym jest jednak zapewnienie jednorodności danych obrazowych, a więc pozyskanie ich w tym samym okresie sezonu wegetacyjnego oraz odpowiednia korekcja atmosferyczna i słoneczna. Niezbędne byłoby także odpowiednie uwzględnienie różnic sum NDVI w miejscach zamieszkania w poszczególnych miastach.

Mapy rozkładu wartości NDVI mogą być wykorzystane w studiach nad systemem przyrodniczym miasta, bowiem pozwalają na stosunkowo łatwe wskazanie powiązań przestrzennych wszystkich obszarów, które pełnią stale lub czasowo ważne funkcje środowiskotwórcze.

Bibliografia

- Alexander C., 2008, Język wzorców. Miasta, budynki, konstrukcja, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk.
Badgley G., Field C.B., Berry J.A., 2017, Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis, *Science Advances* 3, 1–5.
Białobok S., 1976, Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka, [w:] Michajłow W. i in. (red.), Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka, PWN, Warszawa, 223–245.
Bożętka B., 2008, Systemy zieleni miejskiej w Polsce – ewaluacja i problemy kształtowania, *Problemy Ekologii Krajobrazu* 22, 49–63.
Bulhak M., 2004, Atrakcyjność toruńskiego osiedla Kaszczorek jako miejsca zamieszkania, [w:] Jażdżewska I. (red.), XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście, Łódź.
Colombo R., Bellingeri D., Pasolini D., Marino C.M., 2003, Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment* 86, 120–131.

- Czarnecki W., 1968, Planowanie miast i osiedli, t. 3: Tereny zielone, PWN, Warszawa-Poznań.
- Czerwieniec M., Lewińska J., 1996, Zielon w mieście, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa.
- Czyżewski A., 2001, Trzewia Lewiatana. Antropologiczna interpretacja utopii miasta-ogrodu, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Deering D.W., 1978, Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station.
- Durecka I., 2017, Parki jako element struktury przestrzennej miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego, Instytut Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki (praca doktorska – maszynopis).
- Jackson R.D., Huete A.R., 1991, Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine* 11, 185–200.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008, Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki, *Teledetekcja Środowiska* 40, 100–124.
- Jajdzewska I., 2013, Statystyka dla geografów, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kopańczyk K., Fitrzyk M., 2016, Satellite imagery for the improvement of SOZO database – the case study in Central and High Sudetes, *Acta Scientiarum Polonorum Geodesia et Descriptio Terrarum* 15(1–4), 5–18.
- Lhermitte S., Verbesselt J., Verstraeten W.W., Coppin P., 2010, A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 76(6), 673–682.
- Luszniewicz A., 1980, Statystyka ogólna, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Lüdecke M.K.B., Ramge P.H., Kohlmaier G.H., 1996, The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: Application to the Frankfurt Biosphere model, *Ecological Modelling* 91, 255–270.
- Łukasiewicz A., Łukasiewicz S., 2016, Rola i kształtowanie zieleni miejskiej, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Mierzejewska L., 2001, Tereny zielone w strukturze przestrzennej Poznania, Wydawnictwo Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Poznań.
- Mierzejewska L., 2002, Tereny zielone w wybranych miastach Polski, [w:] Słodczyk J. (red.), *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego, Opole.
- Mierzejewska L., 2004, Tereny zielone jako wyznacznik warunków życia w mieście (na przykładzie Poznania), [w:] XVII Konwersatorium wiedzy o mieście, Uniwersytet Łódzki, Łódź.
- Myczkowski S., 1976, Człowiek, przyroda, cywilizacja, PWN, Warszawa.
- Nasiłowska S.A., Kubiak K., 2016, Zmienność wskaźników NDVI oraz NDMI na przykładzie analizy uprawy kukurydzy w Etiopii, *Teledetekcja Środowiska* 55, 15–26.
- Olpanda A.S., Paringit E.C., 2011, Utilizing spectra reflectance and vegetation indices of *Bougainvillea spectabilis* for monitoring particulate air pollution in Metro Manila, *Proc. 32nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2011): Sensing for Green Asia*, October 3–7, 2011, Taipei Int'l Convention Center, Taipei, Taiwan.
- Orzeszek-Gajewska B., 1984, Kształtowanie terenów zieleni w miastach, PWN, Warszawa.
- Panda S.S., Ames D.P., Panigrahi S., 2010, Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques, *Remote Sensing* 2, 673–696.
- Parysek J.J., 2004, Warunki życia w miastach polskich w okresie transformacji, [w:] Jajdzewska I. (red.), *Zróżnicowanie warunków życia ludności w mieście*, XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 55–66.
- Ptaszycka A., 1950, Przestrzenie zielone w miastach, Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza, Poznań.
- Rocznik 2015: Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2015, GUS, Warszawa.
- Rocznik 2018: Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2018, GUS, Warszawa.
- Rouse J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., 1973, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *Progress Report RSC 1978–2*, Texas A&M University, USA.
- Statystyka 2018: Statystyka Łodzi 2018, Wojewódzki Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Tucker C.J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment* 8, 127–150.
- Ustawa 1980: Ustawa z 31 stycznia 1980 r. o ochronie i kształtowaniu środowiska, Dz.U. nr 3, poz. 6.
- Ustawa 2004: Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (tekst jednolity Dz.U. z 20 października 2015 r., poz. 1651).
- Walkowicz T., 2002, Społeczne i ekologiczne aspekty tworzenia i utrzymania terenów zieleni w miastach, [w:] Słodczyk J. (red.), *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast*, Uniwersytet Opolski, Opole, 347–358.
- Wang L., Hunt J.E.R., Qu J.J., Hao X., Daughtry C.S.T., 2011, Towards estimation of canopy foliar biomass with spectral reflectance measurements, *Remote Sensing of Environment* 115(3), 836–840.
- Wang T., Skidmore A.K., Toxopeus A.G., Lin X., 2009, Understory bamboo discrimination using a winter image, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75(1), 37–47.
- Wirth H., Schilbach G., Wirth A., 1987, Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich, *Vermessungstechnik* 33(2), 56–59.
- Wodziczko A., 1937, Planowanie kraju drogą do utrzymania równowagi w przyrodzie, *Ochrona Przyrody* 17, Kraków.
- Yan J., Zhou W., Han L., Qian Y., 2018, Mapping vegetation functional types in urban areas with WorldView-2 imagery: Integrating object-based classification with phenology, *Urban Forestry & Urban Greening* 31, 230–240.
- Zarzecki M., Pasierbiński A., 2009, Zastosowanie GIS i teledetekcji w badaniach szaty roślinnej, *Wiadomości Botaniczne* 53(3/4), 53–66.
- Zarządzenie 1964: Zarządzenie nr 118 Ministerstwa Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych z 15 czerwca 1964 r. w sprawie wskaźników wykorzystania terenów zainwestowania miejskiego, *Dziennik Budownictwa* nr 14.

Porównanie oprogramowania do przetwarzania danych LiDAR w zakresie generowania NMT i NMPT

Comparison of LiDAR data processing software in the field of DTM and DSM generation

Adam BIELECKI

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast i Turyzmu, Zakład Geoinformacji
ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź
adam_biel@o2.pl

Streszczenie

Dane LiDAR dostarczają wielu informacji o terenie jednak wymagają bardzo czasochłonných procesów obróbki oraz odpowiednich zasobów sprzętowych. W trakcie analiz przestrzennych bazujących na dużych zestawach danych napotkać można wiele problemów natury technicznej. W artykule podjęto próbę konwersji chmury punktów do modelu rastrowego NMT oraz NMPT. Szukając najlepszego rozwiązania wykorzystano 7 różnych programów dostępnych na licencji studenckiej, open-source oraz w wersji próbnej. Każdy program jednak znacząco różni się pod względem ingerencji użytkownika, możliwości analitycznych, możliwości automatyzacji czy też radzenia sobie z dużymi zestawami plików, stąd też wybór odpowiedniego oprogramowania jest bardzo trudny.

Słowa kluczowe: LiDAR, oprogramowanie, teledetekcja, NMT, NMPT, chmura punktów

Abstract

LiDAR data provides a lot of information about terrain, but they need very time consuming processes of generating other products and a good quality of hardware. During spatial analyses based on big sets of data one can meet many technical problems. In the article it was made an attempt to build a DTM and a DSM raster models based on point cloud. Looking for the best solution 7 different software has been used available on educational, open-source or trial license. Each software is different regarding the user integration, analytics possibilities, abilities to automate the processes and management of working with big size data. That is why the choice between the best software is so hard.

Key words: LiDAR, software, remote sensing, DTM, DSM, point cloud

Wprowadzenie

Dane LiDAR (Light Detection And Ranging) są to dane wysokościowe pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego (ALS Airborne Laser Scanning). Dzięki tej technologii możliwe jest otrzymanie szczegółowych informacji o fizycznej strukturze 3D danego fragmentu terenu (Lefsky M. et al., 2002). Z racji gęstości pomiaru nie mniejszej niż 4 pkt/m² dane te są również nazywane chmurą punktów (Malingier A., 2012). W niniejszej pracy wykorzystano dane LiDAR pozyskanych z projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami). Łączna powierzchnia opracowania danych objęła ok 289 000 km², co stanowi 92% ogólnej powierzchni Polski. Pozyskane dane charakteryzowały się gęstością 4, 6 (standard I) oraz 12 punktów na 1 m² (standard II) dla miast powyżej 500 000 mieszkańców (Wężyk P., 2014). Analizowany obszar został pomierzony z dokładnością wg standardu II.

Wraz z danymi chmury punktów pozyskano zdjęcia wykonane kamerą cyfrową z kolorową matrycą CCD, dzięki czemu każdy punkt otrzymał atrybut RGB ułatwiający interpretację obiektów i ich klasyfikację. Wynikowa chmura punktów opracowana została w układzie współrzędnych prostokątnych płaskich PL-1992 oraz w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH.

Arkusze chmur punktów zapisano do formatu LAS w wersji 1.2. Każdy pomierzony punkt zawiera następujące atrybuty:

- współrzędne przestrzenne punktu (X, Y, H),
- intensywność odbicia,
- kolejne odbicie (echo) danego impulsu laserowego,
- łączna liczba odbić (ech) danego impulsu laserowego,
- kierunek skanowania,
- znaczenie punktu skrajnego w linii,
- przynależność danego punktu do klasy,
- kąt, z jakim skaner wyemitował impuls,
- przynależność danego punktu do szeregu,
- czas pozyskanego danego punktu,
- składowe RGB punktu.

Przynależność do klasy określono poprzez wstępną automatyczną klasyfikację, a następnie również poprzez manualną edycję. W danych LiDAR projektu ISOK wyszczególniono następujące klasy:

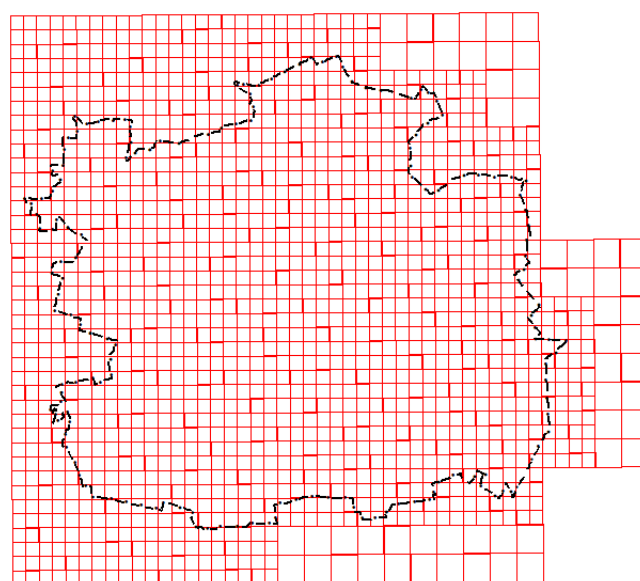
- punkty niesklasyfikowane;
- grunt;
- niska roślinność (do 0,40 m wysokości nad gruntem);
- średnia roślinność (0,40 – 2 m wysokości nad gruntem);
- wysoka roślinność (powyżej 2 m wysokości nad gruntem);
- budynki (w tym budowle i konstrukcje inżynierskie);
- szum (punkty omyłkowe i piki wysokościowe);
- obszary pod wodami;

- wielokrotne pokrycie (GUGIK, Warunki techniczne..., 2013).

Analizowane dane obejmowały swoim zasięgiem stolicę województwa łódzkiego, miasto Łódź. Położone w centralnej Polsce trzecie co do wielkości miasto w Polsce (pow. 293,2 km²) zostało przeskanowane w roku 2013¹.

Dane LiDAR i wymagania projektu

Dane LiDAR pozyskano z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w postaci 1560 plików formatu .las. Otrzymane arkusze pokrywają granice Łodzi (na podstawie Państwowego Rejestru Granic, Ustawa Prawo geodezyjne i kartograficzne z dnia 17 maja 1989) i bezpośrednie jej okolice (Ryc. 1) obejmując łącznie ponad 300 km². Dla analizowanego terenu pozyskane zostały dane charakteryzujące się gęstością nie mniejszą niż 12 punktów na 1 metr kwadratowy (wyjątkiem są niektóre obszary poza granicami miasta Łodzi). Łącznie przeanalizowana chmura punktów zajmowała ponad 400 GB miejsca na dysku twardym.



Ryc. 1 Granice arkuszy chmury punktów wykorzystywanych w omawianych badaniach.

Fig. 1. The borders of sheets of point clouds used in discussed studies

Efektem końcowym było uzyskanie Numerycznego Modelu Terenu dla analizowanego obszaru oraz Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu dla analogicznych jednostek uwzględniając jedynie punkty sklasyfikowane jako roślinność i grunt. Produkty te charakteryzowały się rozdzielczość przestrzenną wynoszącą 10 metrów. Następnie otrzymane dane wykorzystano do stworzenia Modelu Wysokościowego

¹ <https://isok.gov/>

Roślinności (VHM – Vegetation Height Model) również o rozdzielczości piksela 10 metrów.

Wszystkie dane transformowane były na komputerze osobistym wyposażonym w 8-rdzeniowy procesor Intel Core i7-8550CU o częstotliwości taktowania 1,8 GHz, 16 GB pamięci operacyjnej RAM oraz dedykowaną kartą graficzną Nvidia GeForce MX 150 o pamięci 2 GB. Wykorzystano dwa dyski twarde: lokalny typu SSD SanDisk o pojemności 500 GB na którym zainstalowany został system operacyjny Windows 10 w wersji 64-bitowej oraz testowane oprogramowanie, oraz dysk zewnętrzny typu HDD WD o pojemności 4 TB na którym znajdowały się dane wejściowe LAS oraz wynikowe rastry. Dane te były przesyłane poprzez złącze USB typu 3.0 o przepływności do 600 MB/s.

Metodyka

Aby osiągnąć założony rezultat otrzymaną chmurę punktów, która już była sklasyfikowana, należało przefiltrować w odpowiedni sposób dla Numerycznego Modelu Terenu. Przefiltrowanie każdego arkusza chmury punktów polegało na usunięciu wszystkich danych pozostawiając jedynie odbicie sklasyfikowane dla gruntu.

Na podstawie przefiltrowanej chmury punktów zbudowano Numeryczny Model Terenu o rozdzielczości 10 metrów i zapisano go do rastra w formacie GeoTIFF dla każdego arkusza.

Następnie ponownie przefiltrowano każdy arkusz chmury punktów pozostawiając jedynie odbicie dla gruntu oraz roślinności wysokiej, średniej oraz niskiej. Na podstawie przefiltrowanej chmury punktów zbudowano Numeryczny Model Pokrycia Terenu o rozdzielczości 10 metrów i również zapisano go do rastra w formacie GeoTIFF dla każdego arkusza.

Końcowym elementem było wykonanie procesu odejmowania wartości pikseli z arkuszy NMPT dla roślinności o wartość z arkuszy NMT.

Aby wykonać powyższe kroki należało posłużyć się odpowiednim oprogramowaniem. Wybrano więc 7 różnych programów typu GIS i sprawdzono ich możliwości odczytu chmury punktów wraz z atrybutami, filtracji sklasyfikowanych punktów, zbudowania modelu terenu/pokrycia terenu i zapisania go do formatu rastrowego. Testom poddano następujące programy (w nawiasach forma licencji):

ArcMap 10.5.1 (edukacyjna)

LAS Tools 5.09.18 (open source – wersja podstawowa)

Autodesk ReCap 4.2, AutoCAD Civil 3D 2018.2, InfraWorks 2018.1 (edukacyjna)

ENVI LIDAR 5.5 (wersja testowa)

QGIS 2.14 (open source)

ArcGIS Pro 2.0 (edukacyjna)

CloudCompare 2.9.1 (open source)

ArcMap jest częścią kompletnego pakietu aplikacji typu desktop obejmującego: ArcGIS Pro oraz ArcMap. Tworzenie map, wykonywanie analiz przestrzennych i zarządzanie danymi wchodzi w zakres możliwości zarówno jednej jak i drugiej aplikacji. ArcMap-a umożliwia zastosowanie dodatkowych rozszerzeń (np. 3D Analyst), które umożliwiają dokonanie zaawansowanych analiz, obsługi specjalistycznych danych lub rozwiązań branżowych².

ArcMap posiada szereg narzędzi zebranych w skrzynki narzędziowe umożliwiające wybranie odpowiednich narzędzi dla danego zadania. Program odczytuje zarówno pliki LAS jak także skompresowaną wersję tychże (LAZ). Dodatkowo istnieje możliwość generowania danych wynikowych do wielu formatów rastrowych i wektorowych.

Sam proces tworzenia rastrów odbywa się dwustopniowo. Pierwszym etapem jest stworzenie LAS-Dataset dla każdego arkusza. Proces tworzenia tych elementów jest możliwy do szybkiego zautomatyzowania dzięki językowi programowania Python 2.7. Na początku napisano skrypt wykonujący filtrację oraz budowę LASDatasetów. W taki sam sposób, lecz uwzględniając jedynie odbicia sklasyfikowane jako grunt, zbudowano Numeryczny Model Terenu.

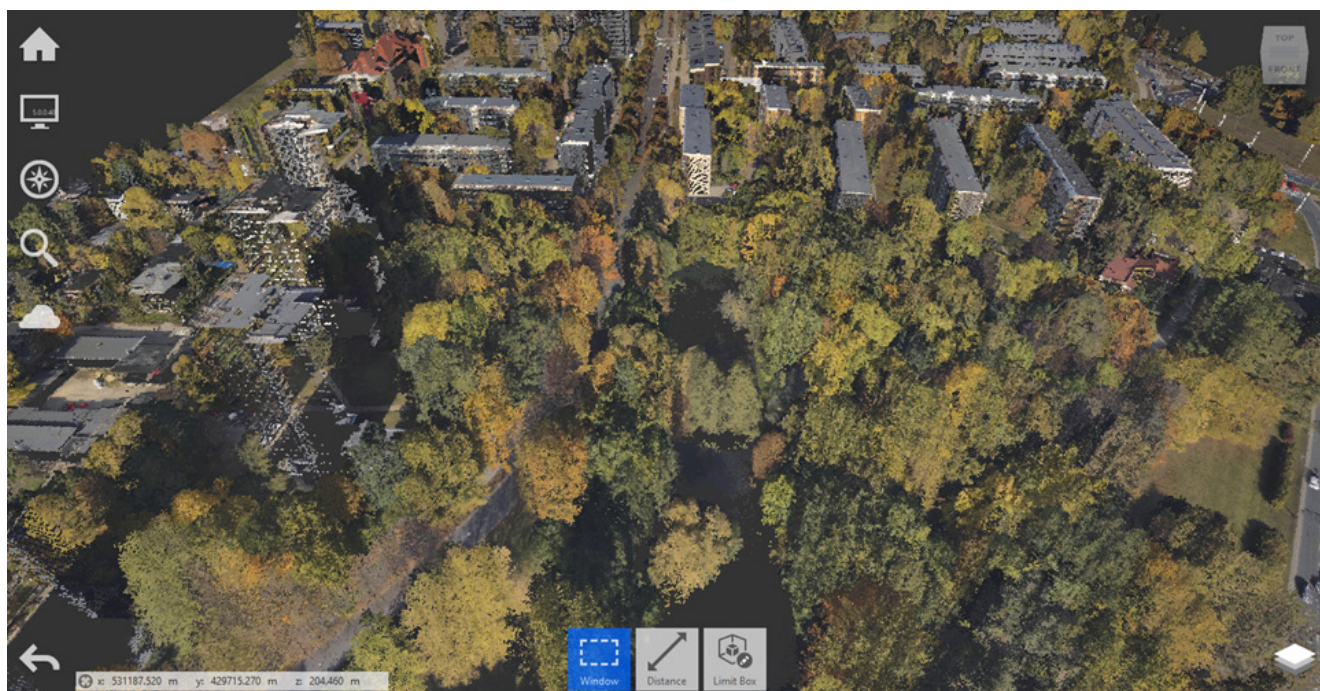
Po wykonaniu procesu filtrowania i utworzenia LASDatasetów przystąpiono do utworzenia na ich podstawie rastrów wysokościowych (zarówno dla NMPT roślinności oraz NMT). W tym celu również wykorzystano język Python 2.7.

Kolejnym etapem przygotowania danych było wyliczenie różnicy wartości poszczególnych pikseli poprzez wykorzystanie Raster Kalkulatora. W celu zautomatyzowania procesu również wykorzystano język Python 2.7. Cały proces przygotowania rastra Modelu Wysokościowego Roślinności (Vegetation Height Model) na wykorzystaniu Lasdatasetów przygotowanych w poprzednim kroku.

LASTools jest to oprogramowanie stworzone przez firmę Rapidlasso GmbH. W przeprowadzonych testach zaimportowano pakiet LASTools jako skrzynkę narzędziową programu ArcMap³. Wykorzystano wersję z dnia 5 września 2018. Paczka narzędziowa umożliwia filtrację sklasyfikowanych punktów (np. roślinność) na podstawie których tworzony jest Numeryczny Model Pokrycia Terenu (Pietrzyk J., 2013). W ramach przeprowadzonych testów wykorzystano wersję podstawową na licencji Open Source. Z racji zachowania cech systemowych narzędzi ArcMapy możliwe było zastosowanie skryptów w języku Python 2.7 w celu automatyzacji procesu budowy rastrów wysokościowych. Zaletą narzędzia jest możliwość odczytania klasyfikacji chmury punktów.

² <https://www.esri.pl>

³ <https://rapidlasso.com/lastools/>



Ryc. 2. Chmura punktów w kolorach RGB dla fragmentu Łodzi wyświetlona w oprogramowaniu Autodesk ReCap

Fig. 2. A point cloud of a part of Łódź in RGB colors displayed in Autodesk ReCap software

Oprogramowanie firmy Autodesk jest jednym z wiodących w branży CAD (Computer Aided Design – Projektowanie Wspierane Komputerowo) jak również GIS (Geographic Information System – System Informacji Geograficznej). W celu obróbki chmury punktów wykorzystano programy ReCap w wersji 4.2 (do przeindeksowania chmury punktów), AutoCAD Civil 3D 2018 (w celu filtracji punktów i utworzenia NMPT oraz NMT), oraz InfraWorks (w celu sprawnego wyświetlenia danych).

Powyższe oprogramowanie jest produktem komercyjnym. W tym przypadku wykorzystano licencję bezpłatną w ramach udostępnionej przez producenta licencji studenckiej w celach nauki lub badań naukowych.

Jednym z głównych ograniczeń oprogramowania jest możliwość czytania jedynie ograniczonego zakresu rozszerzeń plikowych, przede wszystkich tych, które są natywnymi formatami oprogramowania Autodesk⁴.

Analizy rozpoczęto od indeksowania chmury punktów w programie ReCap (Ryc. 2) dzięki czemu wyświetlanie i praca z tymi danymi jest dużo szybsza. Następnym krokiem było zaimportowanie chmury punktów do programu AutoCAD Civil 3D w celu filtracji punktów oraz wygenerowania Numerycznego Modelu Terenu oraz Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu dla roślinności. Program nie ma możliwości wyliczenia różnic rastrowych dla dwóch modeli. W związku z powyższym nie można było do końca przeprowadzić testów.

⁴ <https://www.autodesk.pl/>

QuantumGIS jest otwartoźródłowym Systemem Informacji Geograficznej licencjonowanym na warunkach GNU General Public License. QGIS jest oficjalnym projektem Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Działa na systemach Linux, Unix, Mac OSX, Windows i Android. Obsługuje wiele funkcji i formatów: wektorowych, rastrowych i bazodanowych⁵.

Program posiada wiele funkcjonalności dzięki możliwości zaimportowania wtyczek tworzonych przez społeczność QGIS. Istnieje możliwość automatyzacji procesu w języku Python 2.7

ArcGIS Pro zostało stworzone do współpracy z ArcGIS Online oraz ArcGIS Enterprise. ArcGIS Pro jest częścią kompletnego pakietu aplikacji ArcGIS Desktop obejmującego ArcGIS Pro oraz ArcMap, współpracuje również z rozszerzeniami do zaawansowanych analiz, przetwarzania specjalistycznych danych i schematów pracy oraz rozwiązań branżowych.

Wykorzystując dane zebrane z wielu źródeł, można tworzyć zarówno inteligentne, jak i atrakcyjne wizualnie mapy. Potężne narzędzia analityczne 2D i 3D pozwalają na identyfikację wzorców i trendów. Otrzymane w wyniku analiz przydatne informacje można wykorzystać na wiele różnych sposobów udostępniając je w organizacji, Internecie oraz w aplikacjach mobilnych.

ArcGIS Pro wymaga pracy w trybie online ze stałym połączeniem do Internetu. Posiada możliwość tworzenia skryptów automatyzujących pracę.

CloudCompare jest oprogramowaniem umożliwiającym edytowanie i procesowanie trójwymiarowych danych.

⁵ <https://www.qgis.org/pl/site/>

rowej chmury punktów. Całość oparta o strukturę drzewa ósemkowego zapewnia wysoką wydajność umożliwiającą pracę na dużych zbiorach danych na standardowym komputerze. Program dysponuje wieloma narzędziami i algorytmami pozwalającymi na wykonanie wielu zadań związanych z chmurą punktów. Program działa na licencji Open Source. Nie ma możliwości automatyzacji pracy z wyjątkiem zewnętrznego oskryptowania (np. wielokrotne uruchamianie danego narzędzia w języku PowerShell na systemie operacyjnym Windows).

ENVI LiDAR jest oprogramowaniem pozwalającym na przetwarzanie danych pochodzących ze skaningu laserowego poprzez tworzenie wizualizacji trójwymiarowych a w konsekwencji tworzenie analiz niezbędnych w innych projektach, np. badanie widoczności lub inwentaryzacja zasobów leśnych. Program obsługuje takie formaty jak LAS, LAZ, TXT oraz BIN. Możliwe jest również tworzenie skryptów IDL.

Wyniki testów

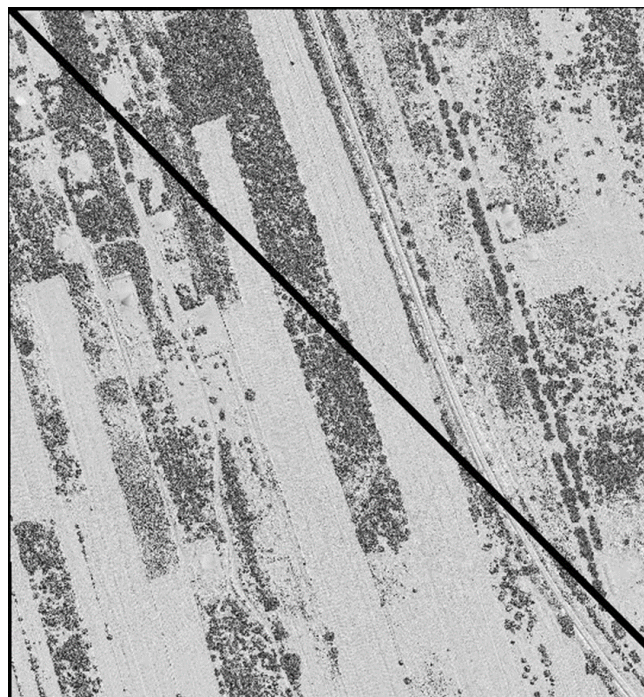
Wykorzystując tak szerokie spektrum oprogramowania i narzędzi możliwe staje się porównanie funkcjonowania każdej z aplikacji. Zwrócono uwagę na takie aspekty jak możliwość automatyzacji, szybkość pracy, możliwe jednorazowe obciążenie (czy jest konieczne porcjowanie danych) oraz akceptowalne wielkości pojedynczych arkuszy. Zwrócono też uwagę na możliwości dalszej edycji materiału, np. dokonanie analiz rastrowych bazujących na danych z chmur punktów.

Program ArcMap dzięki intuicyjnemu interfejsowi oraz możliwości automatyzacji w języku Python oraz w Model Builder usprawnia pracę osiągając satysfakcjonujące efekty. Problemem mogą być błędy pojawiające się podczas tworzenia rastrow, a będące bardzo mylące. Przykładem mogą być komunikaty o błędach np. „The table name is invalid. No spatial reference exists” (Ryc. 3) mogące sugerować konieczną zmianę nazwy tabeli w geobazie lub konieczność zweryfikowania przypisanego układu współrzędnych. W praktyce problem był spowodowany zbyt długą nazwą pliku wyjściowego.

Sam proces budowy NMT i NMPT z chmury punktów przebiegał w tempie ok 50 arkuszy na godzinę, co przy ilości 1560 arkuszy całość procesu każdorazowo zajmuje ok 32 godzin. Należy przy tym pamiętać iż komputery osobiste nie posiadające zabezpieczenia przed przerwaniem procesu (np. w postaci UPSów podtrzymujących zasilanie i zamykających procesy w przypadku przerw w dostawie prądu) mogą nie

być w stanie pracować ciągle z pełnym obciążeniem przez tak długi czas. Dlatego też należy podzielić całość danych na mniejsze paczki. W przeciwnym wypadku program po kilku godzinach pracy może przestać działać.

Program LAStools dzięki możliwej integracji z ArcGIS oraz QGIS tworzy doskonale środowisko do pracy z dużymi partiami danych. Jednak ograniczeniem wersji bezpłatnej jest wielkość arkusza nie większa niż 2 miliony punktów. Przeciętny analizowany arkusz zawierał pomiędzy 12-14 milionów punktów.



Ryc. 4. Raster zbudowany na podstawie chmury punktów po przetworzeniu w programie LAStools dla arkusza zawierającego powyżej 2 milionów punktów.

Fig. 4. A raster built up from a point cloud after converting in LAStools software for a sheet, which includes over than 2 million of points.

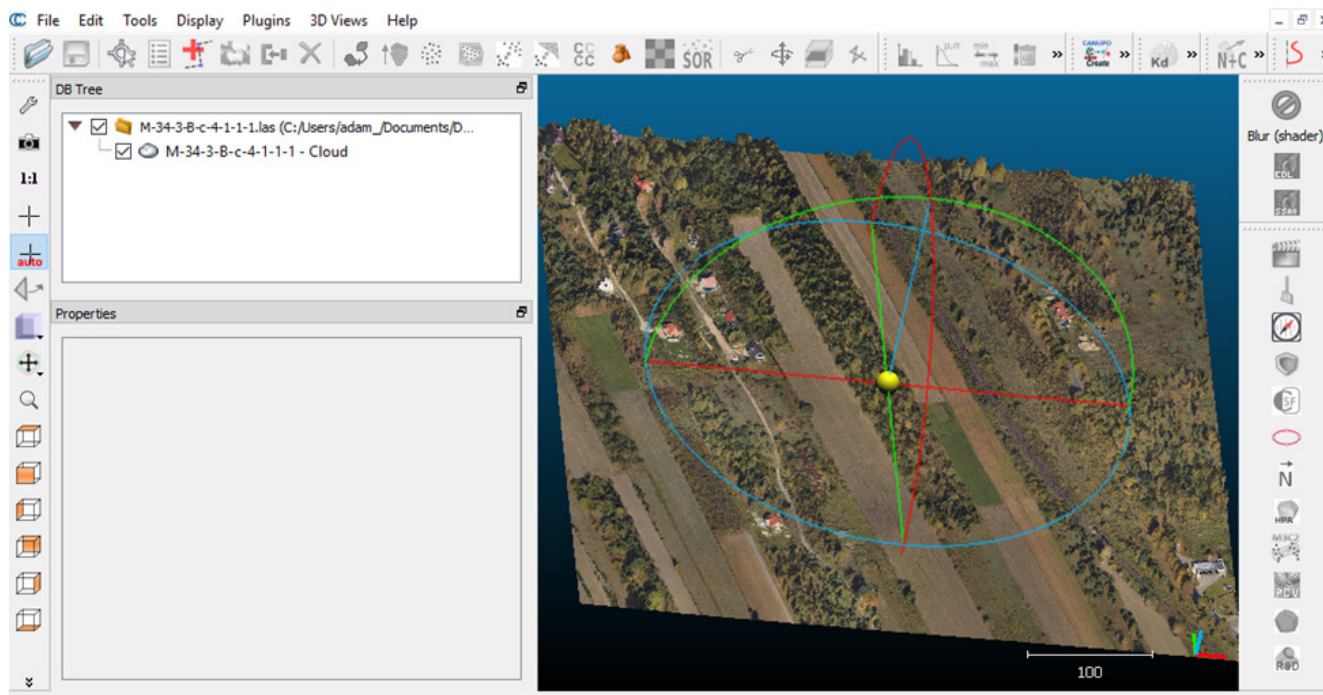
W efekt końcowy był podzielony piskelami o wartości 0 wzdłuż przekątnej przesuwając wszystkie dane o wielkość równą wytworzonej przerwie (Ryc. 4).

Obróbka danych chmury punktów w programie ReCAP jest niezwykle szybka, ale po wcześniejszym koniecznym przeindeksowaniu wszystkich arkuszy. Sam proces indeksowania można przeprowadzić hurtowo dla wszystkich danych w danym folderze. W przypadku 1560 arkuszy proces ten trwał ok. 20 godzin ciągłej pracy bez zbytniego obciążania zasobów komputera. Wykorzystując tak przygotowane dane praca w kolejnej aplikacji – AutoCAD Civil 3D jest bardzo szybka. Samo generowanie NMT czy

```
Runtime error Traceback (most recent call last): File "<string>", line 2, in <module> File "c:\program files (x86)\arcgis\desktop10.5\arcpy\arcpy\
\conversion.py", line 2669, in LasDatasetToRaster raise e ExecuteError: ERROR 000210: Cannot create output D:\Doktorat\LAS\Rasters_Veg.gdb\1_veg The table name
is invalid. No spatial reference exists. Failed to execute (LasDatasetToRaster).
```

Ryc. 3 Komunikat błędu z programu ArcMap

Fig. 3. Error notification in ArcMap software



Ryc. 5. Chmura punktów w barwach pseudonaturalnych w programie CloudCompare

Fig. 5. A point cloud displayed in pseudonatural colors in CloudCompare software

NMPT w programie również jest szybkie i możliwe jest załączenie wszystkich arkuszy jednocześnie. Niestety program posiada bardzo dużą wadę – nie można przekonwertować danych do pliku rastrowego na podstawie własnej definicji filtrowania chmury. Możliwe jest jedynie wykorzystanie zdefiniowanych w programie algorytmów, które to nie uwzględniają samej roślinności. Tak więc sama obróbka danych przebiega bardzo sprawnie, jednak funkcjonalność aplikacji nie pozwalała na dokonanie wszystkich niezbędnych czynności.

W programie QuantumGIS proces automatyzacji jest znacznie bardziej skomplikowany niż w ArcMap mimo wykorzystania tego samego języka programowania. Przyczyną jest konieczność odwołania się do wielu komponentów zainstalowanych wtyczek i systemu operacyjnego. Aplikacja nie radzi sobie również z większą ilością danych użytych jednorazowo. Średnio po przerobieniu kilku arkuszy program przestaje działać i procedurę należy powtarzać wielokrotnie.

ArcGIS Pro wymaga bardzo dobrego łącza internetowego, gdyż wszystkie prace wykonywane są w chmurze. Dzięki temu natomiast nie obciąża się zasobów komputera, gdyż proces wykorzystuje komponenty serwera Esri. Program nie ma jednak możliwości eksportowania kody Python z Model Buildera. Proces budowania rastrów przebiega szybko i sprawnie.

CloudCompare umożliwia analizę chmur punktów i ich obróbkę⁶ (Ryc. 5). Problemem jest brak optymalizacji procesu automatyzacji. Sam program nie

oferuje możliwości hurtowego przetwarzania danych. Teoretycznie można całość zoptymalizować skryptem PowerShell, jednak tutaj pojawia się problem potwierdzenia zapisania nowego rastra przy każdym arkuszu. W tym przypadku należałoby zaimplementować rozwiązanie zewnętrzne umożliwiające automatyczne potwierdzanie pojawiających się okienek, co jest odrębnym zadaniem. Program bardzo dobrze spisuje się w pracy z pojedynczym arkuszem oferując szereg rzadko spotykanych opcji, np. obliczania objętości zeskanowanych obiektów.

EnviLIDAR jest bardzo intuicyjnym programem. Niewątpliwą zaletą aplikacji jest możliwość podłączenia narzędzi EnviLIDAR jako skrzynki narzędziowej programu ArcMap. Dużym problemem jest brak możliwości odczytania/wykorzystania informacji o klasyfikacji punktów przy eksporcie do pliku rastrowego. Samo tworzenie rastrów przebiega sprawnie.

Wnioski

Wybór oprogramowania zależy jest w dużej mierze od ilości posiadanych danych, zastosowanych metod filtracji oraz od spodziewanego efektu końcowego. Innym programem należy się posłużyć, by otrzymać trójwymiarowy model, zaś inny w celu wykonania analiz płaskich. Ważnym czynnikiem jest też ilość danych, tj. liczba arkuszy i gęstość chmury. W niniejszej analizie uwzględniono obróbkę punktów do analizy danych płaskich wykorzystując bardzo duży zestaw danych. Tak duża ilość danych przeznaczonych do konwersji może być wyzwaniem dla każdego

⁶ <https://www.cloudcompare.org/>

Tabela 1. Zestawienie i ocena funkcjonalności poszczególnych programów dla tworzenia NMT oraz NMPT na podstawie chmury punktów LiDAR*

Table 1. Summary and evaluation of the functionality of individual software for creating DTM and DSM based on LiDAR point cloud*

Nazwa oprogramowania	Automatyzacja	Intuicyjność	Możliwości analiz	Licencja	Szybkość/możliwość pracy z dużymi zestawami
Las Tools	*****	*****	***	Open source	*
QGIS	*****	**	****	Open source	***
ArcGIS	*****	*****	*****	Studencka	***
Cloud Compare	***	**	***	Open source	***
ArcGIS Pro	****	***	*****	Studencka	***
Autodesk	***	**	**	Studencka	*****
Envi	***	****	****	Próbna	****

*oceny dokonano na podstawie zagregowania czynników wpływających na daną cechę

komputera (Kissling et al., 2017). Powyższe wnioski mogą być niepewne przy konwersji niewielkiej ilości danych.

W niniejszym artykule nie uwzględniono wszystkich dostępnych programów przetwarzających dane LiDAR jak chociażby LP360, MicroStation+Terra-Solid, Geomedia, Fugro Viewer, DTMaster, Erdas Imagine, Fusion czy GRASS GIS. Pod uwagę wzięto jedynie to oprogramowanie, do którego dostęp jest teoretycznie najłatwiejszy lub też licencja pozwala na darmowe wykorzystanie oprogramowania do celów naukowych bądź edukacyjnych.

Literatura

- Kissling, W. D., Seijmonsbergen, A., Foppen, R., & Bouten, W., 2017. eEcoLiDAR, eScience infrastructure for ecological applications of LiDAR point clouds: Reconstructing the 3D ecosystem structure for animals at regional to continental scales. Research Ideas and Outcomes, 3.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. Bio-science, 52, s. 19–30.
- Malinger A., 2012, Wprowadzenie do opracowania map zagrożenia powodziowego i ryzyka powodziowego. Konferencja ISOK-KZGW, Warszawa.
- Pietrzyk J., 2013, Geodeta testuje: LAsTools. Geodeta 10/2013.
- Wężyk Piotr (red), Warszawa 2014, Wprowadzenie dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR, GUGiK.
- Ustawa Prawo geodezyjne i kartograficzne z dnia 17 maja 1989 (Dz. U. z 1989 r. Nr 30 poz. 163 z późn. zm.).
- GUGiK, 2013. Warunki techniczne na pozyskanie danych wysokościowych w technologii LiDAR oraz opracowanie produktów pochodnych. Załącznik nr 1 do SIWZ – Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia wraz z załącznikami – Warunki techniczne.
- <https://isok.gov.pl/>
- <https://rapidlasso.com/lastools/>
- <https://www.autodesk.pl/>
- <https://www.qgis.org/pl/site/>
- <https://www.esri.pl/>
- <https://www.cloudcompare.org/>

Adam Bielecki
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

Łódź, 18 października 2024

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy pt. *Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi*, Teledetekcja Środowiska, vol. 60, nr 1, 2019, s. 5-20, autorstwa: Artura Worm, Krzysztof Będkowski, Adam Bielecki

udział poszczególnych współautorów polegał na:

- **Artur Worm** (50%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, wizualizacje, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Krzysztof Będkowski** (30%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Adam Bielecki** (20%) - koncepcja pracy, metodyka, oprogramowanie, przygotowanie pierwszej wersji artykułu,

Artur Worm

...*Artur Worm*...
podpis

Krzysztof Będkowski

...*Krzysztof Będkowski*...
podpis

Adam Bielecki

...*Adam Bielecki*...
podpis

Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi

The use of surface and volume indicators from high resolution remote sensing data to assess the vegetation filling of urban quarters in Łódź city centre, Poland

Artur WORM

 Krzysztof BĘDKOWSKI

Adam BIELECKI

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast i Turyzmu, Zakład Geoinformacji
ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź
worm.artur@gmail.com
krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl
adam_biel@o2.pl

Streszczenie

We współczesnym świecie tereny miejskie są najszybciej rozwijającym się i najbardziej przekształcanym fragmentem powierzchni Ziemi. Miasta zajmują coraz większą powierzchnię, zaś w ich granicach wartość terenów dynamicznie wzrasta. Zarządzający miastami w Polsce, na potrzeby statystyk, sporządzają zestawienia wielkości powierzchni różnych kategorii terenów, uwzględniając także obszary zajęte przez parki, lasy miejskie czy zieleńce. W praktyce statystyki te mają za zadanie pokazać, przynajmniej częściowo, m.in. w jakim stopniu miasto jest „naturalne” i „zielone”. Jednak oficjalne dane dotyczące terenów zieleni nie przedstawiają rzeczywistej sytuacji, gdyż nie uwzględnia się w nich bardzo dobrze rozwiniętej roślinności towarzyszącej terenom spełniającym inne funkcje lub tej nie zarządzanej przez jednostki publiczne.

Artykuł przedstawia wyniki analiz mających na celu wyznaczenie rzeczywistej wielkości zasobów roślinności znajdującej się w ścisłym centrum Łodzi, bez względu na ich funkcje czy przeznaczenie. W pracy wykorzystano dane satelitarne oraz chmurę punktów LiDAR, dzięki czemu wyniki przedstawiają wartości niezależne od tych zawartych w oficjalnych bazach danych przestrzennych. W celu przedstawienia nierównomierności zasobów na analizowanym obszarze posłużono się podziałem miasta na kwartały ulic oraz na regularną siatkę kwadratów. Dodatkowo podzielono zieleń ze względu na dostępność, którą rozumiemy jako możliwość swobodnego wejścia na teren pokryty roślinnością i przebywania w nim. Wyróżniliśmy zieleń dostępną dla wszystkich mieszkańców (czyli taką, wśród której można przebywać bez żadnych dodatkowych obostrzeń, należy tu np. zieleń przyuliczna, parki, zieleńce) oraz o dostępie ograniczonym, tj. znajdującą się w podwórkach i innych terenach zamkniętych. Na potrzeby analiz wyliczono powierzchnię terenów pokrytych roślinnością oraz kubaturę roślinności. Wyniki analiz zestawiono na kartogramach. W analizowanym fragmencie miasta roślinność zajmuje 679681,6 m², co stanowi

17% powierzchni, a jej kubatura wynosi 5994219 m³. Na 1 mieszkańca przypada 17,46 m² powierzchni pokrytej roślinnością oraz 153,99 m³ przestrzeni zajętej przez roślinność. 45% powierzchni oraz 48% objętości roślinności można uznać za ogólnodostępną. Przestrzenne rozmieszczenie roślinności oraz mieszkańców jest bardzo nierównomierne, co powoduje dużą zmienność wartości wskaźników powierzchniowych i objętościowych, wyznaczonych zarówno w kwartałach miasta, jak i w regularnej siatce.

Abstract

In the modern world, urban areas are the fastest growing and most transformed fragment of the Earth's surface. Cities occupy a larger and larger area, while within their borders the value of land increases very dynamically. For the needs of statistics, city managers in Poland draw up coverage of areas, including areas occupied by city parks, urban forests and green areas. In practice these statistics are created to show, at least partly, among others, how much is the city "natural" and "green". Those values turn out to be underestimated, because they do not include very well developed vegetation accompanying other functions or that not managed by public entities. An important problem is also the availability of land covered by greenery for city residents.

The article presents the results of analyses consisting in determining the actual amount of greenery located in the very centre of Łódź. The article uses satellite data and LiDAR point cloud, thanks to which the results present values independent of those contained in official spatial databases. In order to present the unevenness of resources in the analysed area, the division into street quarters and also a regular grid of squares was used. In addition, the greenery was divided due to the availability, which we understand as the possibility of free entry to the area covered with vegetation and being in it. Urban vegetation was divided into available to all residents and limited access for immediate residents, i.e. located in courtyards and other enclosed areas. For the purposes of analysis, the area of vegetation covered and its cubature were calculated. The results of the analyses are compiled on cartograms. In the analysed fragment of the city, vegetation covers 679681.6 m², which is 17% of the area, and its volume reaches 5994219 m³. There is 17.46 m² of vegetation and 153.99 m³ of space occupied by vegetation per capita. 45% of the area and 48% of the vegetation volume can be considered generally available. The spatial distribution of vegetation and inhabitants is very uneven, which causes a large variation in the value of surface and volume indicators in both city quarters and in the regular grid.

Keywords: Urban green, inventory, remote sensing, LiDAR.

Słowa kluczowe: Zieleń miejska, roślinność, inwentaryzacja, teledetekcja, LiDAR.

Wprowadzenie

„Terenami zieleni”, według Ustawy o ochronie przyrody z 16 kwietnia 2004 roku, są „tereny wraz z infrastrukturą techniczną i budynkami funkcjonalnie z nimi związanymi, pokryte roślinnością, znajdujące się w granicach wsi o zwartej zabudowie lub miast, pełniące funkcje estetyczne, rekreacyjne, zdrowotne lub osłonowe, a w szczególności parki, zieleńce, promenady, bulwary, ogrody botaniczne, zoologiczne, jordanowskie i zabytkowe oraz cmentarze, a także zieleń towarzysząca ulicom, placom, zabytkowym fortyfikacjom, budynkom, składowiskom, lotniskom oraz obiektom kolejowym i przemysłowym” (Ustawa 2004).

Powyższa definicja nie obejmuje jednak wszystkich terenów pokrytych roślinnością w mieście. Istnieją bowiem obszary pokryte bujną roślinnością zintensyfikowane jako chociażby nieużytki czy też tereny poprzemysłowe, które w naturalny sposób pokryte zostały roślinami, które z czasem osiągnęły wysokość porównywalną do tej, która znajduje się np. w parkach czy zieleńcach.

Roślinność ma duże znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania miasta. Jako nierozłączny element krajobrazu znacznie wpływa na szereg czynników kształtujących najbliższe otoczenie (Szumacher 2011) oraz określających komfort życia mieszkańców (Bożętko 2008, Czekiel-Świtalska 2010, Łukasiewicz A., Łukasiewicz S. 2016).

Obecnie ponad połowa ludności Polski żyje w miastach, a prognozy wskazują na dalsze zwiększanie się udziału ludności miejskiej (Wysocki 2008). Niezwykle istotna jest więc kwestia obecności i funkcjonowania roślinności na obszarach zurbanizowanych. Jej wielkość i różnorodność bezpośrednio kształtują estetykę miast. Obecnym trendem w urbanistyce jest gęste rozmieszczanie skwerów, maksymalizacja udziału roślinności w przestrzeniach ulicznych, tworzenie ulic-ogrodów. Gęsta roślinność w pasach drogowych znacznie przyczynia się do redukcji hałasu. Dla mieszkańców miast istotne są jeszcze takie funkcje roślinności, jak: filtracja kurzu i zanieczyszczeń, osłona przed wiatrem, ocienianie (regulacja temperatury w kaniach ulic). Skupiska roślinności tworzą specyficzny mikroklimat o zwiększonej wilgotności, odpowiedni do rekreacji i wypoczynku. Obszary roślinności uporządkowanej, takie jak parki czy skwery, często wiążą się z obiektami towarzyszącymi – placami zabaw, placami sportowymi, fontannami. Obecność roślinności zwiększa atrakcyjność okolicy i podnosi komfort egzystencji w bezpośrednim sąsiedztwie. Bliskość terenów zieleni wymieniana jest jako jeden z najważniejszych czynników warunkujących pozytywną ocenę jakości życia w miejscu zamieszkania (Durecka 2017).

Według Niewiadomskiego (2013), Łódź ma jeden z największych w Polsce udziałów procentowych terenów zaliczanych do pokrytych zielenią w powierzchni

całkowitej miasta oraz ich powierzchni przypadającej na 1 mieszkańca. Niemal 50 m² ww. terenów zieleni przypadającej na 1 osobę jest wielkością imponującą, jednak nie uwzględnia faktycznej możliwości przebywania na terenach pokrytych roślinnością oraz ogranicza się do jej scharakteryzowania za pomocą tylko jednego wskaźnika – pola zajmowanej powierzchni. Dla mieszkańca miasta natomiast czym innym jest 30 m² terenu zajętego przez wysokie, dobrze rozwinięte drzewo, dające cień oraz wydatnie wpływające na estetykę okolicy, niż taka sama powierzchnia składająca się z niskich traw, łąk czy krzewów. Za niezbędne uważamy zatem opisywanie zasobów roślinności miejskiej z uwzględnieniem jej kubatury.

Motywacją do podjęcia badań była chęć poznania rzeczywistej wielkości i dostępności zieleni w warunkach centrum Łodzi, w ujęciu zarówno powierzchniowym, jak i objętościowym (wolumetrycznym), w przeliczeniu na jednostkę powierzchni oraz na jednego mieszkańca. Rozpoznanie zasobów zieleni wykonano z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych i fotogrametrycznych.

Tematyka inwentaryzacji zieleni miejskiej na podstawie danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego (ALS) i cyfrowych zdjęć lotniczych poruszana była wielokrotnie w opracowaniach naukowych. Kubalska i Preuss (2014) do wykonania inwentaryzacji zieleni we Wrocławiu zgromadzili oraz przetworzyli między innymi lotnicze zdjęcia cyfrowe (o rozdzielczości 10 cm) oraz dane lotniczego skanowania laserowego (gęstość 15 pkt m⁻²). Dane te wykorzystali do sporządzenia Numerycznego Modelu Terenu (NMT), Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT), znormalizowanego Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (zNMPT) oraz tzw. prawdziwej ortofotomapy (*true ortho*). Ostateczną klasyfikację otrzymali poprzez nałożenie filtra minimalnej wartości wskaźnika NDVI $\geq 0,1$ obliczonego z pikseli ortoobrazu w podczerwieni (tzw. CIR – Color InfraRed), a następnie zintegrowania wyników obszarów z odpowiadającymi im przestrzennie danymi wysokościowymi. Uzyskane wyniki umożliwiły klasyfikację zieleni miejskiej do trzech klas wysokości, co ma lepsze walory interpretacyjne niż opracowania ograniczające się jedynie do analizy jej powierzchni.

Podobne podejście przy klasyfikacji dwóch różnych typów obiektów miejskich – budynków oraz roślinności – przyjęli Grigillo i Kanjir (2012). Zastosowali cyfrowe zdjęcia lotnicze oraz dane skanowania laserowego, a także wytworzyli NMPT za pomocą danych ALS. Do uzyskania NMT wykorzystali wielospektralne obrazy fotogrametryczne. Drugim elementem było automatyczne wyodrębnienie roślinności za pomocą analizy obiektowej, którą wykonali na ortoobrazach z trzema kanałami spektralnymi – podczerwieni, czerwieni i zieleni, z dodanym czwartym kanałem – warstwą zNMPT. Starannie dobrane parametry segmentacji pozwoliły na wyodrębnienie za pomocą indeksu NDVI obiektów kwalifikowanych jako „roślinność widzialna” lub tereny „zacienione”. Następnie procedurę segmentacji powtórzono oddzielnie dla stref zacienionych, aby wyodrębnić ukrytą w nich roślinność. Złączone elementy roślinności miejskiej zostały dalej podzielone na roślinność wy-

soką oraz niską (powyżej i poniżej 1 m) na podstawie atrybutu wysokości odczytanego z zNMPT.

Myeong i in. (2001) również korzystali z cyfrowych zdjęć w podczerwieni o wysokiej rozdzielczości i wykonali podział przestrzeni miejskiej na drzewa i krzewy, trawniki, glebę bez pokrywy, wody oraz powierzchnie nieprzepuszczalne. Tutaj także wyzwaniem dla autorów były obszary zacienione, ale też duże podobieństwa spektralne pomiędzy wyodrębnianymi klasami. Dopiero wielokrotne próby dobierania i nakładania tekstur, masek i filtrów większościowych pozwoliły zwiększyć dokładność klasyfikacji.

Krukowski i in. (2016) oraz Krukowski (2018) zastosowali wysokorozdzielcze obrazy satelitarne IKONOS 2 o szczegółowości pozwalającej precyzyjnie przydzielać poszczególne piksele do klas pokrycia terenu. Zdecydowali wydzielić dwie klasy zieleni miejskiej: wysoką oraz niską. Pierwszym krokiem było przyjęcie progu NDVI $> 0,2$ do wyodrębnienia roślinności. Następnie określono pola treningowe dla dwóch wcześniej wymienionych klas i dokonano klasyfikacji nadzorowanej obszarów pokrytych przez roślinność. Biorąc pod uwagę zaobserwowane po terenowej weryfikacji wyników pól większe wartości wskaźnika dla roślinności wysokiej, autorzy zastosowali dodatkowy próg dyskryminujący wynoszący NDVI = 0,35. Otrzymane w ten sposób dwie klasy roślinności – wysokiej oraz niskiej – stanowiły finalny efekt podjętej kategoryzacji.

Oryginalną koncepcję wykorzystania NDVI do oceny dostępności roślinności w miastach przedstawili Będkowski i Bielecki (2017). Zastosowali ten wskaźnik jako miernik wielkości zasobów roślinności oraz określili, za pomocą krzywej koncentracji Lorenza, dostępność do nich dla mieszkańców Łodzi. Stwierdzili, że na skutek nierównomiernego rozmieszczenia ludności i roślinności, dostęp jest bardzo utrudniony, co wyraża się w tym, że niemal 80% mieszkańców ma w miejscach zamieszkania łącznie tylko ok. 25% zasobów roślinności miejskiej.

Autorzy prac dotyczących obszarów leśnych (Strzełiński i in. 2007, Stereńczak 2009), zgodnie zaznaczają, że o ile monitorowanie roślinności pod kątem pokrycia powierzchni czy ich stanu biofizycznego podejmowane jest na wiele różnych sposobów, o tyle zdalne badania procesów i charakterystyki drzewostanów ciągle stanowią wyzwanie. Sukcesywnie jednak techniki geomatyczne coraz częściej zastępują tradycyjnie stosowane metody naziemne. Pomiary za pomocą skaningu laserowego w leśnictwie wykorzystuje się m.in. w celu budowy Numerycznego Modelu Terenu (Będkowski 2004, Stereńczak i in. 2008), określania liczby drzew, wysokości drzew i drzewostanów (Stereńczak i in. 2008, Wężyk i in. 2010, 2016, Stereńczak 2013), objętości drewna (Straub i Koch 2011) czy szacowania wielkości biomasy (Kankare i in. 2013). Dokładność sporządzanych modeli i uzyskiwanych wyników uzależniona jest od gęstości punktów pomiarowych, a także zmienności wegetacyjnej roślin (Będkowski i in. 2010). Skanowanie lotnicze cechuje się również wysoką przydatnością do szacowania i opisywania procesów zachodzących w drzewostanach. Do obliczania wielu czynników, takich jak np. wielkość

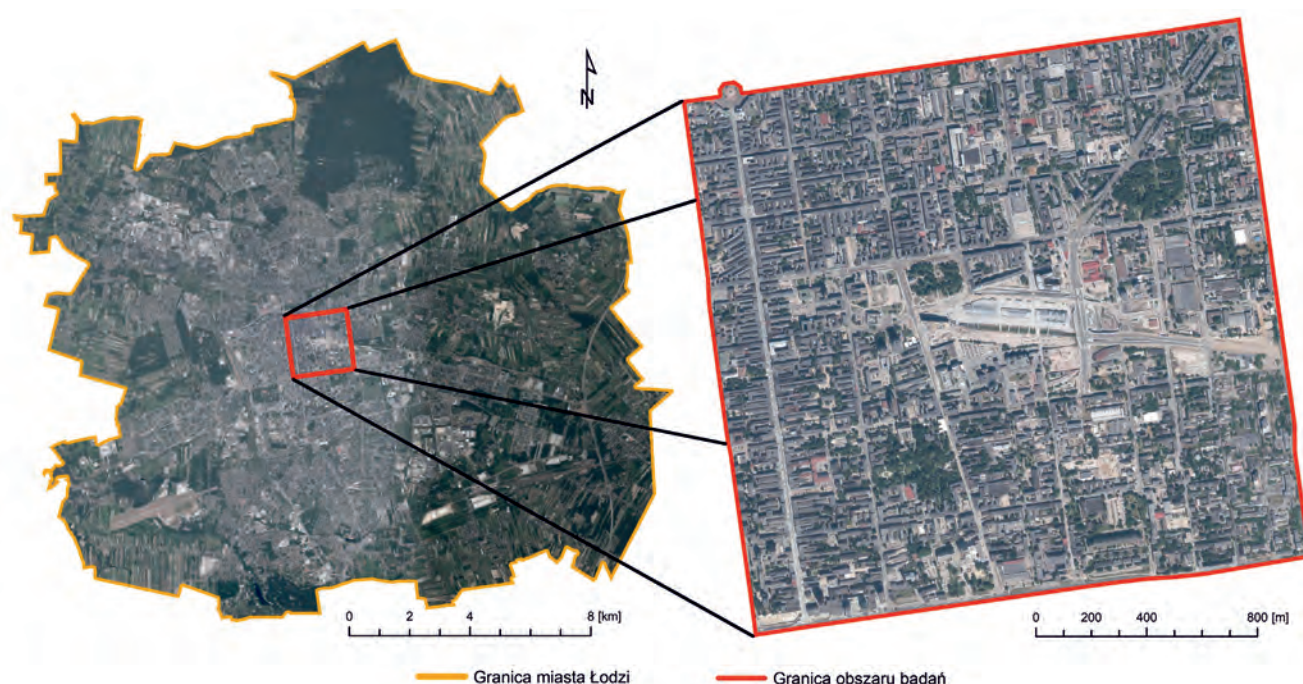
biomasy czy miąższość (objętość drewna), niezbędne są dane o średnicach pni. Fakt powiązań tego i wielu innych parametrów z wysokością drzew daje możliwość wykorzystania technik skanowania laserowego do ich szacowania. Pomiary wysokościowe terenów leśnych za pomocą skanowania laserowego cechują się błędami o podobnym charakterze i wielkości, jak błędy pomiarów wykonanych za pomocą tradycyjnych pomiarów fotogrametrycznych i skanowania naziemnego. Niekiedy pomiary parametrów drzewostanów mogą przebiegać równie skutecznie, a nawet przewyższać dokładność uzyskiwaną z bezpośrednich pomiarów terenowych. Na przykład Marmol i Będkowski (2008) wskazują, że dobre rezultaty określania wysokości pojedynczych drzew daje metoda polegająca na wyznaczeniu w NMPT zasięgu przestrzennego korony drzewa, a następnie przyjęciu maksymalnej wartości w jej obrębie za wysokość drzewa. Natomiast analizując także dokładność metody szacowania wysokości drzew jako różnicy modeli NMPT i NMT doszli do wniosku, że wartość bezwzględna zdecydowanej większości odchylek w porównaniu do rzeczywistego pomiaru terenowego w przypadku obu metod nie przekracza 0,5 m. W świetle przytoczonych wyników należy uznać metodę wyznaczania wysokości roślinności za pomocą modeli zNMPT za wystarczająco dokładną i odpowiednią dla potrzeb badań miejskich.

Materiały i metody

Obszar badań

Badania dotyczą fragmentu centrum Łodzi (ryc. 1), zbliżonego kształtem do kwadratu o boku około 2 km, ograniczonego placem Wolności oraz ulicami Legionów i Pomorską od północy, S. Kopcińskiego od wschodu, J. Piłsudskiego oraz A. Mickiewicza od południa, T. Kościuszki i Zachodnią od zachodu. Za granicę obszaru przyjęto środki pasów drogowych wyżej wymienionych ulic. Całkowita jego powierzchnia wynosi 4,00819 km², co stanowi niecałe 1,4% powierzchni miasta. Zakres czasowy badań to lata 2012–2015, z których pochodzą materiały źródłowe.

Czynnikiem decydującym o wyborze tego obszaru była jego różnorodność, położenie z dala od obrzeży miasta o niskim zaludnieniu, a jednocześnie charakterystyczne elementy tkanki miejskiej, takie jak: zwarta zabudowa wielorodzinna, tereny komunikacyjne, parki oraz obszary pokryte roślinnością nie ujęte w definicji znajdującej się w Ustawie o ochronie przyrody z 16 kwietnia 2004 roku. Przedmiotem analiz jest cała roślinność znajdująca się na wskazanym obszarze, w tym jej 3 większe skupiska: Park im. Stanisława Staszica w północno-wschodniej części, Park im. Stanisława Moniuszki w centrum obszaru oraz Park im. Henryka Sienkiewicza na południowym zachodzie.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań w przestrzeni Łodzi na tle ortofotomapy (źródło danych: WODGiK, Łódź)

Fig. 1. Location of study area in Łódź, background – a RGB orthophotomapy (data source: WODGiK, Łódź)

Dane źródłowe i ich charakterystyka

W badaniach wykorzystano następujące dane:

- ortofotomapy w kompozycjach RGB i CIR,
- zNMPT obliczony na podstawie wyników lotniczego skanowania laserowego,

- wektorowe warstwy dróg oraz pozostałych ciągów komunikacyjnych,
- informacje o rozmieszczeniu ludności.

Ortofotomapy o kodzie „M-34-3-D-b-4” (z 2015 r.) uzyskano z zasobów Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Łodzi. Do badań

roślinności niezbędne było uzyskanie, obok arkusza w barwach naturalnych – RGB, drugiego arkusza ortofotomapy w kompozycji barwnej w podczerwieni – CIR. Powyższe materiały cechują się dobrą szczegółowością o rozdzielczości terenowej wynoszącej 0,25 m. Informacje o ukształtowaniu powierzchni topograficznej w formie danych numerycznych uzyskano z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK). Z tego samego zasobu uzyskano chmurę punktów lotniczego skanowania laserowego (ALS) o gęstości 12 punktów m^{-2} . Dane te wytworzono na potrzeby państwowego projektu pod nazwą „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami – ISOK”. Aktualność materiałów dla obszaru badań to rok 2012. Warstwę dróg oraz pozostałych ciągów komunikacyjnych pobrano z serwisu Open Street Map. Aktualność tych danych wskazuje na rok 2018, więc konieczna była ich wizualna analiza z pomocą posiadanej ortofotomapy w barwach naturalnych, a także korekta w celu ujednolicenia materiałów. Warstwę tą wykorzystano do kategoryzacji zieleni na ogólnodostępną (tą bez ograniczeń, jeśli chodzi o możliwość przebywania na obszarze zajęтым przez nią) i niedostępną.

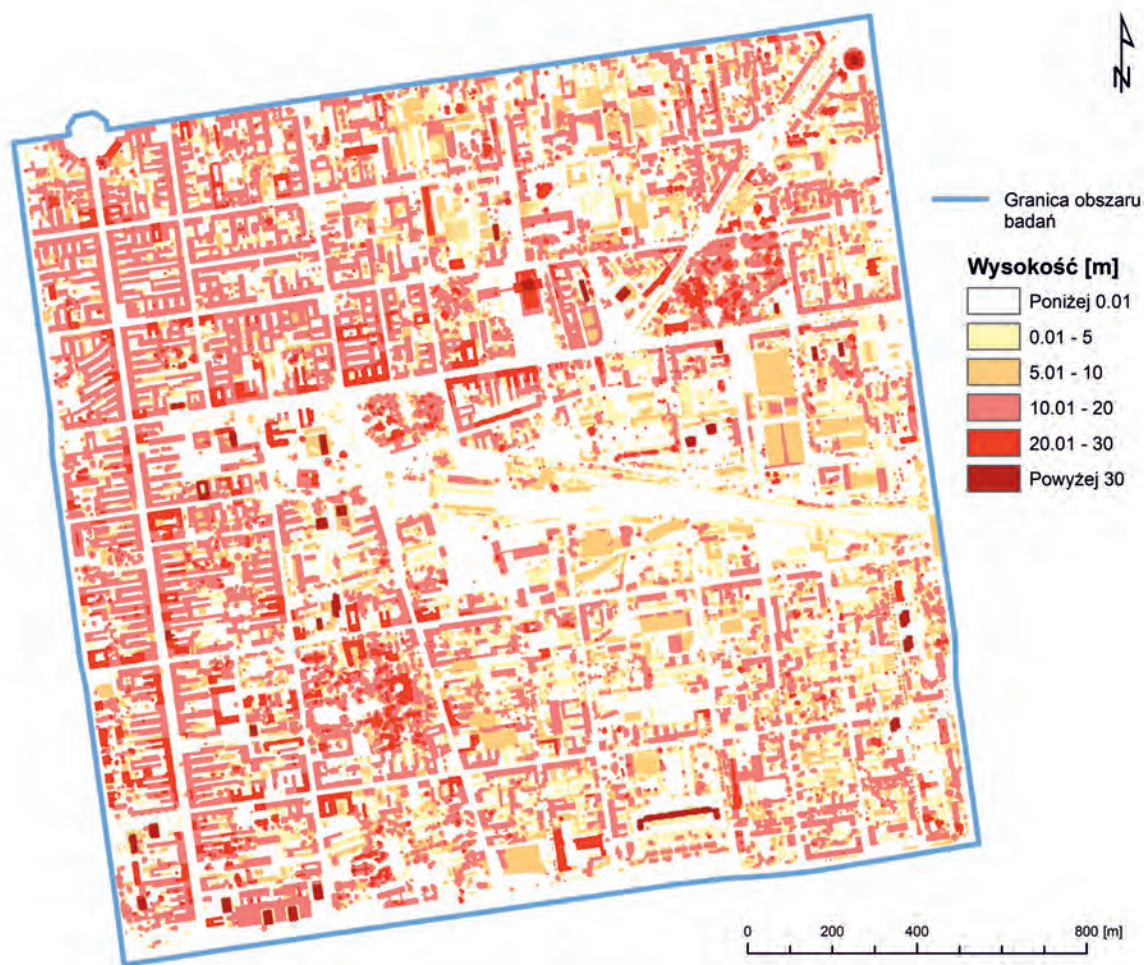
Przypisania liczby mieszkańców do budynków mieszkalnych analizowanego terenu dokonano poprzez zin-

tegrowanie liczby mieszkańców na podstawie rejestru wyborców na poszczególnych osiedlach (UMŁ 2016) z przeliczonymi całkowitymi powierzchniami obiektów mieszkalnych w tych regionach (uwzględniając liczbę kondygnacji). Informacje przestrzenne o budynkach pochodzą z Ewidencji Gruntów i Budynków.

Metody przetwarzania danych

Obszary, na których występuje roślinność wyznaczono na podstawie posiadanej ortofotomapy w kompozycji CIR. Do tego celu użyto popularnego indeksu spektralnego NDVI (Rouse i in. 1973). Wynikowy raster został przeklasyfikowany w ten sposób, że piksele które przyjmowały wartość NDVI równą bądź większą od 0,1, sklasyfikowano jako tereny pokryte roślinnością. Przyjęto minimalną powierzchnię obiektu równą 1 m^2 w celu eliminacji błędnie rozpoznanych oraz nieznaczących obiektów.

Wysokość, a następnie objętość wyodrębnionych terenów pokrytych roślinnością wyznaczono na podstawie zNMPT, będącego różnicą NMPT oraz NMT, o pikselach wielkości 1 × 1 m (ryc. 2). Operacja ta pozwoliła uzyskać faktyczne wysokości obiektów znajdujących się na opracowywanym obszarze.



Ryc. 2. Znormalizowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (zNMPT) dla badanego terenu

Fig. 2. Normalized Digital Surface Model (nDSM) of analyzed location

Otrzymane dane skorelowano następnie z rozmieszczeniem roślinności wyodrębnionej w poprzednich krokach. W rezultacie uzyskano rastrową warstwę reprezentującą wyłącznie obszary pokryte roślinnością oraz posiadającą atrybut wysokości. W dalszym etapie dokonano reklasyfikacji rastra do trzech klas wysokości roślinności:

- **niska** ($h \leq 0,4$ m)
- **średniowysoka** ($0,4 < h \leq 2$ m)
- **wysoka** ($h > 2$ m)

Zdecydowano także o podzieleniu roślinności na ogólnodostępną dla każdego mieszkańca oraz niedostępną, zamkniętą. Dla mieszkańców znaczenie ma bowiem, czy znajdujące się w niewielkiej odległości tereny pokryte roślinnością mają charakter publiczny (parki, skwery) oraz wpływają na estetykę otoczenia, czy też są to obszary w jakimś stopniu niedostępne, jak na przykład nasadzenia na prywatnych posesjach lub drzewa w zamkniętych podwórzach kamienic.

Kategorię roślinności dostępnej stanowią wszystkie przestrzenie publiczne zawierające roślinność, takie jak parki, skwery, pasaże i tzw. zieleńce. Każdy z obszarów

był ręcznie digitalizowany na podstawie ortofotomapy w barwach naturalnych oraz posiadanych informacji o terenie. Należy tu także roślinność znajdująca się w bezpośredniej okolicy ulic, chodników oraz pozostałych ciągów komunikacyjnych. Bazą do wyznaczenia takich stref była warstwa dróg pochodząca z serwisu Open Street Map. Na podstawie ortofotomapy RGB, aktualnej na rok 2015, dokonano sprawdzenia oraz korekty układu i przebiegu ulic. Usunięto także odcinki dróg sklasyfikowane jako *proposed* – proponowane, *service* – serwisowe oraz *cycleway* – rowerowe. Od tak przygotowanej warstwy liniowej wytyczono bufor o wartości promienia 20 m (ryc. 3). Przyjęto, że przestrzenie o zadanych parametrach obejmują zdecydowaną większość roślinności ulicznej i innej w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków codziennego poruszania się ludności miejskiej na badanym obszarze. Roślinność w obrębie takich stref stanowi nierozłączną część codziennego życia mieszkańców i uzasadnione jest, by uznać powyższe obszary jako publiczne. W ostatnim kroku dokonano podziału całej rozpoznanej roślinności na ogólnodostępną oraz niedostępną.

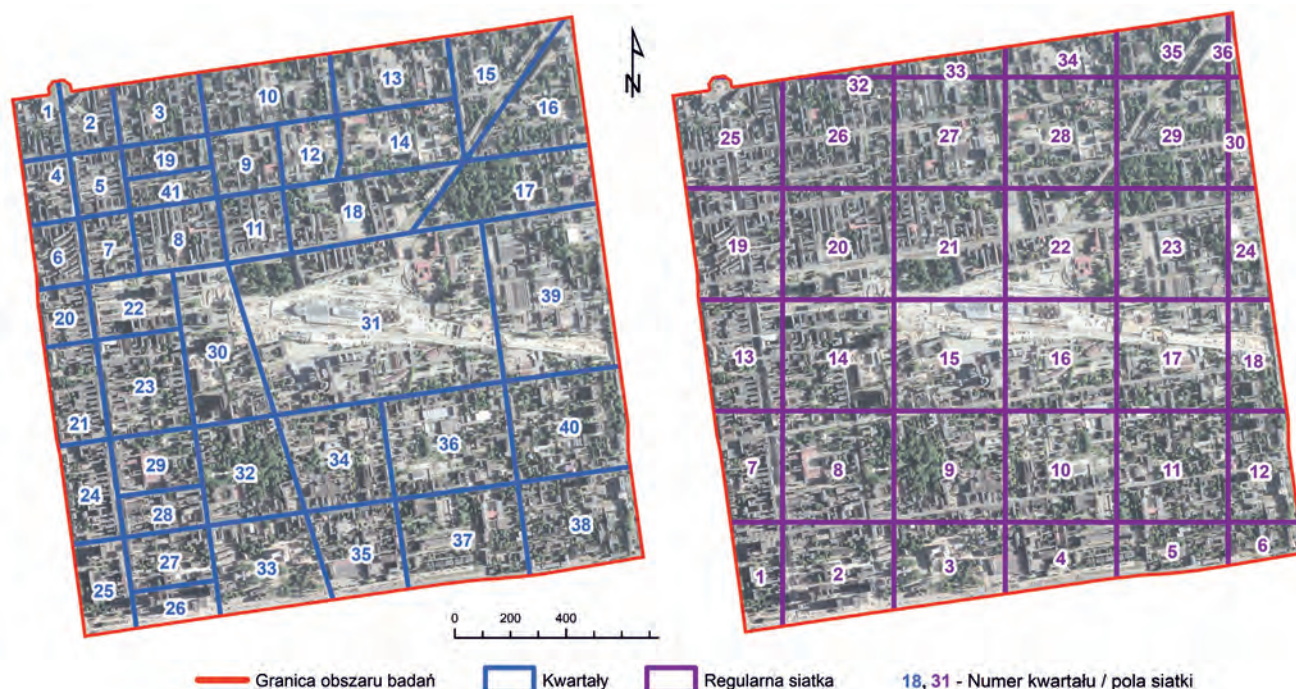


Ryc. 3. Sieć dróg oraz strefa terenów zidentyfikowanych jako roślinność dostępna

Fig. 3. Road net and zones identified as accessible green areas

W celu przedstawienia zmienności rozmieszczenia zieleni miejskiej, zdecydowano o podzieleniu obszaru na mniejsze jednostki powierzchniowe, z wykorzystaniem dwóch odmiennych metod fragmentacji terenu. Pierwsza z nich to wydzielenie 41 kwartałów ulic. Jest to podejście niemal naturalne, zgodne z tkanką miejską i układem przestrzennym zabudowy. Kwartały wyznaczone zostały od podstaw według przebiegu ulic, na

podstawie nieznacznie zmodyfikowanego podziału, jaki przyjął Lamprecht (2017). Jednostki te znacząco różnią się od siebie powierzchnią, kształtem oraz „treścią” (ryc. 4). Zdecydowaną większość pól łączy jednak to, że każde z nich obejmuje w swoich granicach zarówno zabudowę, jak i większe bądź mniejsze obszary zajęte przez roślinność.



Ryc. 4. Dwie metody podziału obszaru badań – wg kwartałów oraz regularnej siatki

Fig. 4. Study area divided by using city quarters and schematic partitioning

Drugi sposób polega na podziale obszaru badań regularną siatką składającą się domyślnie z kwadratów o boku 400 metrów, którą następnie przycięto do zasięgu obszaru badań. Zawiera 36 jednostek odniesienia. Tak przygotowane dwie opcje podziału obszaru wykorzystano do przedstawienia rozkładu przestrzennego i wielkości różnych parametrów roślinności.

Dane dotyczące liczby ludności zamieszkującej obiekty mieszkalne wykorzystano do obliczenia liczby mieszkańców w polach zgodnie ze stworzonym podziałem na kwartały oraz siatkę. W przypadku podziału zgodnego z układem ulic, granice wydzielonych fragmentów terenu nie przecinają budynków, więc liczba mieszkańców pojedynczego pola odniesienia stanowi sumę ludności w obiektach znajdujących się w jego obrębie. Inaczej jest w wypadku podziału za pomocą regularnej siatki (ryc. 5). Wiele z budynków zostało podzielonych na dwie lub więcej części. W takiej sytuacji postanowiono obliczyć współczynnik wyrażający stosunek powierzchni przeciętych obiektów do oryginalnej powierzchni budynków. Następnie otrzymaną wartość pomnożono przez pierwotną liczbę mieszkańców. Tak przygotowane dane ludnościowe przeliczono do pól podstawowych obydwu wariantów podziału. W rezultacie otrzymano zaludnienie agregowane do większych jednostek przestrzennych, które można interpretować wraz z obliczonymi parametrami roślinności.

Do obliczenia wartości parametrów dotyczących powierzchni i objętości roślinności wykorzystano dwa rodzaje danych: poligony oraz rastry zawierające dane wysokościowe. W pierwszym etapie policzono powierzchnię roślinności w poszczególnych kwartałach i polach

siatki za pomocą wcześniej wykorzystanej metody. Drugim krokiem było obliczenie objętości roślinności w tych samych jednostkach odniesienia.

Analogiczne procesy zastosowano do wyliczenia, w oczkach jednostek odniesienia, powierzchni i objętości: roślinności wysokiej (powyżej 2 metrów), roślinności ogólnodostępnej ogółem oraz roślinności ogólnodostępnej wysokiej. Otrzymane wielkości przeliczono na jednostkę powierzchni, a także na 1 mieszkańca.



Ryc. 5. Rozkład przestrzenny budynków mieszkalnych

Fig. 5. Spatial distribution of residential buildings

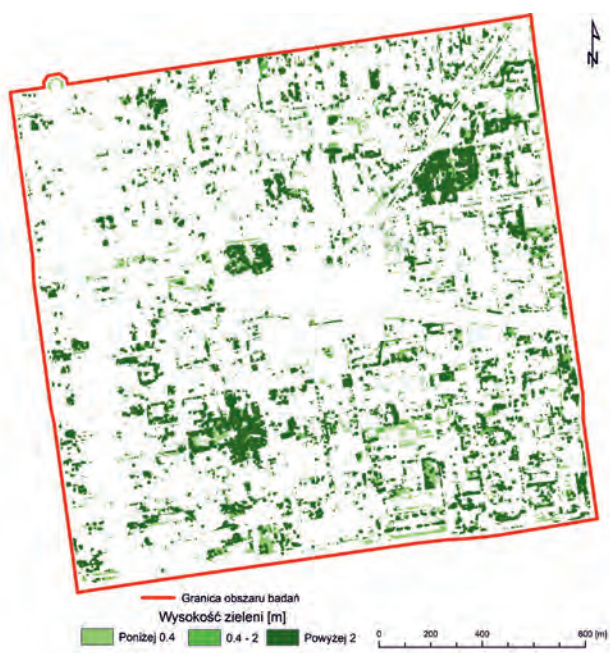
Wyniki

Obszary rozpoznane jako pokryte roślinnością

Roślinność jest rozmieszczona na analizowanym fragmencie miasta nierównomiernie (ryc. 6). W samym centrum obszaru znajduje się duży obszar pozbawiony roślinności, którym jest teren największego łódzkiego dworca kolejowego Łódź Fabryczna. Mało roślinności spotkać można także na podłużnym pasie obok zachodniego krańca terenu. Jest to reprezentacyjna ulica Piotrkowska oraz tereny i podwórza do niej przyległe. Kontrast widoczny jest we wschodniej części, a szczególnie w południowo-wschodniej ćwiartce obszaru. Ten fragment miasta cechuje się dużym udziałem roślinności ulicznej oraz innej. Trzy większe skupiska koloru zielonego na mapie, dość wyraźnie odznaczające się na badanym obszarze, to wspomniane wcześniej parki miejskie. Na analizowanym fragmencie roślinność rozmieszczona jest nierównomiernie, a w niektórych miejscach łatwo zauważyć znaczne braki na ulicach i pozostałych ciągach komunikacyjnych.

Klasyfikacja roślinności według wysokości

Podział roślinności na 3 klasy wysokościowe pozwala określić charakter obszaru, na którym się znajduje (ryc. 6). W miejscach występowania parków na mapie dostrzec można zdecydowaną przewagę obszarów gęsto zadrzewionych. Najmniej widoczne są rejony pokryte krzewami. Roślinność o wysokości poniżej 0,4 m rozproszona jest na całym obszarze. Stanowi ona między innymi główny składnik zieleńców miejskich oraz terenów wśród pasów drogowych.



Ryc. 6. Roślinność obszaru badań z podziałem na klasy wysokości

Fig. 6. Green areas with regard to height classes

Klasyfikacja roślinności według dostępności¹ dla mieszkańców

Mapa dostępności zieleni miejskiej przedstawia poglądowo, jaka jej część jest otwarta i dostępna dla mieszkańców danego fragmentu miasta (ryc. 7). Widoczny jest wyraźny podział znaczenia poszczególnych, nawet dosyć dużych terenów pokrytych roślinnością.



Ryc. 7. Zieleni obszaru badań z podziałem według dostępności
Fig. 7. Green areas with regard to accessibility

Obszary w południowo-wschodniej oraz wschodniej części badanego fragmentu miasta cechują się stosunkowo dużą powierzchnią zieleni niedostępnej. Oznacza to, że duża ilość roślinności „ukryta” jest wewnątrz przyulicznych zabudowań. Podobnie jest w przypadku zachodniego krańca obszaru. Większość z tych i tak małych zasobów roślinności znajduje się na terenach zamkniętych – w podwórzach kamienic.

Poprzez połączenie map obszarów roślinności ogólnodostępnej i tej o wysokości powyżej 2 metrów uzyskano informację o rozmieszczeniu terenów zieleni najbardziej pożądanym przez mieszkańców w przestrzeni miejskiej (ryc. 8). Roślinność wysoka bowiem pozytywnie wpływa na jakość powietrza poprzez filtrację spalin, zmniejsza także natężenie hałasu oraz rzuca cień, przez co reguluje temperaturę okolicy.

Wyróżniają się trzy obiekty parkowe z rozwiniętym drzewostanem, ale także regularna struktura przydrożnych drzew w północno-wschodnich oraz południowo-wschodnich fragmentach obszaru badań (ryc. 8). Północno-zachodnią część terenu cechuje się natomiast wyjątkowo skromnym udziałem zieleni ogólnodostępnej wysokiej.

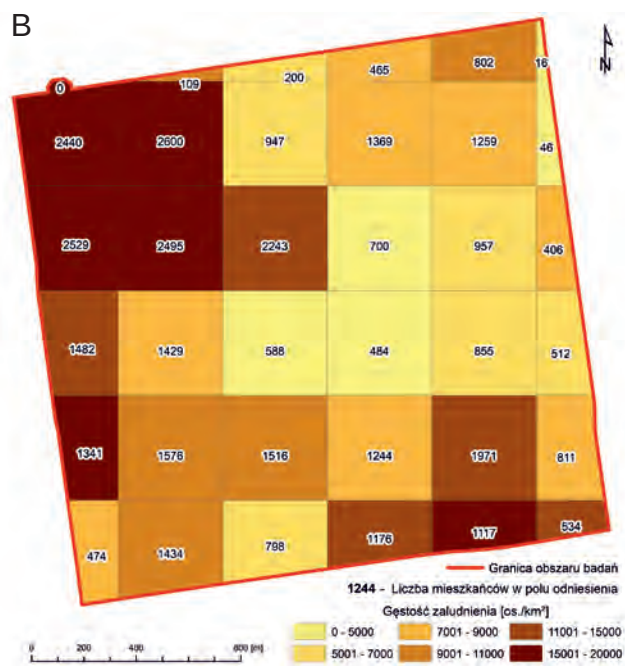
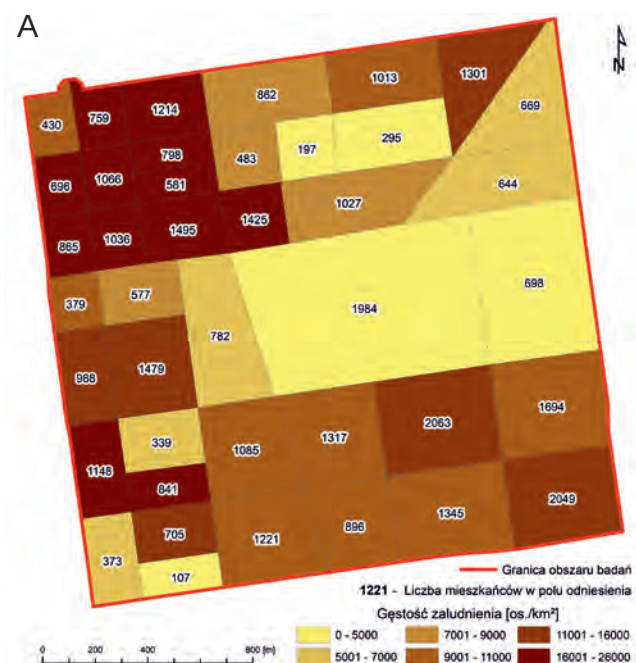
¹ Pojęcie dostępności roślinności, w znaczeniu przyjętym w niniejszym artykule, zdefiniowano we wstępie.



Ryc. 8. Zieleń ogólnodostępna wysoka
Fig. 8. Free accessible green areas

Zaludnienie obszaru badań

Według zastosowanej metodologii stwierdzono, że obszar badań zamieszkuje 38 925 osób. Najwyższą gęstość zaludnienia zaobserwować można w północno-zachodnim narożniku analizowanego fragmentu miasta (ryc. 9ab). Są to tereny położone w niewielkiej odległości od Placu Wolności i początku ulicy Piotrkowskiej. Inną strefą o większym zagęszczeniu ludności jest południowo-wschodni obszar.



Ryc. 9. Gęstość zaludnienia obszaru badań – w kwartałach (A) i regularnej siatce (B)

Fig. 9. Population density [no of inhabitants km^{-2}] in city quarters (A) and schematic units (B)

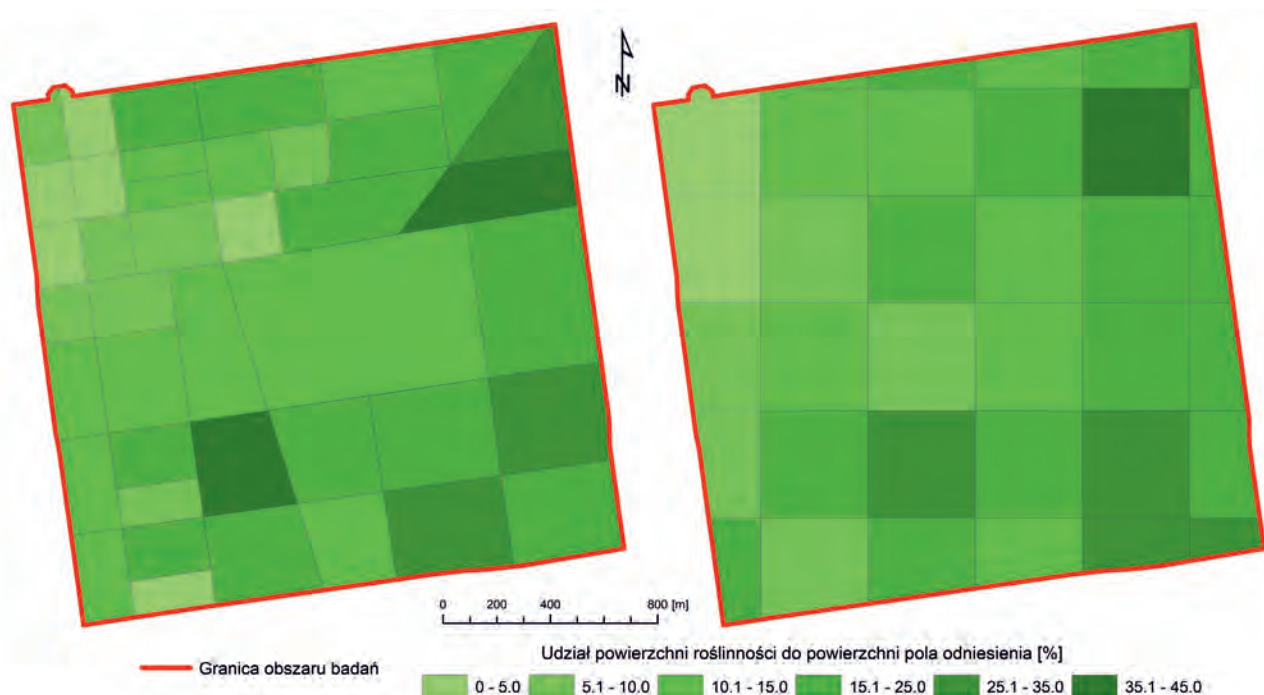
Najmniej zaludnione są pola w centrum badanego obszaru. Zamieszkuje je tylko od 484 do 700 osób. Wynika to z lokalizacji w tym fragmencie terenu budynków niemieszkalnych – dworca kolejowego Łódź Fabryczna oraz związanej z nim infrastruktury. W części północno-wschodniej, a także południowo-zachodniej zaobserwować można natomiast średnie wartości gęstości zaludnienia.

Zróznicowanie przestrzenne zieleni miejskiej (ujęcie powierzchniowe)

Na ryc. 10 przedstawiono udział [%] powierzchni rozpoznanej jako pokryta roślinnością w powierzchni pola odniesienia.

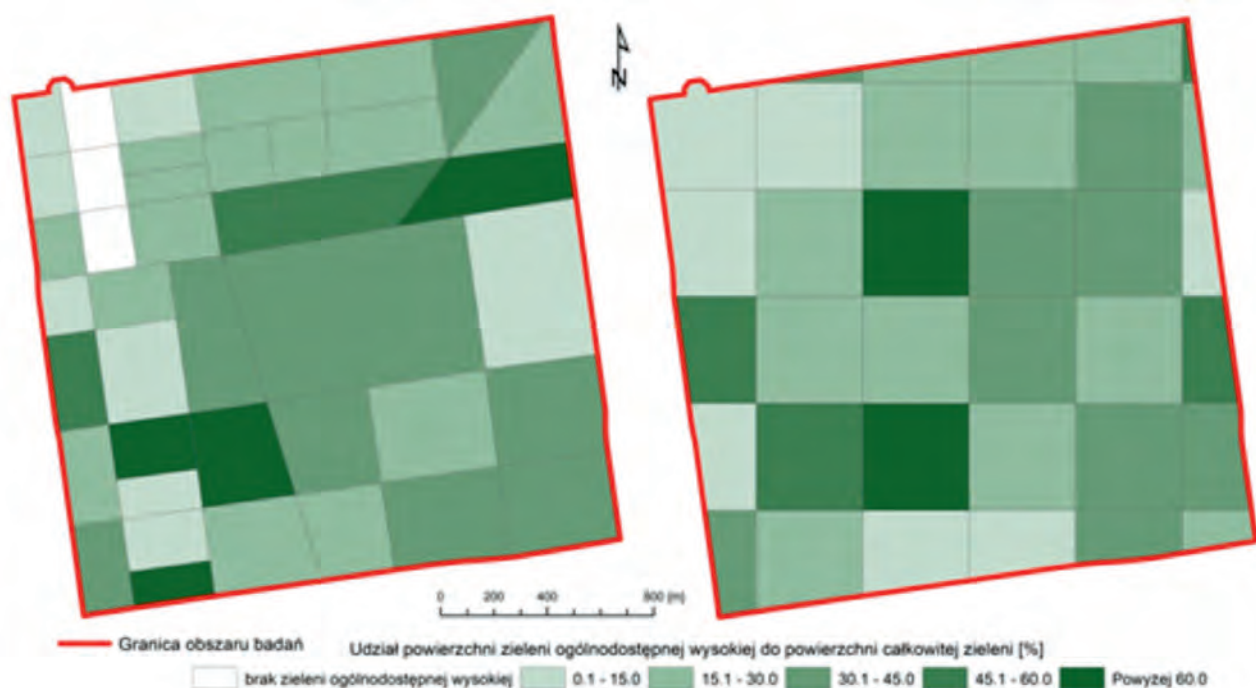
Udział roślinności ukazano za pomocą kartogramu skokowego przyjmującego różne odcienie barwy zielonej. Najciemniejszy kolor reprezentuje udział powierzchni pokrywy roślinnej osiągającej wartości od 35,1 do 45% w polu podstawowym. Zarówno w przypadku podziału na kwartały, jak i siatkę, najwyższe wartości wskaźnika można dostrzec w północno-wschodniej części obszaru. Pola te objęły zasięgiem znajdujący się w tym rejonie park. Pozostałe jednostki z wysokimi wartościami udziału procentowego rozmieszczone są między innymi we wschodnich oraz południowych fragmentach terenu. W obu wariantach pola cechujące się najniższym wskaźnikiem znajdują się w północno-zachodnim krańcu analizowanego obszaru.

Sporządzono także, z wykorzystaniem wcześniej stosowanych metod, mapy przedstawiające udział powierzchni roślinności ogólnodostępnej wysokiej w całkowitej powierzchni zajętej przez roślinność rozpoznaną na analizowanym obszarze (ryc. 11).



Ryc. 10. Udział powierzchni pokrytej roślinnością w powierzchni pola odniesienia – w kwartałach i regularnej siatce

Fig. 10. Share of areas covered by urban green – in city quarters and schematic units



Ryc. 11. Udział powierzchni zajętej przez zielen ogólnodostępną wysoką w całkowitej powierzchni pokrytej przez roślinność – w kwartałach i regularnej siatce

Fig. 11. Share [%] of free accessible greenery area within areas recognized as green-covered – in city quarters and schematic units

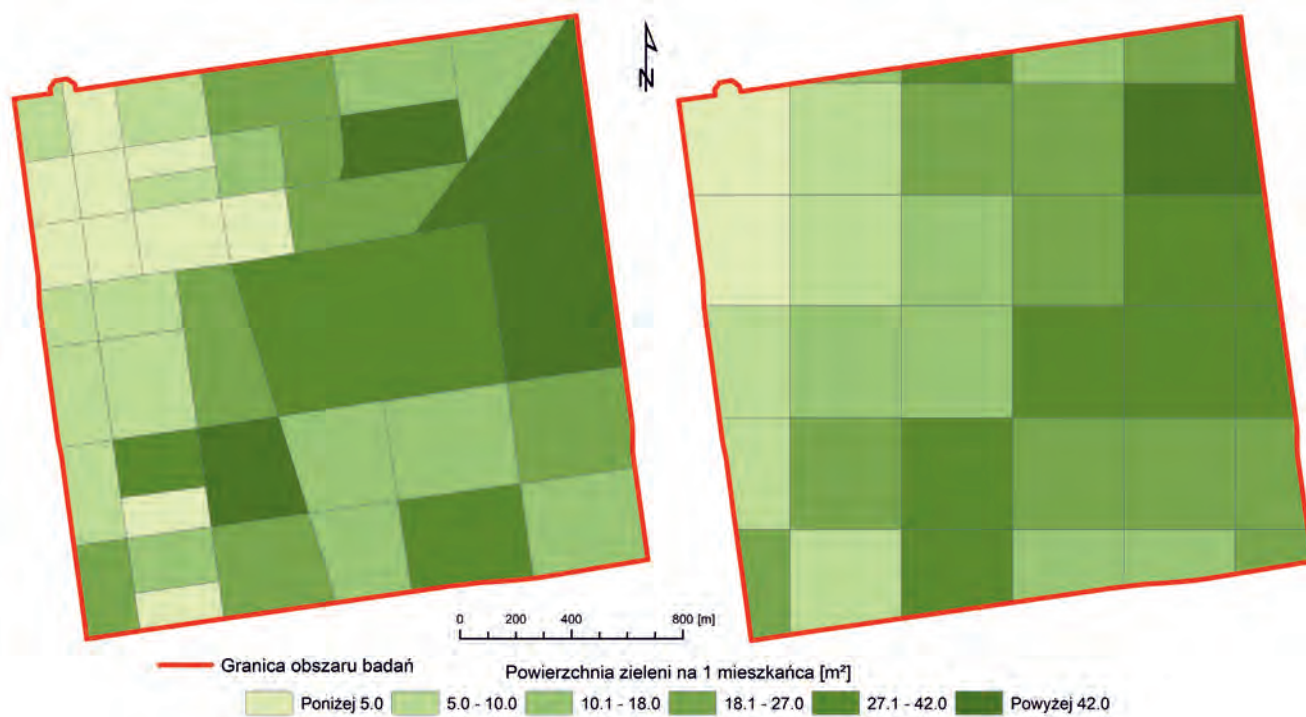
Na mapie z podziałem na kwartały widoczne są trzy pola odniesienia, wyróżniające się brakiem badanej roślinności ogólnodostępnej wysokiej w północno-zachodnim narożniku obszaru. Wartości najwyższe – powyżej 45 i 60% występują w kwartałach w części południowo-

-zachodniej oraz centralnej. Graniczą one z największym kwartałem analizowanego terenu, zawierającym obszar Nowego Centrum Łodzi. W przypadku podziału siatki, jednostki podziału reprezentujące wysoki udział procentowy znajdują się głównie w środkowo-zachod-

nim fragmencie terenu. Maksymalnie odnotowano udział na poziomie 72,7%.

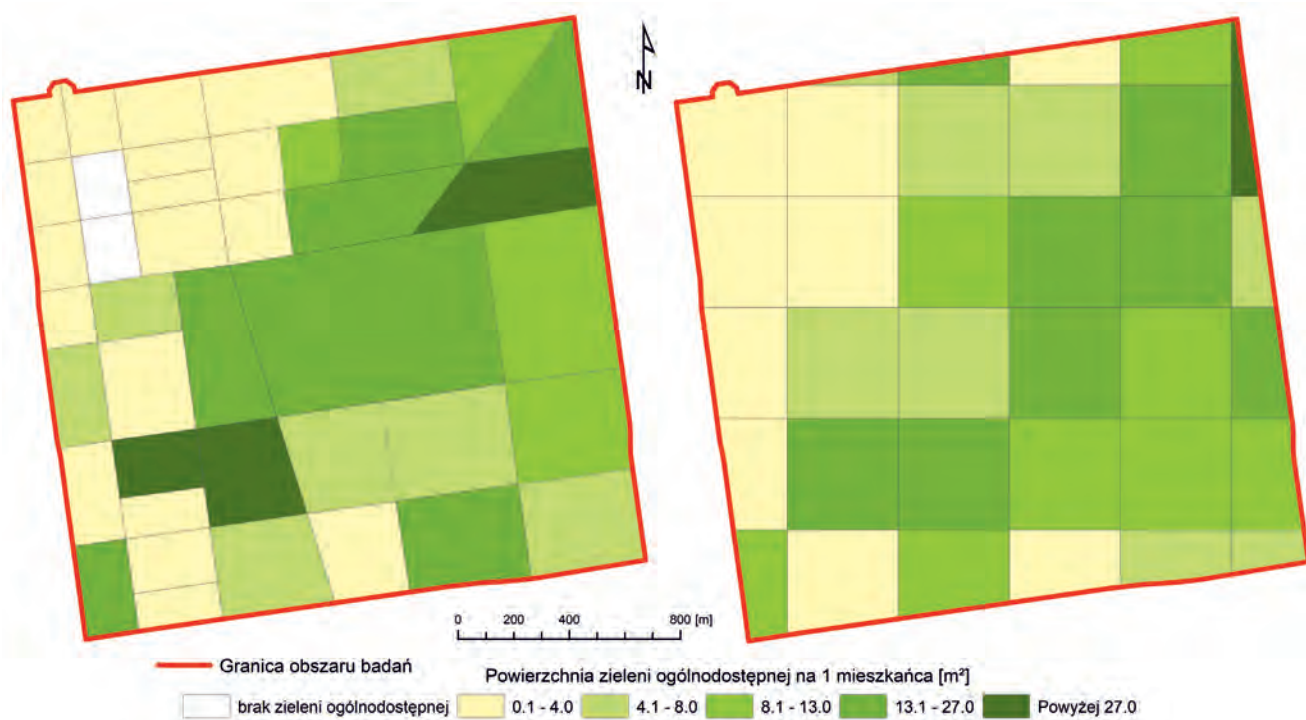
Na ryc. 12–14 przedstawiono zmienność przestrzenną parametrów charakteryzujących pokrycie terenu przez roślinność w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Zwraca

uwagę kierunkowy (ze wschodu na zachód) spadek wskaźników, co wyraźnie wynika z kierunkowego układu przestrzennego zarówno gęstości zaludnienia (ryc. 9), jak i pokrycia terenu roślinnością (ryc. 10).



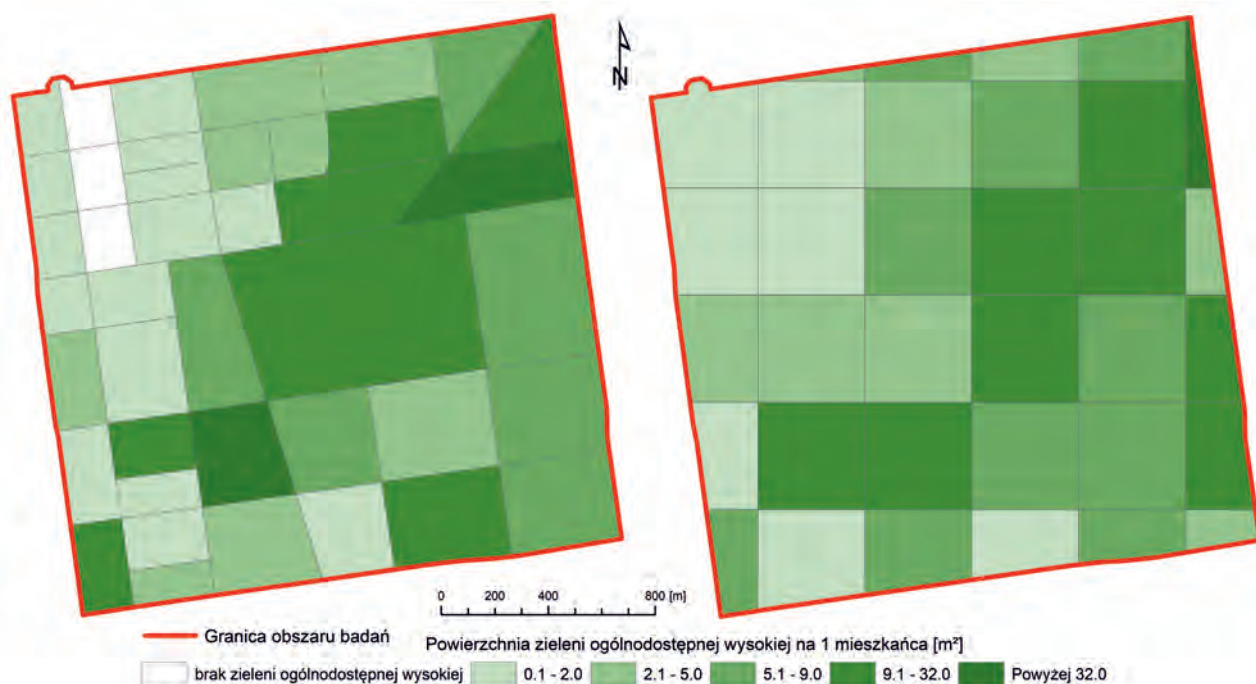
Ryc. 12. Pokrycie terenu roślinnością w przeliczeniu na jednego mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce

Fig. 12. Urban green coverage [m^2 per capita] – in city quarters and schematic units



Ryc. 13. Powierzchnia zieleni ogólnodostępnej w przeliczeniu na jednego mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce

Fig. 13. Free accessible urban green coverage [m^2 per capita] – in natural and schematic units

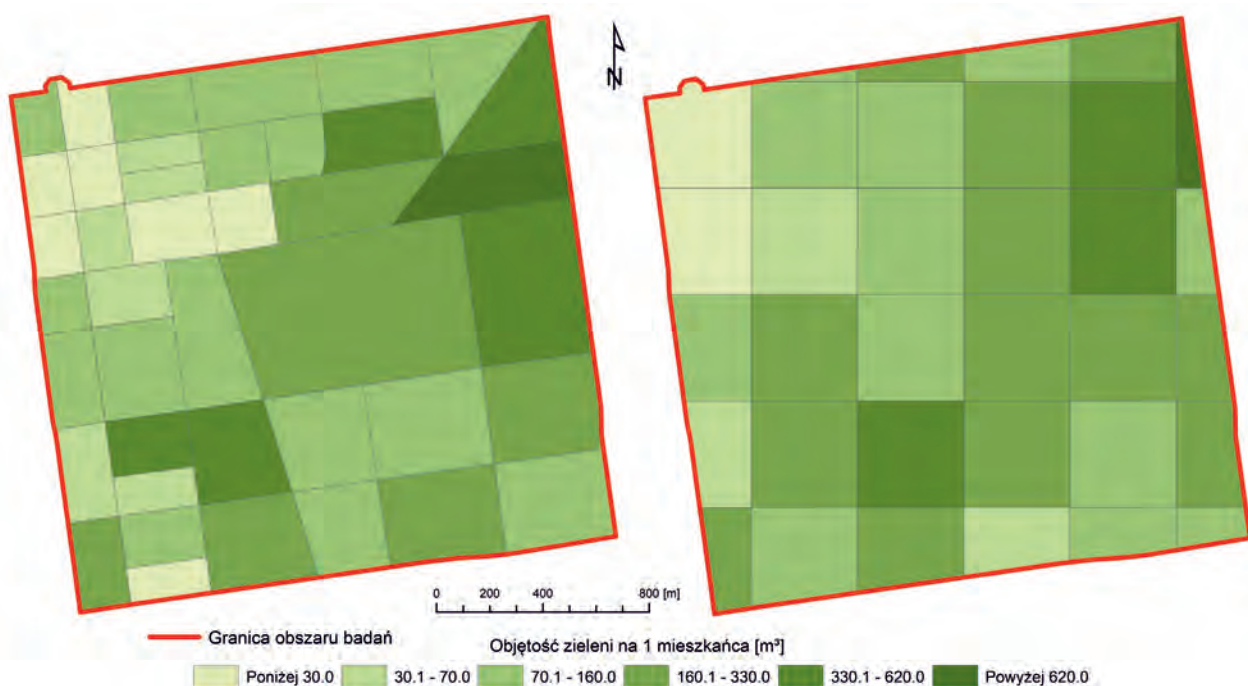


Ryc. 14. Powierzchnia zieleni ogólnodostępnej wysokiej w przeliczeniu na jednego mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce
 Fig. 14. Free accessible high (>2 m) urban green coverage [m^2 per capita] – in city quarters and schematic units

Zróźnicowanie przestrzenne zieleni miejskiej (ujęcie wolumetryczne)

Wszystkie formy zieleni spełniają istotne role w kształtowaniu przyjaznej dla mieszkańców przestrzeni miejskiej, jednak największe znaczenie ma roślinność wysoka. Dużo o roślinności mówią już wyniki pomiaru wysokości drzew i krzewów, jednak najlepszą możliwość

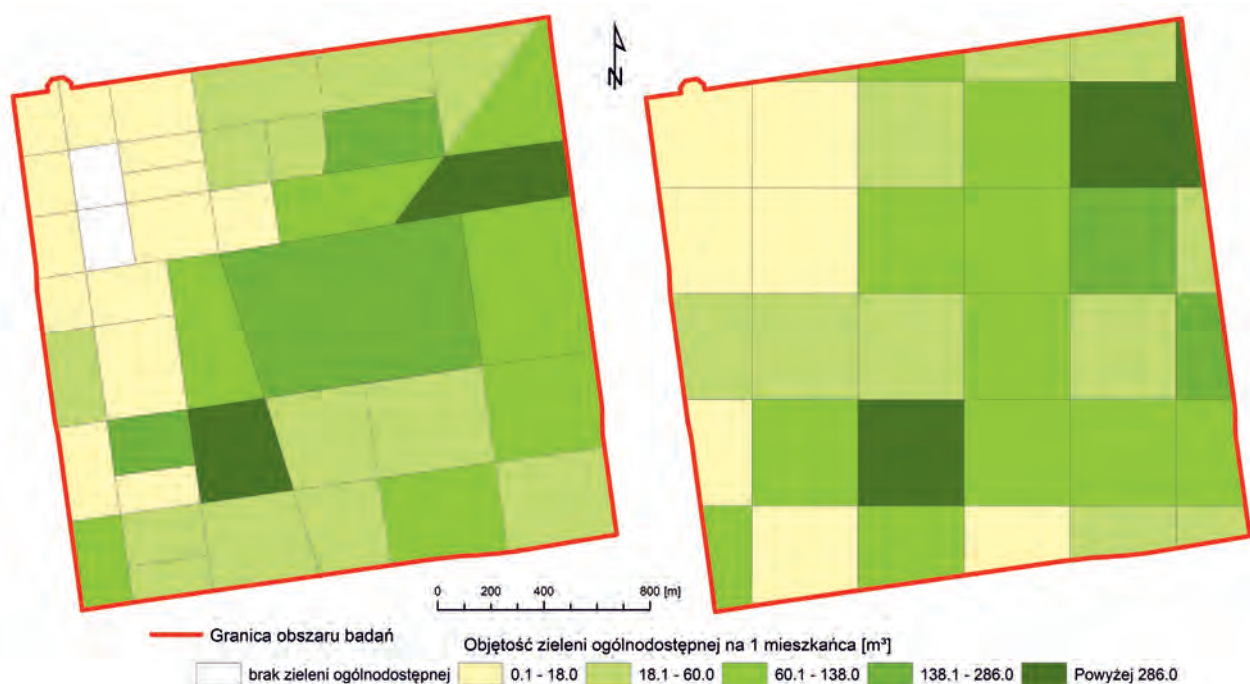
uwzględnienia trzeciego wymiaru roślinności uzyskuje się poprzez wyznaczenie jej objętości, a ściślej łącznej objętości przestrzeni zajętej przez roślinność oraz bezpośrednio pod nią. Na ryc. 15–17 przedstawiono zmienność przestrzenną objętości roślinności w przeliczeniu na 1 mieszkańca, z uwzględnieniem wysokości oraz możliwości przebywania na tych terenach dla wszystkich mieszkańców.



Ryc. 15. Objętość zieleni w przeliczeniu na 1 mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce
 Fig. 15. Volume of greenery [m^3 per capita] – in city quarters and schematic units

Mapy przedstawione na ryc. 15 wykonano z sześcioma przedziałami wskaźnika objętości. Wyznaczono je za pomocą metody przedziałów naturalnych (Pieniążek i Zych 2017) odpowiednio uśrednionej dla obu wariantów podziału terenu. Ponownie wyróżnia się tutaj północno-zachodni fragment obszaru, cechujący się w obu przypadkach polami podstawowymi z wartościami poniżej 30 m³ roślinności przypadającej na 1 mieszkańca. Największe wskazania parametru objętości odnotować można w wybranych jednostkach odniesienia w północno-wschodnich oraz południowo-zachodnich częściach terenu. Maksymalna odnotowana wartość kubatury w pojedynczym polu odniesienia wynosi 1043,9 m³ na jednego mieszkańca.

Następne mapy dotyczą zieleni ogólnodostępnej. Obliczono objętość roślinności przypadającą na 1 mieszkańca dla każdego pojedynczego pola podstawowego (ryc. 16). Można zauważyć pojawienie się jednostek odniesienia nieposiadających roślinności ogólnodostępnej. Do ich oznaczenia użyto koloru białego. Pozostałe 5 przedziałów objętości wyznaczono za pomocą metody przedziałów naturalnych uśrednionych do wartości w kwartałach i siatce. Do ich reprezentacji wykorzystano barwy od jasnej żółtej, symbolizującej wyjątkowo mały zasób roślinności ogólnodostępnej w jednostce odniesienia, aż do jasnych i ciemnych odcieni barwy zielonej, dla największych wartości zasobów.



Ryc. 16. Objętość zieleni ogólnodostępnej w przeliczeniu na 1 mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce
Fig. 16. Volume of free accessible greenery [m³ per capita] – in city quarters and schematic units

Obraz rozmieszczenia objętości roślinności ogólnodostępnej (na 1 mieszkańca) dla zastosowanych podziałów terenu jest nieznacznie odmienny. W przypadku podziału według kwartałów wystąpiły dwa wcześniej wspomniane pola podstawowe, cechujące się całkowitym brakiem roślinności ogólnodostępnej. Zakres wyników wynosi od 0 do 914,9 m³. Tutaj także zauważyć można ukośny pas jednostek odniesienia o wartościach powyżej 138 m³ roślinności na 1 mieszkańca, biegnący od południowego zachodu na północny wschód. Tymczasem pola siatki regularnej o takich parametrach widoczne są jedynie na wschodnim krańcu obszaru oraz pojedynczo w części południowej. W obu przypadkach natomiast północno-zachodni narożnik cechują najmniejsze wartości wskaźnika.

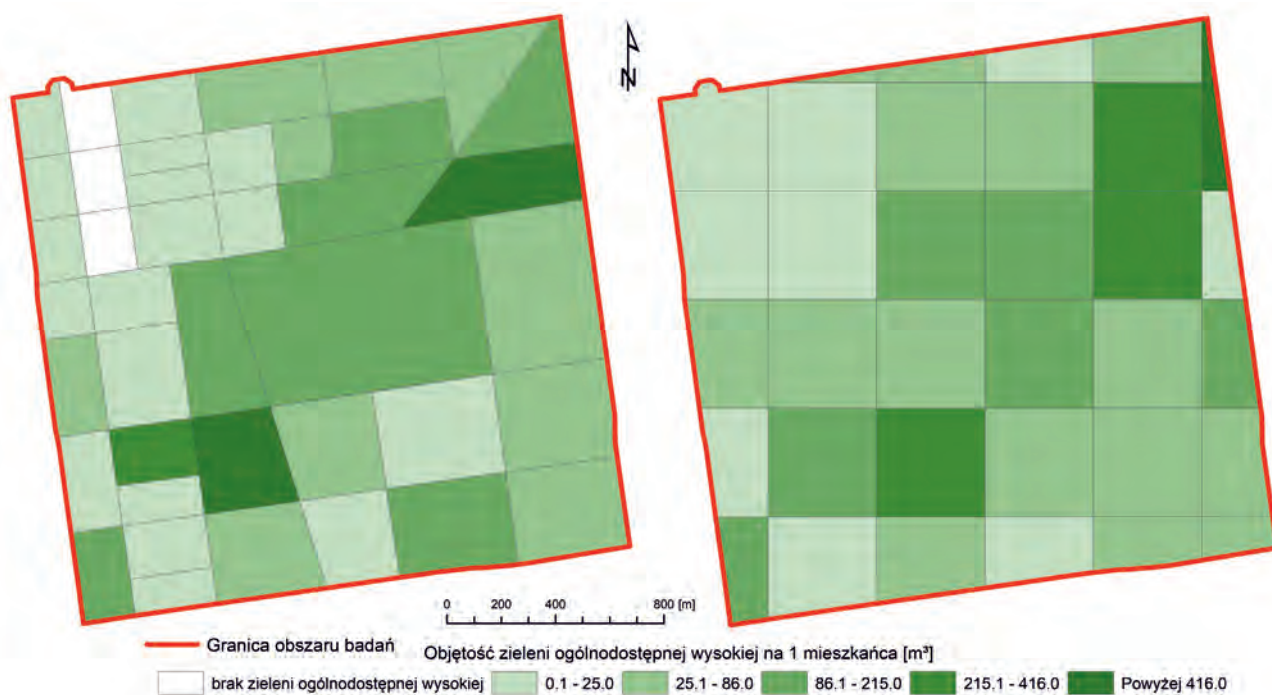
Ostatnia para map pokazuje objętość roślinności ogólnodostępnej wysokiej, w przeliczeniu na 1 mieszkańca (ryc. 17), w poszczególnych jednostkach podziału terenu, według kwartałów ulic i regularnej siatki. Po-

zwalają one wyodrębnić najbardziej cenione pod względem przyrodniczym fragmenty analizowanego obszaru.

Wyróżniają się dwa kwartały w południowo-zachodniej części terenu o dużej wartości wskaźnika – jeden zawierający Park im. Henryka Sienkiewicza oraz drugi graniczący z nim, a także jeden kwartał na północnym-wschodzie obejmujący Park im. Stanisława Staszica. Maksymalna kubatura w pojedynczym polu podstawowym przyjmuje wartość 897,1 m³ roślinności na jednego mieszkańca. W przypadku drugiego podziału, rozmieszczenie pól o takich wartościach wskaźnika jest bardzo podobne, różniąc się jedynie większą liczbą jednostek w północno-wschodnim fragmencie obszaru. Obie metody fragmentacji terenu pokazują również podobne rozmieszczenie pól reprezentujących średnie oraz najniższe współczynniki objętości roślinności wysokiej przypadającej na 1 mieszkańca. Te pierwsze skupiają się głównie w części centralnej, podczas gdy wartości poniżej 25 m³ na 1 mieszkańca

zaobserwować można na północno-zachodnim oraz zachodnich krańcach terenu. Są to rejony Placu Wolności, a także niektóre fragmenty ulicy Piotrkowskiej. Należy brać pod uwagę, że wyniki uwarunkowane są wiel-

kością pól odniesienia w przypadku kwartałów oraz nieregularnym rozkładem budynków mieszkalnych, a w konsekwencji zmienną gęstością zaludnienia.



Ryc. 17. Objętość zieleni ogólnodostępnej wysokiej w przeliczeniu na 1 mieszkańca – w kwartałach i regularnej siatce
Fig. 17. Volume of free accessible high greenery [m³ per capita] – in city quarters and schematic units

Dyskusja wyników

Obszary rozpoznane jako roślinność zajmują łącznie 679681,6 m², co stanowi niemal 17% powierzchni analizowanego fragmentu centrum miasta. Zsumowana kubatura roślinności, bez podziału na kategorie, wynosi 5994219 m³. Na wyniki znaczący wpływ mają trzy duże parki miejskie o bogatych zasobach drzewostanu. Na badanym obszarze 4 km² centrum miasta przypada zatem na każdy 1 m² terenu średnio 0,17 m² roślinności w ujęciu powierzchniowym oraz 1,5 m³ w ujęciu wolumetrycznym.

Na analizowanym terenie roślinność najbardziej cenna – tworzona przez wysokie drzewa oraz pozostałą roślinność przewyższającą 2 metry – zajmuje powierzchnię 507157,6 m², co daje 74,6% udziału w całkowitej powierzchni terenów pokrytych roślinnością oraz kubaturę 5719372 m³, tj. 95,4% udziału w łącznej objętości roślinności. W przeliczeniu na każdy 1 m² obszaru przypada: 0,13 m² powierzchni oraz 1,43 m³ roślinności wysokiej.

Większość terenów z roślinnością jest otwarta tylko dla części mieszkańców miasta. W ujęciu powierzchniowym proporcje wynoszą 55 do 45 procent na korzyść roślinności znajdującej się na obszarze o ograniczonym wstępie. Podobnie jest w ujęciu objętościowym – 52 do 48 procent. Na wynik znaczny i korzystny wpływ miały niewątpliwie parki, skwery oraz pasaże, zaliczane według wcześniej opisanych kryteriów do roślinności

ogólnodostępnej. Odnosząc uzyskane wyniki do powierzchni całego obszaru otrzymano: 0,08 m² roślinności ogólnodostępnej na każdy 1 m² terenu w ujęciu powierzchniowym i 0,72 m³ w ujęciu wolumetrycznym.

Tereny z roślinnością o wysokości powyżej 2 m, mające charakter ogólnodostępny dla każdego mieszkańca stanowią jedynie 34% powierzchni całkowitej przestrzeni zajętej przez roślinność. W ujęciu wolumetrycznym roślinność ogólnodostępna wysoka ma objętość 2759698 m³, co stanowi 46% całej przestrzeni zajętej przez roślinność. Przeliczając uzyskane wyniki na każdy 1 m² analizowanego obszaru otrzymano: 0,06 m² powierzchni oraz 0,69 m³ kubatury roślinności ogólnodostępnej wysokiej.

Wszystkie wskaźniki odnoszące się do całego analizowanego fragmentu miasta przedstawione zostały w tab. 1, zawierającej powierzchnię i objętość roślinności w ujęciu ogólnym, a także w przeliczeniu na 1 mieszkańca oraz na każdy metr kwadratowy obszaru badań.

Według badań Niewiadomskiego (2013), w 2010 r. w Łodzi tereny zieleni zajmowały 12,43% powierzchni miasta, co oznaczało 49,76 m² w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Jak wspomniano we wstępie, w skład łódzkich, miejskich zasobów terenów zieleni wlicza się duże kompleksy leśne rozmieszczone na obrzeżach miasta. Należy odnotować także, że dziś, po 9 latach, wskaźnik ten z pewnością osiągnąłby wyższe wartości. Ten pozorny wzrost spowodowany byłby znacznym

Tabela 1. Parametry charakteryzujące roślinność na badanym obszarze

Table 1. Characteristics of greenery in the area of the study

Kategoria <i>Category</i>	Parametr <i>Variable</i>	Wartość <i>Quantity</i>	Na 1 mieszkańca <i>Per capita</i>	Na 1 m ² obszaru <i>Per 1 m²</i>
Roślinność ogółem <i>Green areas total</i>	Powierzchnia <i>Area</i>	679 681,6 m ²	17,46 m ²	0,17 m ²
	Objętość <i>Volume</i>	5 994 219 m ³	153,99 m ³	1,50 m ³
Roślinność wysoka <i>High greenery</i> [>2 m]	Powierzchnia <i>Area</i>	507 157,6 m ²	13,03 m ²	0,13 m ²
	Objętość <i>Volume</i>	5 719 372 m ³	146,93 m ³	1,43 m ³
Roślinność ogólnodostępna <i>Free accessible greenery</i>	Powierzchnia <i>Area</i>	305 967,7 m ²	7,86 m ²	0,08 m ²
	Objętość <i>Volume</i>	2 874 494 m ³	73,85 m ³	0,72 m ³
Roślinność ogólnodostępna wysoka <i>Free accessible high greenery</i> [>2 m]	Powierzchnia <i>Area</i>	231 353,3 m ²	5,94 m ²	0,06 m ²
	Objętość <i>Volume</i>	2 759 698 m ³	70,90 m ³	0,69 m ³

zmniejszeniem się liczby mieszkańców miasta. Wyniki, jakie osiągnięto w roku 2010 i tak wskazują na wyjątkowo dużą powierzchnię zieleni przypadającej na jednego mieszkańca. Według ostatnich danych, powierzchnia terenów zieleni ogólnodostępnej na jednego mieszkańca miasta w Polsce zwiększyła się w latach 2010–2017 z 20,6 do 21,6 m² (Rocznik Statystyczny RP 2018) i podobne wielkości osiągnięto także w woj. łódzkim – 21,5 m² w 2018 r. (Rocznik Statystyczny woj. łódzkiego 2018), a w samej Łodzi powierzchnia miejskich terenów zieleni (w roku 2017) wynosiła 3 476,4 ha, co stanowiło 11,85% powierzchni miasta (Statystyka Łodzi 2018).

Wykonane analizy obszaru położonego w centrum Łodzi dostarczyły dokładnych informacji o wielkości zieleni oraz możliwości obcowania z nią dla jej mieszkańców. Dodatkowo fragmentacja analizowanego terenu na mniejsze jednostki (41 kwartałów lub 36 oczek regularnej siatki) pozwoliła na zobrazowanie zmienności charakterystyk roślinności wewnątrz obszaru badań. W wyniku wykonanej inwentaryzacji stwierdzono, że w badanym rejonie centrum Łodzi przypada 17,46 m² roślinności ogółem (niskiej, średniej i wysokiej) w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Porównując ten wynik do rezultatów wcześniej wspomnianych badań Niewiadomskiego (2013) stwierdzono, że w samym centrum miasta na osobę przypada o 65% mniej terenów pokrytych roślinnością niż wynosi średnia wartość na mieszkańca dla całej Łodzi. Interesujące jest, że udział przestrzeni pokrytej roślinnością (17%) w całym analizowanym obszarze jest wyższy niż wartość tego wskaźnika (11,85%) podawana w statystykach dla całego miasta (Statystyka Łodzi 2018). Należy jednak pamiętać o różnicach metodyki wyznaczania tych wielkości, które polegają na tym, że w naszym opracowaniu uwzględniona jest wszelka roślinność, natomiast w oficjalnych statystykach uwzględniana jest tylko roślinność terenów o takim przeznaczeniu, które uzasadnia uznanie ich za tereny zieleni miejskiej. Większe wartości wskaźników

w przeliczeniu na mieszkańca mogą być spowodowane także stosunkowo małą gęstością zaludnienia wybranego fragmentu centrum Łodzi. Znajdują się tu bowiem rozległe tereny dworca kolejowego, a także duża liczba XIX-wiecznych kamienic, a wśród nich wiele opuszczonych z powodu złego stanu technicznego.

Wnioski

W pracy zaprezentowano rzadziej spotykane podejście wolumetryczne do szacowania wielkości zasobów roślinności. Po dodatkowych przetworzeniach danych według wysokości oraz dostępności rozumianej w sensie możliwości wejścia na dany teren, powierzchnia oraz kubatura roślinności przeliczona na jednego mieszkańca istotnie maleją. Najważniejszym dla właściwej oceny zasobów roślinności i jej bezpośredniej obecności jest wskaźnik roślinności ogólnodostępnej wysokiej (powyżej 2 m). Roślinność taka cechuje się otwartą, dostępną dla każdego formą oraz największymi korzystnymi walorami wpływu na otoczenie, a w sumie i na jakość życia.

Dzięki przeprowadzonej inwentaryzacji wszystkich typów roślinności stwierdzono, że faktyczne jej zasoby na badanym obszarze 4 km² centrum miasta są znaczne i przewyższają średnie wielkości obliczone dla całego miasta. Unikatowe podejście wolumetryczne zaprezentowane w niniejszym opracowaniu daje możliwość odmiennej od powszechnie stosowanej analizy zasobów roślinności. Na badanym fragmencie miasta rozmieszczenie roślinności jest nieregularne, a ponad połowa jej zasobów znajduje się w miejscach niedostępnych „z ulicy”, np. w podwórzach kamienic.

Wyniki przedstawione w artykule uzyskano w ramach pracy dyplomowej (Worm 2019) oraz badań własnych przeprowadzonych w Zakładzie Geoinformacji Uniwersytetu Łódzkiego w latach 2018–2019.

Bibliografia

- Będkowski K., 2004, Skanowanie laserowe i jego zastosowanie w leśnictwie, *Roczniki Geomatyki*, 2(4), 33–40.
- Będkowski K., Bielecki A., 2017, Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza, *Teledetekcja Środowiska*, 57(2), 5–14.
- Będkowski K., Brach M., Banaszczyk P., 2010, Sezonowa zmienność rozkładu chmury punktów skanowania laserowego w drzewostanach iglastych i jej związek z cechami taksacyjnymi drzewostanu, *Sylvan* 155(11), 736–748. DOI: 10.26202/sylvan.2010104.
- Bożętka B., 2008, Systemy zieleni miejskiej w Polsce – ewaluacja i problemy kształtowania. *Problemy Ekologii Krajoobrazu*, 22, 49–63.
- Czekiel-Świtalska E., 2010, Rola zieleni w mieście na przykładzie centrum Szczecina, *Przestrzeń i Forma*, 13, 165–182.
- Durecka I., 2017, Parki jako element struktury przestrzennej miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych (rozprawa doktorska).
- Grigillo D., Kanjir U., 2012, Urban object extraction from digital surface model and digital aerial images, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 215–220.
- Kankare V., Holopainen M., Vastaranta M., Puttonen E., Yu X., Hyypä H., Alho P., 2013, Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75, 64–75. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003.
- Krukowski M., 2018, Modelowanie kartograficzne w ocenie jakości życia w mieście – aspekt zieleni miejskiej w Lublinie, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio B–Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 73, 7–27.
- Krukowski M., Cebryk P., Płusa, J., 2016, Klasyfikacja terenów zieleni w Lublinie na podstawie zdjęcia satelitarnego IKONOS 2, *Barometr Regionalny. Analizy i prognozy*, 2, 35–44.
- Kubalska J., Preuss R., 2014, Wykorzystanie danych fotogrametrycznych do inwentaryzacji zieleni na terenach zurbanizowanych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 75–86. DOI: 10.14681/afkit.2014.006.
- Lamprecht M., 2017, Osoby starsze w strefie wielkomiejskiej Łodzi. Ujęcie przestrzenne, *Space–Society–Economy*, 20, 23–41.
- Łukasiewicz A., Łukasiewicz S., 2016, Rola i kształtowanie zieleni miejskiej, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Marmol U., Będkowski K., 2008, Dokładność określenia wysokości drzew na podstawie numerycznego modelu koron drzew opracowanego z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 377–385.
- Myeong S., Nowak D.J., Hopkins P.F., Brock R.H., 2001, Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery, *Urban Ecosystems*, 5(4), 243–256.
- Niewiadomski A., 2013, Struktura i znaczenie terenów zieleni w Łodzi na tle dużych ośrodków miejskich w Polsce, *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica Physica*, 12(12), 33–47.
- Pieniążek M., Zych M., 2017, Mapy statystyczne. Opracowanie i prezentacja danych, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Rocznik Statystyczny województwa łódzkiego 2018. Wojewódzki Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2018, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Rouse J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., 1973, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *Progress Report RSC 1978–2*, Texas A&M University, USA.
- Statystyka Łodzi 2018, Wojewódzki Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Stereńczak K., 2009, Lotniczy skanowanie laserowy [LiDAR] w badaniach na rzecz ochrony przyrody, *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 11(2), 135–143.
- Stereńczak K., 2013, Określanie zagęszczenia drzewostanów z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego, *Sylvan* 157(8), 607–617. DOI: 10.26202/sylvan.2012135.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinacker H., 2008, Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint LIDAR data, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 27–32.
- Straub C., Koch B., 2011, Estimating single tree stem volume of *Pinus sylvestris* using airborne laser scanner and multi-spectral line scanner data, *Remote Sensing*, 3(5), 929–944. DOI: 10.3390/rs8090767.
- Strzeżeliński P., Wencel A., Zawila-Niedzwiecki T., Zasada M., Jagodziński A., Chirrek M., 2007, Wybrane zdalne metody szacowania biomasy roślinnej w ekosystemach leśnych jako podstawa systemu raportowania bilansu węgla, *Roczniki Geomatyki*, 5(4), 7–16.
- Szumacher I., 2011, Funkcje terenów zieleni miejskiej a świadczenia ekosystemów, *Prace i Studia Geograficzne*, 46, 169–176.
- UMŁ 2016: Urząd Miasta Łodzi, Rejestr wyborców.
- Ustawa 2004: Ustawa o ochronie przyrody z 16 kwietnia 2004 roku, *Dz.U.*, nr 92, poz. 880 (tekst jednolity *Dz.U.* z 20 października 2015 r., poz. 1651).
- Wężyk P., 2006, Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie, *Roczniki Geomatyki*, 4(4), 119–132.
- Wężyk P., Hawryło P., Szostak M., 2016, Determination of the number of trees in the Bory Tucholskie National Park using crown delineation of the canopy height models derived from aerial photos matching and airborne laser scanning data, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 28, 137–156. DOI: 10.14681/afkit.2016.011.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M., 2010, Metoda szacowania liczby drzew w drzewostanie z wykorzystaniem danych ALS i ortobrazów, *Sylvan*, 154(11), 773–782. DOI: 10.26202/sylvan.2009230.
- Worm A., 2019, Charakterystyka roślinności miejskiej z wykorzystaniem danych obrazowych oraz skaningu laserowego na przykładzie centrum Łodzi, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Geografii Miast i Turyzmu, Zakład Geoinformacji (praca dyplomowa, prom. K. Będkowski).
- Wysocki C., 2008, Miasto jako specyficzne środowisko życia roślinności, *Nauka–Przyroda–Technologie*, 2(4), 1–10, http://www.npt.up-poznan.net/tom2/zeszyt4/art_25.pdf.

Adam Bielecki
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

Łódź, 18 października 2024

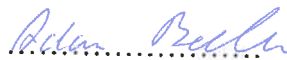
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy pt. *The Issue of Green Area Accessibility - the Example of the City of Łódź*, Studia Miejskie, vol. 40, 2020, s. 55-70, DOI:10.25167/sm.1304, autorstwa: Adam Bielecki, Krzysztof Będkowski

udział poszczególnych współautorów polegał na:

- **Adam Bielecki** (60%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, wizualizacje, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Krzysztof Będkowski** (40%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, analiza danych, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu

Adam Bielecki


.....
podpis

Krzysztof Będkowski


.....
podpis

Adam BIELECKI*, Krzysztof BĘDKOWSKI**

THE ISSUE OF GREEN AREA ACCESSIBILITY – THE EXAMPLE OF THE CITY OF ŁÓDŹ

PROBLEM DOSTĘPNOŚCI TERENÓW ZIELENI W MIEŚCIE NA PRZYKŁADZIE ŁODZI

No. DOI: 10.25167/sm.1304

ABSTRACT: The article is devoted to the subject of urban greenery. The paper attempts to present real green areas and not only those that have such a purpose featuring in lists and registers. The authors also refer to the topic of availability of urban greenery for the residents of the city, taking into account an uneven density of places of residence. The aim of the article is to present the method for assessing the availability of green areas around places of residence, using spatial data showing residential buildings and official data on greenery. The relevant analyses are based on a regular network of squares of 90 m × 90 m. It was found that Łódź is a city with rich greenery resources. However, this judgment needs revising because a significant part of the residents both in their places of residence (R = 50 m) and further surroundings (R = 500 m) do not have access to green areas intended for recreation.

KEY WORDS: greenery, urban greening, NDVI, quality of life

ABSTRAKT: Artykuł poświęcony jest tematyce zieleni miejskiej. W pracy podjęto próbę przedstawienia rzeczywistych terenów zieleni, a nie tylko tych, które posiadają takie przeznaczenie w wykazach i rejestrach. Autorzy odnoszą się również do wątku dostępności zieleni miejskiej dla mieszkańców miasta, biorąc pod uwagę nierównomierne zagęszczenie miejsc zamieszkania. Celem artykułu jest przedstawienie propozycji metody oceny dostępności terenów zieleni dla mieszkańców miast. Wykorzystano dane dotyczące rozmieszczenia budynków mieszkalnych oraz obiektów, które są oficjalnie uznawane za tereny zieleni. Analizy prowadzono w regularnej siatce kwadratów o wielkości 90 m × 90 m. Analizowano dostępność zieleni w miejscu zamieszkania oraz w promieniu do ok. 500 m. Stwierdzono, że Łódź jest bogata w zasoby zieleni, jednakże ta ocena powinna być zweryfikowana ponownie, gdyż wciąż wielu mieszkańców zarówno w miejscu zamieszkania (R = 50 m) jak również w najbliższym otoczeniu nie ma dostępu do zieleni rekreacyjnej.

SŁOWA KLUCZOWE: tereny zieleni, zieleń miejska, NDVI, jakość życia

Introduction

In the common knowledge, there are two conflicting opinions about the size of green areas in Łódź. Łódź is perceived as a post-industrial city full of tenement buildings,

* <https://orcid.org/0000-0003-1460-2961>, e-mail: adam_biel@o2.pl.

** <https://orcid.org/0000-0001-7945-343X>, e-mail: krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl.

abandoned industrial plants and with a small share of green areas, or just opposite – as a city with a record amount of greens planned in the form of parks and green areas, as well as with a lot of greenery.

Official data collected by the Łódź Department of Geodesy, the City of Łódź Office and the Main Center for Geodetic and Cartographic Documentation, include areas for which the greenery function is officially assigned. However, statistical data, averaged in official statistics, do not reflect the actual availability of green areas, which should also take into account the uneven distribution of population (concentration in the center) and green areas (located mainly on the outskirts). What is more: official repositories show different data with reference to the size of green areas in specific places. There are also different nomenclature and definitions between the sources.

The aim of the study was to assess the availability of green areas in the place of residence ($R = 50$ m) and a further surroundings zone of a radius of about 0.5 km ($R = 500$ m) around the place of residence, using data on the distribution of population and urban greenery.

The problem of the availability of greenery in the context of literature

Access to something is understood as the possibility of getting to it (to some place), we can also have access to someone or to some things or matters, that is, to have contact with them or “use these things or matters for ourselves” (Bańko 2007, 380-381). From this perspective, we approach the issue of accessibility in this study.

Assessment of accessibility in the city space is an issue undertaken in science very often and relates to a very wide range of issues, e.g. to medical services (Wang 2011, 237-251; Jankowski and Brown 2014, 39-53; Wiśniewski 2016, 157-166), public transport (Gadziński 2012, 177-186; Soczówka 2012, 197-203), sports and recreation facilities, workplaces, schools (Guzik 2003, 47-134), offices, banks, telecommunications networks (Kozubek and Werner 2007, 53-62) and many others. It is also worth noting that, as is the case with forests (Paschalis-Jakubowicz 2020, 1062), the use of urban greenery also occurs when there is no direct contact with it. The problem of accessibility is often also considered from the perspective of specific social groups, especially people with disabilities, in the broad sense of the term (Stauskis 2017, 199-216). The level of accessibility is also compared with other social or economic phenomena, such as property prices, health status, quality of life (Burdziej 2018, 219-234). According to the philosophy of universal design developed in modern urban planning, solutions adapted to the possibilities of the weakest user are preferred, as they will also be suitable for other users. Solutions that meet this principle ensure that physical exertion is minimized, that each user can use the same range of use, and that the user is flexible, depending on their individual predispositions (Błaszak and Fojud 2017, 58-83.).

In this article, we focused on the availability of taking advantage of green areas, irrespective of their type, in the nearest neighbourhood of the inhabitants of Łódź. This means that those people, who live in such areas, have also a direct access to the benefit

of all kinds of plants located nearby (e.g. fresher air, less noise, etc.). The issue of availability of greenery in the city was also considered with the application of the Lorenz's concentration curve (Będkowski and Bielecki 2017, 5-14). In other research, we can find information about the vegetation filling of urban quarters in city centre using only remote sensing data (Worm et al. 2019, 5-20).

When we attempt to assess the availability of greenery at the outset, we encounter difficulties in determining which of the coverage (use) classes of the terrain presented in individual data sources can or should be considered as representing urban green areas. In literature, we find many definitions of green areas. One of them, quite general, defines green areas as "urban areas covered with vegetation" and urban green areas as "spaces covered with vegetation in urban areas" (Łukasiewicz and Łukasiewicz 2016, 11-13). Böhm (1999 in Walkowicz 2002, 347-358) wrote: "Mostly urban greenery is defined as all biologically active areas within cities, regardless of how they are used and who owns them." Green areas are officially defined as areas furnished with technical infrastructure and buildings functionally connected with them, covered with vegetation, performing public functions, in particular parks, green spaces, promenades, boulevards, botanical gardens, zoological, Jordanian and historic gardens, cemeteries, greenery accompanying roads in buildings, squares, historic fortifications, buildings, landfills, airports, railway stations and industrial facilities.

Studies in landscape architecture, urban planning, environmental protection and sociology highlight many social, aesthetic, educational and economic aspects of greening in urban space (Chrobak and Kryczka 2018, 12). Greenery has a number of functions important for residents of cities (Białobok 1976, 223-245, Gill et al. 2007, 115-133):

- protecting against dust, soot, poisonous volatile substances,
- increasing air humidity,
- mitigating temperature differences,
- providing a wind shield,
- improving water balance,
- suppressing noise and air vibrations,
- aesthetic impressions,
- didactic and educational (collections of specimens in botanical gardens).

Greenery provokes positive emotions and impressions. Introduction of vegetation in human's environment usually meets general acceptance (Sobczyńska 2014, 56). Greenery, especially trees, is a very desirable element of the living environment, which has been confirmed in many countries (Szczepanowska 2012, 25-49). Accessibility to green spaces is now considered to be as important as for basic service areas (Chrobak and Kryczka 2018, 132).

The presence and quality of green areas is an important factor influencing the choice of place of residence (Wu et al. 2019, 133-144). Respondents repeatedly indicate the presence of greenery as a condition for a happy life and demand it as much as possible (Durecka 2017, 39). According to studies by Bułhak (2004, 209-214), the proximity of green areas is the most frequently indicated factor determining the attractiveness of

a given housing estate. Iwańczak (2017, 69-85) stated that in places where residents spend most of their time (home and work) greenery is most desirable. Nevertheless, in recreational areas, it may be indispensable, but it is of no importance in the places of trade. What is also important, according to the recent studies, parks in urban area can be an effective policy instrument to encourage people to live in a specific part of city (Wu et al. 2019, 133-144; Schipperijn et al. 2017, 253-263). That advantage of urban parks can help the local government to implement its local spatial policy.

Due to the importance of green areas for the functioning of urban centres, they have become an element defined in the recommendations and regulations and norms obligatory for decision-makers planning the development of cities. Some of the first greening recommendations were related to the garden city concept by Ebenezer Howard. He showed, using the example of Krakow, that the most suitable ratio of the area of built-up areas to undeveloped is 1:10; however, for Letchworth, the flagship and implemented city-garden, this index was only 1:2 (Czyżewski 2001, 96). According to Wodiczko (1937) (Łukasiewicz and Łukasiewicz S. 2016, 34) 1/3 of the city's area should be covered by natural vegetation, without agricultural crops.

Accessibility is expressed in the form of "cost" of reaching a given place, which can be understood as access or travel time, physical distance, energy or financial inputs, and more and more methods are used to model it, especially in the area of spatial analysis (Burdziej 2018, 219-234; Śleszyński 2014, 171-215). Urban planning norms also apply to green areas, specifying their total size, average size per one inhabitant, or the average travel time for residents per feature. We are talking about central parks (minimum 15-20 ha in area, average 2 m² per capita, and access within 15-30 minutes), district (5-10 ha, access in 10-15 minutes) and culture and leisure (from 20 to several hundred ha). The greenery and squares should be located within the housing estates and occupy the area within 1-2 ha. Every resident should have such an object no more than 0.5 km distant from his place of residence.

Suburban forests are treated separately, for which the main criterion is the area, which should amount to about 25-30% of the suburban area (Łukasiewicz and Łukasiewicz 2016, 43). The following norms regarding the area of greenery per one inhabitant are found in the legal act of 1964, although not obligatory, in which it was stated that one inhabitant should have 8-15 m² of greenery, and 10.6 m² of publicly available, including 1.5-2.5 m² of estate parks with a minimum area of 2 ha, and 1.5-2.5 m² of green areas (Order 1964). According to Ptaszycka (1950, 99), the correct systems are only those that provide a minimum of 15 m² of green areas per one inhabitant. Myczkowski (1976, 170), on the other hand, speaks about the need for 50 m² of green areas to provide adequate health conditions for human beings. Orzeszek-Gajewska (1984, 96) states that there should be 8-15 m² of greenery per one inhabitant.

There are also many studies focusing on parks as the green areas most recommended for cities. Most often, it is recommended to locate a park not more than 500 meters from residential buildings (or the location of buildings at such a distance to parks), which would take a 10-15 minute walk (Czarnecki 1968, 279). The minimum size of a park

should be, depending on the researcher, 2 ha (Łukasiewicz and Łukasiewicz 2016, 35) or 5 ha; however, not less than 8 m² per one inhabitant (Czarnecki 1968, 279).

When analysing the availability of green areas, the so-called service radius should be taken into account. It should be remembered that a distance of 500 meters in a straight line in urban conditions means the importance of a longer distance to the passage for a resident (Figure 1).

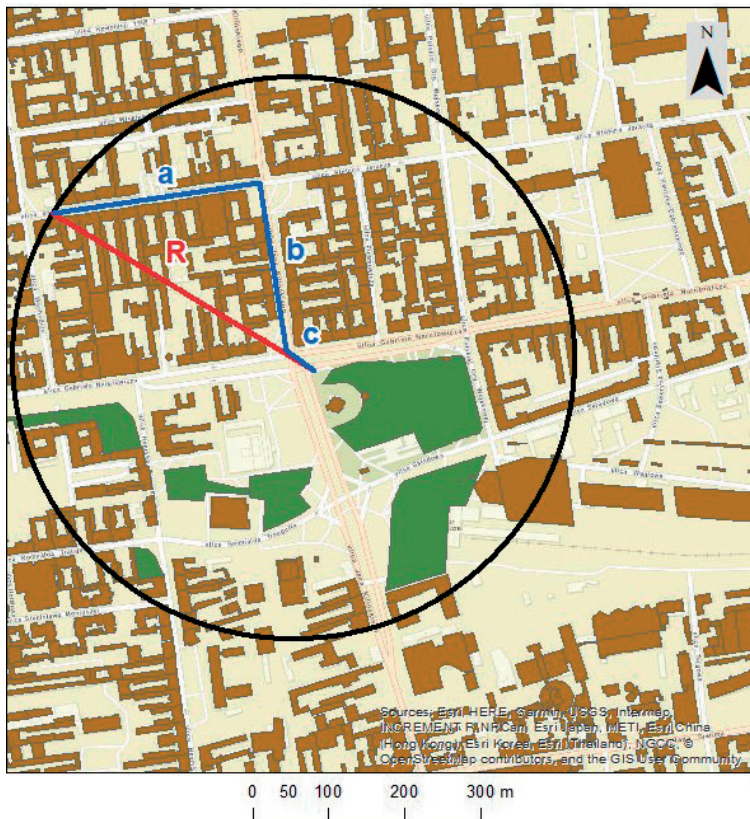


Fig. 1. Service radius and range of S. Moniuszko Park in Łódź, designated from one of the entrances. For the radius of service R the distance to cover is the sum of the values of a , b and c . For a place in a straight line of about 400 meters, the distance to the crossing is about 540 meters.

Source: Prepared by the author on the basis of OpenStreetMap map

Availability of greenery in Łódź

Łódź, the capital city of a province located in central Poland, occupies respectively the 3rd and the 4th place in terms of the number of inhabitants and the size of the area within the administrative borders (CSO 2016, Local Data Bank). The city is full of

contrasts, also with regard to green areas. Known for its industrial character, Łódź is associated with production plants, smoking chimneys and tight rental buildings, but it is also rich in historic parks offering high-quality greenery.

The basic source of information is the geodesic state, according to which two types of land can be classified as green. As can be seen from Table 1, half of the city's area is covered with permanent or temporary vegetation, which gives approx. 190 m² for one inhabitant of Łódź.

Table 1

Geodetic status of green areas in Łódź in 2017

Type of land	Area [ha]	Area of the city [%]	Per capita ^a [m ²]
Agricultural land (including arable land, orchards, permanent meadows and pastures)	1,1670	39.8	154.0
Forest land, woody and bushy land	2,4890	8.5	36.0

^a 700,000 residents were accepted according to the same source.

Source: Statistical Office (SO) Łódź. Provincial Statistical Office, Łódź.

According to the same source, urban green areas (without areas with agricultural functions which have an ecological impact) constitute 13% of the city's area (Table 2). Therefore, there is less than 59 m² of green urban areas per one inhabitant.

Table 2

Municipal green areas in Łódź in 2017

Type of land	Area [ha]	Area of the city [%]	Per capita ^a [m ²]
Parks	627.4	2.14	9.0
Lawns	80.0	0.27	1.1
Estate green belts	999.7	3.41	14.3
Zoological gardens	17.0	0.06	0.2
Botanical gardens	66.7	0.23	0.9
Nature reserves	79.7	0.27	1.1
Landscape parks	1,605.9	5.48	22.9
Street green belts	650.4	2.22	9.3
			Total: 58.8

^a 700,000 residents were accepted according to the same source.

Source: Statistical Office (SO) Łódź. Provincial Statistical Office, Łódź.

For every inhabitant of a Polish city, there falls an average of 21.6 m² of public and estate green areas (Table 3). Note that in 1971 this index was only 10.6 m² and it was

assumed then that the target should be just 20.5 m² (Białobok 1976, 223-245). Comparing this data with the values related to Łódź, we will find that the greenery indicator per citizen of Łódź is relatively high.

Table 3

Urban green areas in Poland

Year	Public and community green areas [m ² per capita]
2005	19.9
2010	20.6
2013	20.4
2014	20.5
2017	21.6

Source: Statistical Yearbook of the Republic of Poland 2018,
Central Statistical Office, Warsaw

Materials and research methodology

For the spatial analysis of greenery distribution, data from public databases and data repositories, such as:

- DataBase of Topographic Objects (*Baza Danych Obiektów Topograficznych 10k – BDOT*)

- Register of Land and Buildings (*Ewidencja Gruntów i Budynków – EGiB*)

- Atlas of the City of Łódź (*Atlas Miasta Łodzi – AMŁ*)

In each of these databases, a different division of areas is used; there are also, sometimes significant, differences in the boundaries of many objects.

DataBase of Topographic Objects

- 24 different terrain functions,
- Areas are in the overlap relation with each other (the total area is about 136% of the city area),

- More detailed than EGiB,

- Classes that can be qualified as green areas:

- PKLA – forest, copse, other trees,
- BBSP – playing fields,
- OIMO – marshland, wetlands,
- OISI – reed, bulrush,
- OIPR – clump of bushes, trees,
- PKKR – thicket,
- PKTR – crops, grassy vegetation,
- PKUT – orchard, plantation, garden plots,

- TPCY – landscape park,
- TCRE – nature reserve.

Register of Land and Buildings

- 38 different terrain functions,
- Areas are not in the overlap relation with each other,
- 5 types of useable lands, which can be qualified as green areas:
 - forests,
 - wooded and bushy land,
 - recreation areas,
 - pastures,
 - arable land.

After thoroughly reviewing the data in the above-mentioned sources, it was decided to take into account only the data from the Land and Building Register, because they were characterized by the highest consistency and had fewer topological errors. When designating green areas of the park type, only those that had such a function were directly assigned, i.e. forests, wooded and bushy land, as well as recreation areas (so the area without estate and street green belts from Table 2 or agriculture areas from the Table 1).

The structure of the population in Łódź was based on a layer of buildings from the Register of Lands and Buildings, containing such attributes as the number of stories, the surface area of the ground floor, and the function (single- and multi-family buildings). The data from the City of Łódź Office regarding the number of people living in individual housing estates (auxiliary units) were also used. Based on these data, the number of people assigned to a given auxiliary unit per unit of living space was determined first, followed by the number of people living in each residential building. At the final stage, two raster layers were created in which the eyes were 90 m × 90 m: population distribution (Figure 2) and green areas (Figure 3). The premise for choosing the mesh size was the assumption that the place of residence is determined by the closest surroundings within a radius of around 50 m around the reference point. In this way 36,894 meshes were designated, of which 14,569 (40.25%) were inhabited.

The conversion of the vector layer of green areas from EGiB into the raster layer was made automatically in compliance with to the rule, according to which a given raster mesh was included in green areas if the share of green areas, according to EGiB, exceeded 50% of its area. The transition from the vector format to the raster format inevitably leads to a change in the shape and surface of individual objects, as well as the disappearance of objects that are too small (Figure 4). The balance of the city scale is also changing. In our case, the total area of green areas in Łódź in terms of vector was 30.76 km², while in the 90 m × 90 m grid – 30.55 km² (3772 meshes).

The second, enlarged zone of proximity for each mesh 90 m × 90 m was determined in such a way that all the meshes of which at least 50% of the area were contained in a buffer with radius $R = 500$ m from the central point were included (5). This distance resulted from the multiples of the number of raster meshes and their size ($R = (11 \times 90 \text{ m}) / 2$).



Fig. 2. Population density in Łódź, 2016 in 90 m x 90 m pixels

Source: Prepared by the author on the basis of data from Łódź City Hall.

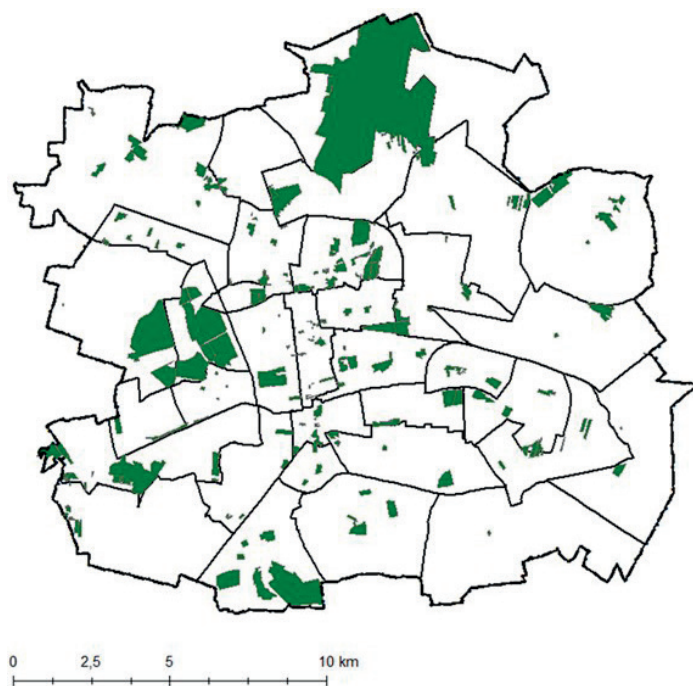


Fig. 3. Arrangement of green areas in Łódź according to EGİB

Source: Prepared by the author on the basis of data from Łódź Office of Land Surveying.

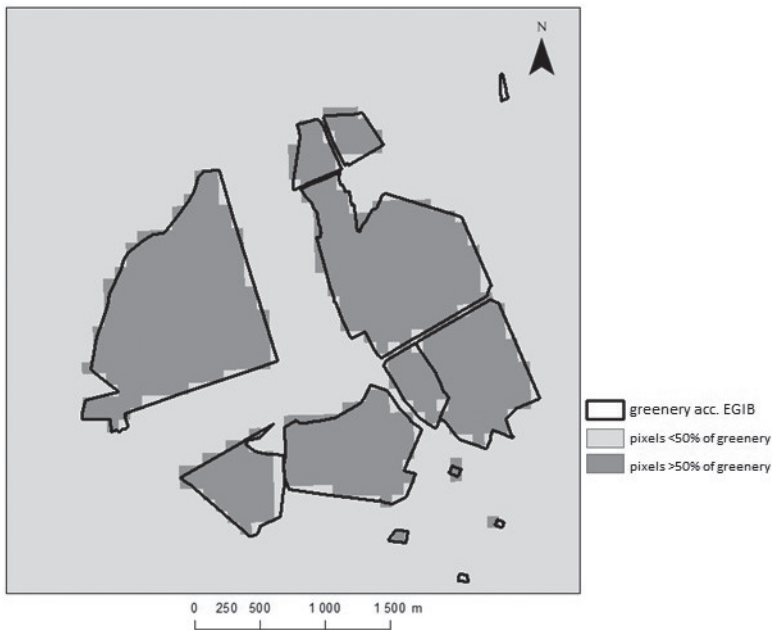


Fig. 4. Changing the shape and size of green areas when switching from a vector format (black line) to 90 m × 90 m raster
Source: Prepared by the author on the basis of data from EGIB.

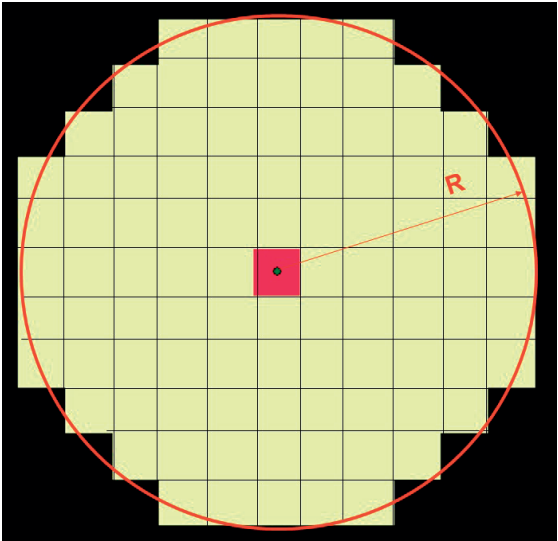


Fig. 5. Determination of the neighborhood zone: within a radius of $R = 500$ m there are 97 cells $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ considered
Source: Prepared by the author.

So the designated zones contained 97 square meshes with a total area of 0.786 km², which is approximately equal to the area of a circle with a radius of 500 m (0.785 km²).

The prepared data made it possible to analyze the availability of greenery in the place of residence and within 500 m.

Results

Greenery in the place of residence, i.e. in the pond of 90 m × 90 m

200 meshes of 90 m × 90 m raster were found that meet two conditions, i.e. at least 50% are green areas, according to EGİB, and are a residential area (out of 14,569 inhabited pixels). There are 2,537 people living in them (for 624,372 inhabitants of Łódź designated by the housing method), which constitutes only 0.41% of all the inhabitants of Łódź. The defined area is 0.54% of the area of Łódź.

Greenery around the place of residence, i.e. in a zone with a radius of 500 m

For each mesh of 90 m × 90 m raster it was checked whether in the radius up to 500 m from their central point there are raster holes, which were included in the green

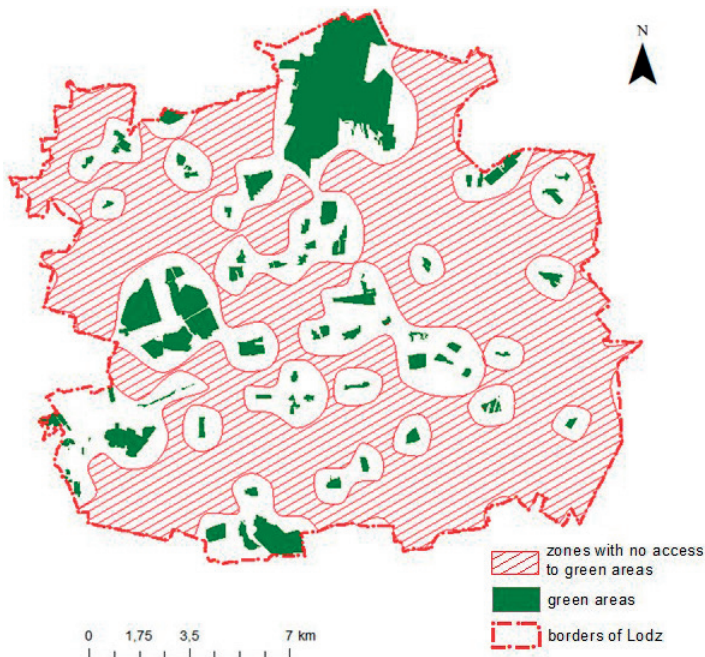


Fig. 6. Zones in which the distance to the green area (included in the EGİB) with an area of at least 0.81 ha (corresponding to the area of 1 mesh of the screen) exceeds 500 m

Source: Prepared by the author on the basis of data from Łódź Office of Land Surveying.

areas. In addition, the analysis includes the size of the green area – two variants were considered: greenery, in one complex, at least 1 mesh (0.81 ha) or 6 meshes (4.86 ha).

The zone, whose inhabitants did not have access to even a small green area (0.81 ha), occupies 139.5 km², which is 47.6% of the total city area (6). Using the previously mentioned algorithm for calculating population density, it was calculated that about 20% of all the inhabitants of the city live in this zone. The largest distance to the green area was also determined, which is 1498 m. Increasing the requirements, by changing the criterion of the minimum area available for a 6-mesh raster (4.86 ha), caused the zone without access to greenery to expand up to 172 km² (about 60% of the city's area) (Figure 7). Almost half of the inhabitants of Łódź (293,000, 45%) live in such a marked area. The largest distance to a park is in this case 1,928 m.

Discussion of results

On the basis of very generalizing statistics, the reality, e.g. considering the overall size of green areas and the number of inhabitants, we get good values of indicators of green areas per one inhabitant of Łódź. Both indicators calculated on the basis of data from EGİB (57 m² per person) or GUS data (79 m² per person) in each case exceed the previously quoted norms of the green area per one person: 15 m² (Ptaszycka 1950, 99), 20.5 m² (Białobok 1976, 223-245), 50 m² (Myczkowski 1976, 170), 18-25 m² (Zarządzenie, 1964).

When comparing with other cities in Poland, it should be based on the same data sources for each of them, assuming that they were collected according to the same methodology. The Local Data Bank of the Central Statistical Office was used, which contains information, including on the share of parks, green areas and estate green areas in the urban area (Figure 7). This is the default list of green area function made by CSO. In the above field, Łódź ranks high in the fourth place, reaching 5.8%. Cities with a better indicator are Bydgoszcz, Katowice and Warsaw.

In the same source we found information about the area of parks, green areas, street greenery, estate green, cemeteries and commune forests (Figure 8). That means that in this option also cemeteries and street greenery are taken into consideration. In the case of green areas defined in this way, their percentage in the area of Łódź grows more than three times (from 5.8% to 18.8%). The position of Łódź among provincial cities in this respect is slightly better, as Łódź occupies the third place, this time behind Olsztyn and Poznań.

The presented data show that Łódź is a city with rich greenery resources. However, this judgment has to be revised due to the uneven distribution of people and green areas, because a significant part of residents in their place of residence ($R = 50$ m) and further surroundings ($R = 500$ m) do not have access to greenery areas of adequate size (there were two variants considered: min. 0.81 ha and min. 4.84 ha in one complex), intended for recreation. It should also be mentioned that green areas of a regional, city-wide and regional character also have an impact on the assessment of the availability

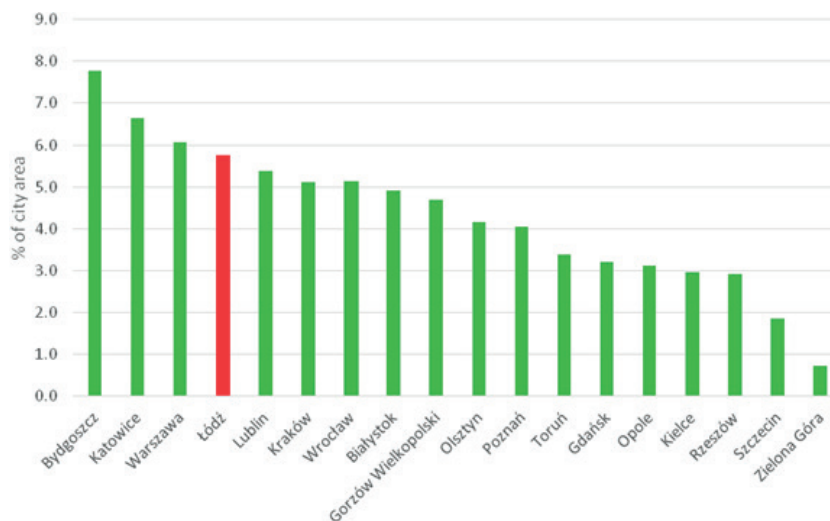


Fig. 7. Share of parks, green areas and estate green areas in the area of voivodship cities in 2016

Source: Prepared by the author on the basis of data from Local Data Bank, GUS, www.stat.gov.pl.

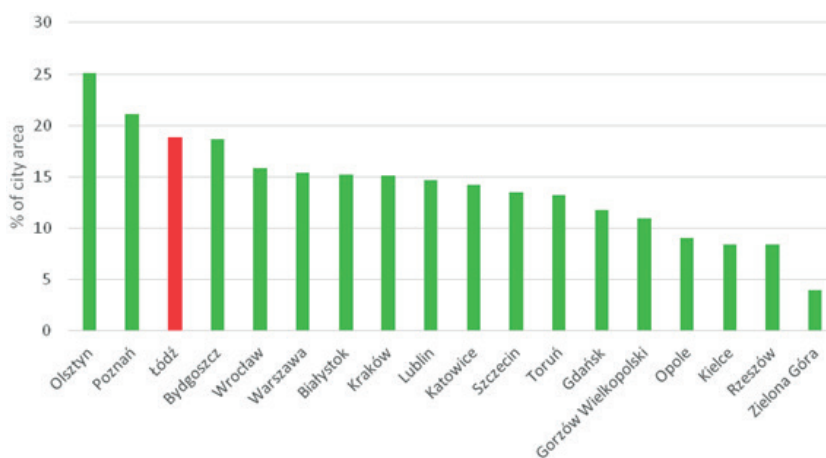


Fig. 8. Share of the total area of greenery (walking and recreation parks, green areas, street greenery, greenery areas, cemeteries, communal forests) in the area of provincial cities in 2016

Source: Prepared by the author on the basis of data from Local Data Bank, GUS, www.stat.gov.pl.

of greenery for residents. This is primarily important for residents of areas located near the city border. In many cases, in the neighboring commune, residents can use well-developed green areas. A great impact on the quality of a place of residence is the ability to quickly take a means of public transport or one's own car to places of leisure offering nature in the open green space. The work, however, focused on examining the quality of greenery in the immediate vicinity of a place of residence.

The results of the conducted analysis were influenced by the quality of available data and the manner of their processing. We did not have precise data on the distribution of population, and the number of inhabitants of individual buildings and raster spots was determined based on the number of residents assigned to auxiliary administrative units. The data source was the Decision No. XXXIX / 1029/16 of the City Council in Łódź, dated December 28, 2016. How uncertain these data are is shown at least by the fact that the total number of residents assigned to auxiliary units is lower by more than 44 thousand from the number of inhabitants according to GUS (Local Data Bank). The second source of significant distortion of the access to green areas is the quality of the EGİB database. There are green areas in the zone that the greenery has officially been assigned to. Therefore, it is not possible to include in the analyzes areas with a different function, even if there is vegetation on them, in the form of lawns and meadows or individual bushes and trees or even large groups of them. These include areas officially recognized and actually used for agriculture, but also many rows of roadside trees, vegetation on building plots or temporarily undeveloped post-industrial areas. Nobody can deny that they play an important environmental role and should be included in the balance of urban greenery. The problem, however, in the methodology, is that it has not been established what methods should be used to properly measure and valorize such areas. It seems that modern data and geomatics tools, such as aerial and satellite photos, and laser scanning, can be helpful. The potential of these new methods has been demonstrated, for example, in the analysis of ventilation in Kraków (Godłowska 2016, 44-54).

Conclusions

According to the methodology used in official statistics, only the areas, to which the greenery function is officially assigned, are taken into account when determining the size of green areas per one inhabitant of the city. It does not take into account the significant resources of greenery that occur in other areas, and often have great importance in shaping the positive living conditions in the city. According to the results, about 80% of the inhabitants in Łódź have in their neighborhood at least one small fragment of green area (0.81 ha), despite the fact that almost half of the city area is covered by grounds where there is no greenery within 500 meters. The second source of creating a false image of the condition of greenery is its unequal accessibility for residents, which results from the clustered distribution of people and green areas. Therefore, it is necessary to develop and implement a new methodology of inventory and valorization of all the city's greenery resources.

References

- Bańko, Mirosław (ed.). 2007. *Słownik języka polskiego. t. 1*. 380-381. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN.
- Będkowski, Krzysztof and Adam Bielecki. 2019. Assessment of the availability of greenery in the place of residence in cities using NDVI and the Lorenz's concentration curve. *Teledetekcja Środowiska* 60 (2019/1):5-20.

- Białobok, Stefan. 1976. Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka. In *Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka*, edited by Danuta Cichy and Włodzimierz Michajłow, 223-245. Warszawa: PWN.
- Błaszak, Maciej and Artur Fojud. 2017. Dostępność miasta jako przedmiot interdyscyplinarnych badań. *Studia KPZK* 176:58-83. DOI: 10.24425/118566.
- Buňhak, Monika. 2004. Atrakcyjność toruńskiego osiedla Kaszczorek jako miejsca zamieszkania. In *XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście „Zróżnicowanie warunków życia ludności w mieście”*, edited by Iwona Jażdżewska, 209-214. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Burdziej, Jan. 2018. Porównanie wybranych metod analizy dostępności przestrzennej na przykładzie obiektów użyteczności publicznej w Toruniu. *Roczniki Geomatyki* 16 (3(82)):219-234.
- Chrobak, Katarzyna and Piotr Kryczka. 2018. Wpływ wybranych rozwiązań urbanistycznych na dostępność przestrzenną terenów zieleni – przykład wrocławskiego Olbina. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum* 17 (2):131-142. DOI: 10.31648/aspa.346.
- Czarnecki, Władysław. 1968. *Planowanie miast i osiedli. T. III. Tereny zielone*. Warszawa – Poznań: PWN.
- Czyżewski, Adam. 2001. *Trzewia Lewiatana. Antropologiczna interpretacja utopii miasta – ogrodu*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Durecka, Izabela. 2017. *Parki jako element struktury przestrzennej miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego*. PhD Thesis. Uniwersytet Łódzki.
- Gadziński, Jędrzej. 2012. Dostępność transportu publicznego w aglomeracji poznańskiej. In *Dostępność i mobilność w przestrzeni*, edited by Piotr Rosik and Rafał Wiśniewski, 177-186. Warszawa: Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania.
- Gill, Susannah et al. 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment* 33 (1):115-133.
- Godłowska, Jolanta. 2016. *Modelowanie pola wiatru i wskaźnika wentylacji*. In *Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa*, edited by Katarzyna Bajorek-Zydroń and Piotr Wężyk, 35-41. Kraków: Urząd Miasta Krakowa, Wydział Kształtowania Środowiska.
- Guzik, Robert. 2003. *Przestrzenna dostępność szkolnictwa ponadpodstawowego*. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Iwańczak, Bartłomiej. 2017. Metody badawcze całościowej percepcji przestrzeni miasta na przykładzie Warszawy. *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki* 62 (3):69-85.
- Jankowski, Piotr and Blake Brown. 2014. Health care accessibility modelling: effects of change in spatial representation of demand for primary health care services. *Quaestiones Geographicae* 33 (3):39-53.
- Kozubek, Elżbieta and Piotr Werner. 2007. Syntetyczne miary dostępności sieci telekomunikacyjnych. *Roczniki Geomatyki* 5 (1):53-62.
- Local Data Bank, CSO – Central Statistical Office, Poland.
- Łukasiewicz, Aleksander and Szymon Łukasiewicz. 2016. *Rola i kształtowanie zieleni miejskiej*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Myczkowski, Stefan. 1976. *Człowiek, przyroda, cywilizacja*. Warszawa: PWN.
- Orzeszek-Gajewska, Barbara. 1984. *Kształtowanie terenów zieleni w miastach*. Warszawa: PWN.
- Ptaszycka, Anna. 1950. *Przestrzenie zielone w miastach*. Poznań: Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza.
- Paschalis-Jakubowicz, Piotr. 2020. Użytkowanie lasów w Polsce w latach 1816–2016 i jego przyszłość. *Warszawa: Sylwan* 164 (12):1061-1075. DOI: 10.26202/sylvan.2020116.
- Statistical Yearbook of the Republic of Poland 2018*, Warszawa: Central Statistical Office.
- Schipperijn, Jasper et al. 2017. Access to parks and physical activity: an eight country comparison. *Urban Forestry and Urban Greening* 27:253–263. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.08.010.
- Sobczyńska-Jeżewska, Karolina. 2014. *Zieleń jako element współczesnego miasta i jej rola w przestrzeniach publicznych Poznania*. PhD Thesis. Politechnika Poznańska.
- Soczołka, Andrzej. 2012. Dostępność przestrzenna komunikacji miejskiej w konurbacji katowickiej. In *Dostępność i mobilność w przestrzeni*, edited by Piotr Rosik and Rafał Wiśniewski, 197-203. Warszawa: Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania.
- Statistical Office (SO) Łódź. Łódź: Provincial Statistical Office.

- Stauskis, Gintaras. 2017. The methodology for evaluating accessibility as a tool for increasing social responsiveness of urban landscapes in Singapore. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus* 16 (2):199-216. DOI: 10.15576/ASP.FC/2017.16.2.199.
- Szczepanowska, Halina Barbara. 2012. Miejsce terenów zieleni w strukturze zintegrowanego projektowania, zarządzania i oceny ekologicznej inwestycji miejskich. *Człowiek i Środowisko* 36 (1-2):25-49.
- Śleszyński, Przemysław. 2014. Dostępność czasowa i jej zastosowania. *Przegląd Geograficzny* 86 (2):171–215.
- Walkowicz, Tomasz. 2002. Społeczne i ekologiczne aspekty tworzenia i utrzymania terenów zieleni w miastach. In *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast*, edited by Janusz Słodczyk, 347-358. Opole: Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego.
- Wang, Lu. 2011. Analysing spatial accessibility to health care: a case study of access by different immigrant groups to primary care physicians in Toronto. *Annals of GIS* 17 (4):237-251.
- Wiśniewski, Szymon. 2016. Spatial accessibility of hospital healthcare in Łódź voivodeship. *Quaestiones Geographicae* 35 (4):157-166.
- Wodziczko, Adam. 1937. Planowanie kraju drogą do utrzymania równowagi w przyrodzie. *Ochrona Przyrody* 17:1-9.
- Worm, Artur and Krzysztof Będkowski and Adam Bielecki. 2019. The use of surface and volume indicators from high resolution remote sensing data to assess the vegetation filling of urban quarters in Łódź city centre, Poland. *Teledetekcja Środowiska* 60 (2019/1):5-20.
- Wu, Wenjie et al. 2019. Residential satisfaction about urban greenness: Heterogeneous effects across social and spatial gradients. *Urban Forestry & Urban Greening* 38:133-144. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.11.011.

Legal acts:

- Uchwała 2016: Uchwała nr XXXIX/1029/16 Rady Miejskiej w Łodzi z dnia 28 grudnia 2016 r. w sprawie uchwalenia budżetu miasta Łodzi na 2017 rok.
- Ustawa 2004: Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody, Dz.U. z 2015 r., poz. 1651 (tekst jednolity Dz. U. 2018 r., poz. 142).
- Zarządzenie 1964: Zarządzenie nr 118 Ministerstwa Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych z 15 czerwca 1964 r. w sprawie wskaźników wykorzystania terenów zainwestowania miejskiego. Dziennik Budownictwa nr 14, poz. 40.

Adam Bielecki
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

Łódź, 18 października 2024

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy pt. *The degree of greenery in Łódź city, Poland – clearing up discrepancies between official statistics and satellite data*, Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, vol. 21, nr 4, 2022, s. 489-512, DOI:10.31648/aspal.7623, autorstwa: Adam Bielecki, Krzysztof Będkowski

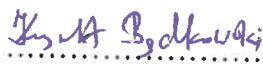
udział poszczególnych współautorów polegał na:

- **Adam Bielecki** (50%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, wizualizacje, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Krzysztof Będkowski** (50%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, analiza danych, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu

Adam Bielecki


.....
podpis

Krzysztof Będkowski


.....
podpis

THE DEGREE OF GREENERY IN LODZ CITY, POLAND – CLEARING UP DISCREPANCIES BETWEEN OFFICIAL STATISTICS AND SATELLITE DATA

Adam Bielecki¹, Krzysztof Będkowski²

¹ ORCID: 0000-0003-1460-2961

² ORCID: 0000-0001-7945-343X

^{1, 2} University of Lodz

Kopcińskiego Street 31, 90-142 Łódź, Poland

ABSTRACT

Motives: According to public statistics guidelines, areas officially classified in Lodz city as urban greenery include only forests, parks, lawns, squares and cemeteries. Areas of so-called unsealed greenery are omitted, which, however, have a great positive impact on improving the living conditions of the population. By taking information from satellite images and comparing them with official data, we have received a closer to the reality picture of the city, which is much more better than it would appear from official statistical data. Another dimension which the study addresses is the uneven distribution of greenery of a certain quality in individual units of the city.

Aim: Comparing these data with the fact that the distribution of places of residence is also uneven, an attempt was made to assess the accessibility of green areas for the inhabitants of Lodz city.

Results: There are much more green spaces, similar in terms of vegetation abundance to the official green spaces. That means the city is underestimated when talking about the degree of greenery.

Keywords: NDVI; urban greenery; Landsat; urban development

INTRODUCTION

Greenery is an important component of urban space, as it performs a number of very important functions, such as protection against air pollution, maintaining air humidity, mitigating extreme temperatures, reducing noise, while also producing a positive aesthetic impression (Białobok, 1976; Haber & Urbański, 2005; Łukasiewicz A. & Łukasiewicz S., 2016). Green areas also increase the level of satisfaction from living in their vicinity (Wu et al., 2019). Unfortunately, however, there is less and less high-quality greenery

in urban areas (DeFries et al., 2010; Konijnendijk, 2003). Nowadays, despite the fact of increasing prices for the space in cities, local governments are more aware of the need for ensuring adequate open space for public use (Sustainable Development Goals). Those areas should be covered by the greenery.

According to currently binding legal acts in Poland, urban green areas are areas within the boundaries of arranged green space performing public functions, such as parks, lawns, promenades, boulevards, botanical gardens, zoos, playgrounds and historic gardens, cemeteries, greenery accompanying roads

 adam.bielecki@edu.uni.lodz.pl,  krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl

in developed areas, squares, historic fortifications, buildings, landfills, airports, railway stations and industrial facilities (Act, 2004). Such areas are included in official statistics, with the surface area being the main measure of the amount of green resources in a city. In practice, however, it appears that the adopted method of determining the degree of greenery in cities does not fully reflect the actual state of affairs, as there are many green objects in the urban fabric that are not taken into account, and yet perform a number of important functions related to greenery. This is the greenery found in developed plots, industrial and post-industrial areas (Cudny, 2011), along roads and watercourses, and others. What is more – the official data takes different aspect when it came to the classification (e.g. function, majority land cover).

The aim of our study is to assess the size of greenery resources (in terms of surface area and quality) in the area of Lodz city (Łódź in Polish, the capital of province and also the 3rd largest city in terms of number of inhabitants in Poland) using publicly available satellite data from the Landsat 8 mission and the NDVI index derived from it, and to compare them with official urban greenery statistics. Based on the NDVI distributions, characteristic boundaries of the range of values for this index were calculated for areas considered as parks, lawns, forests etc. In this way, the different functional areas of the city have been characterised in terms of their greenery and population density. These areas were compared with the whole city, and then the differences between the individual types of areas were presented.

LITERATURE REVIEW

In many scientific works, the NDVI, Normalized Difference Vegetation Index (Deering, 1978; Jackson & Huete, 1991) was used as a measure of the degree of vegetation development in the studied areas. An important feature of the NDVI is its relationship with both the quantity and quality of greenery in a given area (Jarocińska & Zagajewski, 2008; Jarocińska, 2011). If the pixel of an image consists of objects of different reflectance (e.g. buildings,

roadway with asphalt or concrete surface, tree crowns, gardens and lawns), then the NDVI is the resultant of the NDVI coefficients of the individual features, weighted by their share in the pixel area (Wirth et al., 1987). To some extent, the NDVI also reacts to the vertical structure of plant complexes – it is higher in areas with extensive, multi-storey vegetation (Krukowski, 2018). The NDVI can be used in analysing both aerial and satellite images, in assessing the amount of plant biomass at different spatial scales, from individual arable fields to global vegetation zones (Tucker, 1979; Wang et al., 2011), recognition of vegetation (Wang et al., 2009) and its condition (Lhermitte et al., 2010; Kopańczyk & Fitrzyk, 2016), crop maturity analysis (Jackson & Huete, 1991; Panda et al., 2010), the LAI – Leaf Area Index (Colombo et al., 2003), the amount of radiation absorbed by plants through photosynthesis (Badgley et al., 2017), biomass, phenological studies (Lüdecke et al., 1996; Zarzecki & Pasierbiński, 2009; Yan et al., 2018), water stress (Niedzielko et al., 2012), and many others. Nouri et al. (2014) used high resolution satellite images from WorldView-2 mission to determine the relationship of the intensity of field evaporation (evapotranspiration) between areas classified as urban green areas and green areas designated on the basis of the NDVI index, consequently determining the level of water stress for classified green areas and those designated on the basis of satellite images. The NDVI allows to differentiate land cover within agglomerations, which could often be considered (in other studies) as homogeneous, such as meadows (Kosiński et al., 2008; 2012; Kosiński & Kozłowska, 2003), which indicates high sensitivity of the index to plant cover diversity. These results are to some extent linked to the observation that the variability of the NDVI in an area covered by natural vegetation shows a greater correlation with climatic conditions than in areas of intensive human use (Musiał, 2009). The above-mentioned features of NDVI mean that it is often used in urban space studies (Gupta et al., 2012).

Different authors define the NDVI limits in different ways in order to distinguish vegetation-covered areas from others located in Poland. Kubalska

and Preuss (2014) used digital aerial photographs (with 10 cm spatial resolution) and aerial laser scanning data (density 15 points m^{-2}) to take stock of green areas in Wrocław city, Poland. They adopted a minimum value of $NDVI \geq 0.1$ calculated from the pixels of an orthophotomap made with the use of an infrared channel (the so-called CIR – Color InfraRed). Krukowski et al. (2016) and Krukowski (2018) used IKONOS 2 images and decided to separate two classes of urban greenery: high and low. The first step was to adopt the $NDVI > 0.2$ threshold to separate the vegetation, then the training fields for the two previously mentioned classes were determined and a supervised classification of green areas was performed. They observed higher values of the index for high vegetation, therefore they corrected the threshold discriminating this vegetation to the value of $NDVI = 0.35$. Będkowski and Bielecki (2017) evaluated the availability of greenery based on the NDVI calculated from the Landsat 8 image. A large part of the city was characterised by index values between 0.2–0.3. It has been found that these are areas of the city where development is accompanied by well-developed greenery. Worm et al. (2019) adopted a low NDVI threshold of 0.1 for the purpose of distinguishing plant cover in the city of Lodz on the basis of a CIR aerial orthophotomap. The same boundaries in the study of urban vegetation in the Ursynów district of Warsaw were adopted by Pyra and Adamczyk (2018). For the purposes of analysing vegetation, understood as an element of the Green and Blue Infrastructure, Pluto-Kossakowska et al. (2018) assumed that the optimum range of NDVI values is $< 0.2, 1 >$ when using an aerial CIR orthophotomap, and $< 0.5, 1 >$ for Sentinel-2 images. Michałowska and Hejmanowska (2008), on the other hand, calculated the NDVI differences between 1979 (Landsat MSS) and 2000 (Landsat +ETM) to show changes in plant cover in the area of the Słowiński National Park, and concluded that the value in the range of -0.41 to +0.41 means areas with minor changes. Tomaszewski et al. (2011) assumed that MODIS pixels with an NDVI value lower than 0.3 represent areas without vegetation, while those with a value above

0.7 represent areas with intensive vegetation. Values in the range $0.3 < NDVI \leq 0.7$ are related to partial plant cover.

NDVI values are generally calculated with precision to two decimal places – e.g. Walker et al. (2012) in their study of green cover in North American and Eurasian Arctic transects, Robinson et al. 2017 in their study of the variability of NDVI values over 30 years based on image data from three different Landsat missions (5, 7 and 8).

The experience of many authors shows that it is not possible to indicate unambiguously how to interpret a given NDVI level, or with which forms of land cover it can be associated. It is necessary to check the applicable threshold values experimentally each time, in order to distinguish between plant cover and other forms, and to demonstrate the diversity within the vegetation.

In addition the NDVI indicator can be used as one of the image channels along with selected other images, e.g. for classification purposes (Pyra & Adamczyk, 2018). Supervised and unsupervised classification based on pixels in Pléiades images were tested by Trisakti (2017), who achieved high accuracy using a combination of the NDVI vegetation index and blue channel, while Sulma et al. (2016), based on NDVI spectral indices, NDWI (Normalized Difference Water Index) and MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), distinguished vegetation covered areas from other urban areas of Jakarta (Indonesia) with an overall accuracy of 86%.

NDVI can be calculated on the basis of image data from many satellite systems. Due to the different spatial, spectral and radiometric resolution of these systems, as well as to the variability of natural conditions between sometimes even close dates of images, variability of the index values determined is inevitable. This is particularly true for comparisons of individual observations, but as shown (Turlej, 2009), the differences between the results averaged over certain time periods are insignificant (approximately 0.1 NDVI). This gives rise to the use, if necessary, of different systems (after appropriate transformation of their resolution parameters).

The share of green areas can be one of the important indicators (environmental dimensions) used, in addition to social and economic dimensions, in analytical analyses of the sustainable development of a city (Szarek-Iwaniuk, 2021).

MATERIALS

Land use and land cover databases used in Poland

The most important repositories presenting geospatial data in Poland are: Land and Property Register (EGiB), Topographic Object Database (BDOT), General Geographic Object Database (BDOO) and thematic maps created by local geodesy centres, e.g. greenery map according to the Lodz Centre of Geodesy – ŁOG (Table 4). Databases are a public resource, representing the type of land use in terms of functions.

Unfortunately, these databases are not consistent. Data from individual sources use different classification systems and are inconsistent in spatial terms (e.g. recreational areas in the LPR base, forest or bush areas in the TOD base or a park in the LCG urban greenery map that cover the same fragment of terrain but differ in terms of individual boundaries – Fig. 1).

The study used data from the Lodz Centre of Geodesy (LCG), as well as the LPR database, satellite images and demographic data from the voter registry.

Data of the Lodz Centre of Geodesy (LCG)

As part of its tasks, the Lodz Centre of Geodesy creates cartographic studies showing green areas within the administrative boundaries of the city of Lodz.

The geodetic data are the basis for statistics on the size of green areas reported in the state statistics, i.e. in the yearbooks of the Statistics Poland and in the Local Data Base (Fig. 2).

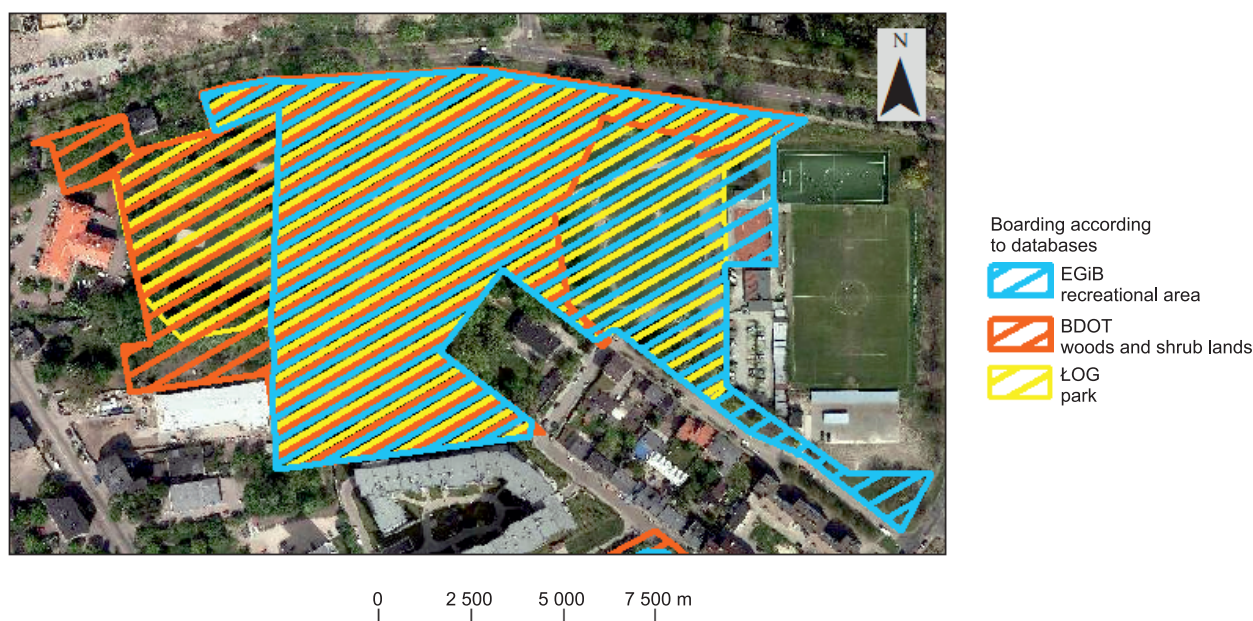


Fig 1. Comparison of boundaries of green areas according to different databases (EGiB = Land and Property Register, BDOT = Topographic Object Database, ŁOG = Lodz Centre of Geodesy)
Source: own preparation based on BDOT.

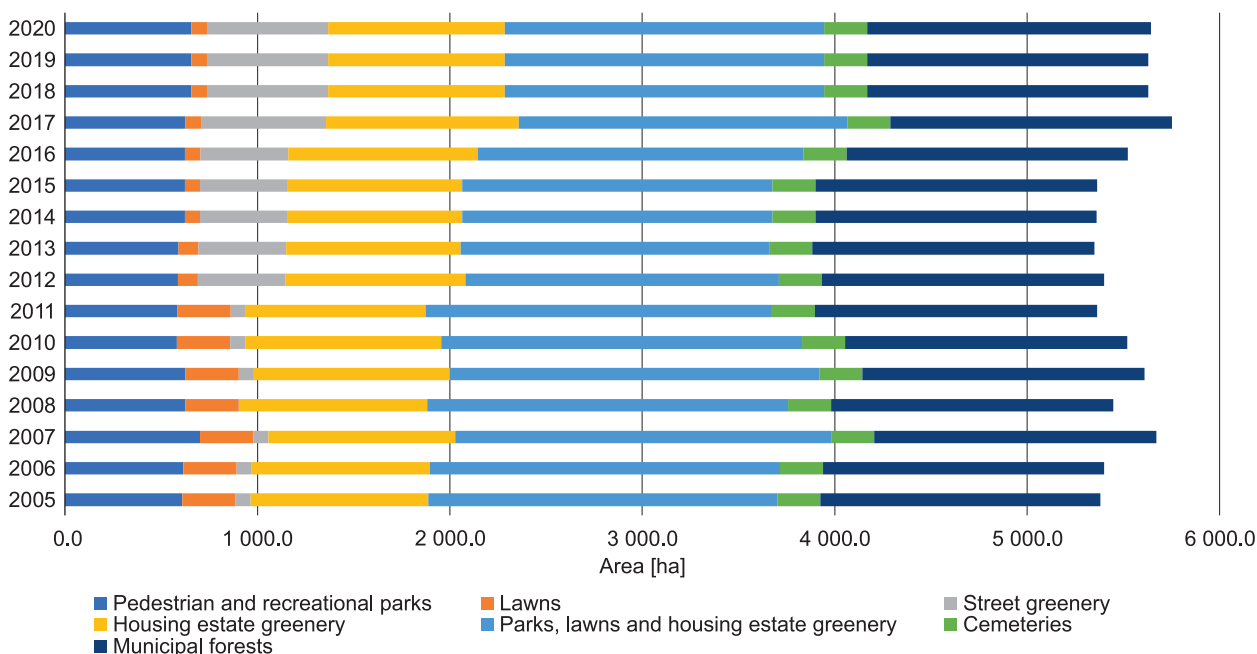


Fig. 2. Greenery in Lodz in 2005–2020 according to the Statistics Poland (Local Data Bank)
Source: own preparation based on CSO data.

Land and Property Register (LPR)

The LPR database primarily contains information on properties collected using terrain or photogrammetric surveying (Borsa et al., 2017). It is used in the performance of tasks in the field of economic planning, spatial planning, tax and benefit assessment,

marking properties in land and mortgage registers, public statistics, and property management. The LPR data are used, among others, by tax authorities, as well as local government units (municipalities) for the purpose of spatial inventory of the area they cover (Notice, 2019). The LPR includes information on the location, boundaries, surface area and types of land use (Table 1).

Table 1. Types of land use according to LPR, their area and share in the city of Lodz

Type of use according to LPR	Surface area [km ²]	% of the city
1	2	3
Residential areas	46.17	16.00
Industrial areas	13.02	4.51
Other built-up areas	24.36	8.44
Urbanised undeveloped areas or under development	10.24	3.55
Built-up agricultural land	6.34	2.20
Recreational areas	10.95	3.79
Roads	30.84	10.69
Ecological use	0.91	0.31
Mining land use	1.07	0.37
Forests	24.69	8.55
Wooded and bushed land	3.77	1.31
Wooded and bushed land on agricultural land	0.11	0.04
Wasteland	1.23	0.43

cont. Table 1

	1	2	3
Pastures	6.66	2.31	
Arable land	92.60	32.08	
Orchards	2.57	0.89	
Other communication areas	2.78	0.96	
Railway areas	7.11	2.46	
Land reserved for the construction of public roads or railway lines	1.08	0.37	
Miscellaneous land	0.34	0.12	
Land under ditches	0.27	0.09	
Land under surface water flowing	1.21	0.42	
Land under surface water still	0.14	0.05	
Land under ponds	0.19	0.06	

Source: Lodz Centre of Geodesy (2018).

Population data

The population data necessary to carry out this study comes from the electoral register of voters of 30 June 2016 (UMŁ).

The distribution of the population was calculated as follows:

1. On the basis of vector layers of the Land and Property Register and information about the area of building outlines and the number of floors, the total area of all floors of each residential building in the city was determined.
2. The number of inhabitants in each of the 36 administrative auxiliary units of the city of Lodz was determined. Necessary data came from the Lodz Centre of Geodesy (vector data containing the boundaries of auxiliary units) and from the register of voters the Lodz City Hall (number of inhabitants per individual housing estate).
3. The size of the housing space per capita in individual administrative auxiliary units was calculated. The obtained values ranged from 35.06 m² to 115.57 m² per capita¹.

¹ For comparison, in 2002, the average floor area of an apartment in Lodz was 60.7 m² (20.5 m² floor area per capita). One flat was inhabited by 2.95 people and one chamber by 0.84 people (Parysek, 2004). In the years 2011–2016, according to the Central Statistical Office (Yearbook, 2015), the average floor area of a flat in Lodz was 53–54 m², with 27–28 m² per person. When comparing the indicators, one should remember about changes in the number of inhabitants of the city (725,055 in 2011 and 696,503 in 2016).

4. On the basis of the index value set out in point 1 and point 3, the approximate number of inhabitants of each residential building was determined.

The allocation of the number of inhabitants to the primary fields was made taking into account the relevant shares of buildings contained therein. Based on the above calculations, the map shows the distribution of population in Lodz (Fig. 3), and as a consequence, the spatial ratio of population distribution to areas designated as greenery on the basis of satellite images is also presented.

Satellite data

We use the Landsat 8 satellite scene from 3 July 2015 (path 189, row 024), obtained from the US Geological Survey (EarthExplorer). At the time the study was being carried out, it was the latest available image from the full vegetation season, on which the area of Lodz was not covered by a layer of clouds. Spectral bands 4 (Red) and 5 (NIR) were used to calculate the NDVI (Rouse et al., 1973), showing both the quantity and quality of greenery (Forster, 1982) in a given location, according to a classic formula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Since the image of the city of Lodz was entirely within the scope of the scene and no comparisons with other cities were planned, no sun and atmospheric correction of the images was made. The data down-

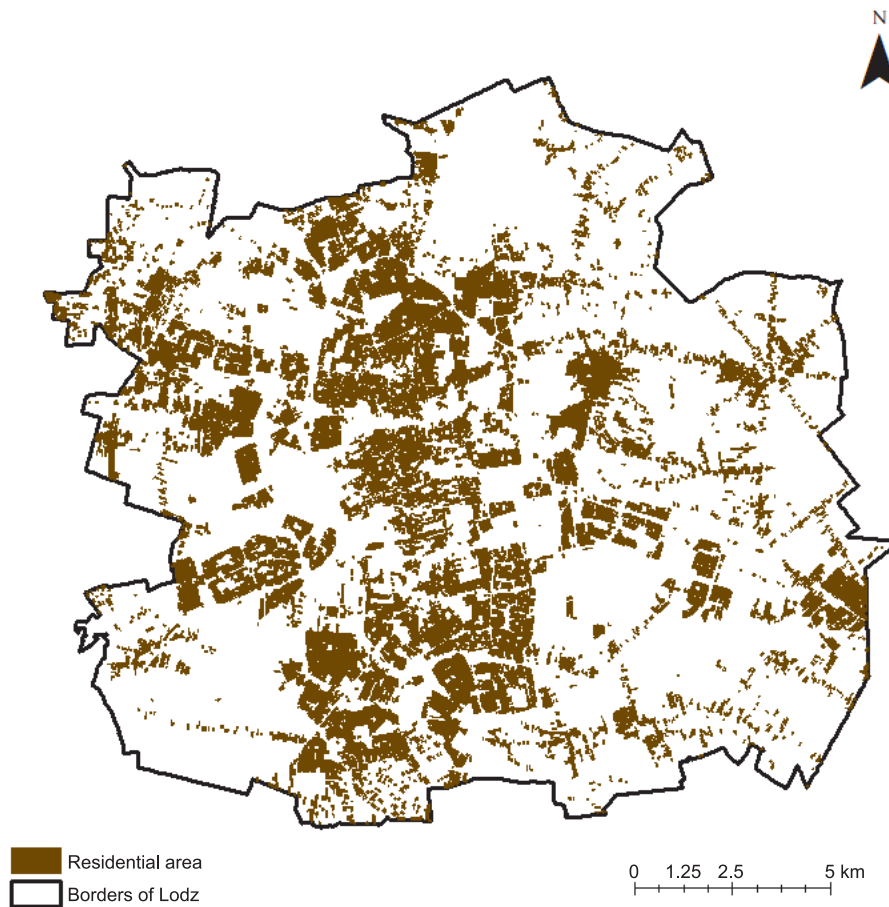


Fig. 3. Population distribution in Lodz
Source: own preparation based on the electoral register of voters (2016).

loaded using the Earth Explorer USGS browser has a topographic correction (USGS, 2020). The calculated NDVI values were between -0.18 and 0.63 (Fig. 4).

In an area covered by a single pixel, there are usually many different forms of land cover/development, not just greenery (Wirth et al., 1982; Kressler et al., 2000). In this case, the recorded NDVI value is the weighted average of the index value of all objects in the pixel area, with the weight being the share of the area of these objects in the pixel area (Figures 5–6):

$$NDVI = \sum_{i=1}^n a_i NDVI_i$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

where:

- a_i – the share of the i -th object in the pixel area,
- $NDVI_i$ – NDVI value of the i -th object located in the pixel,
- n – number of forms of land cover/use.

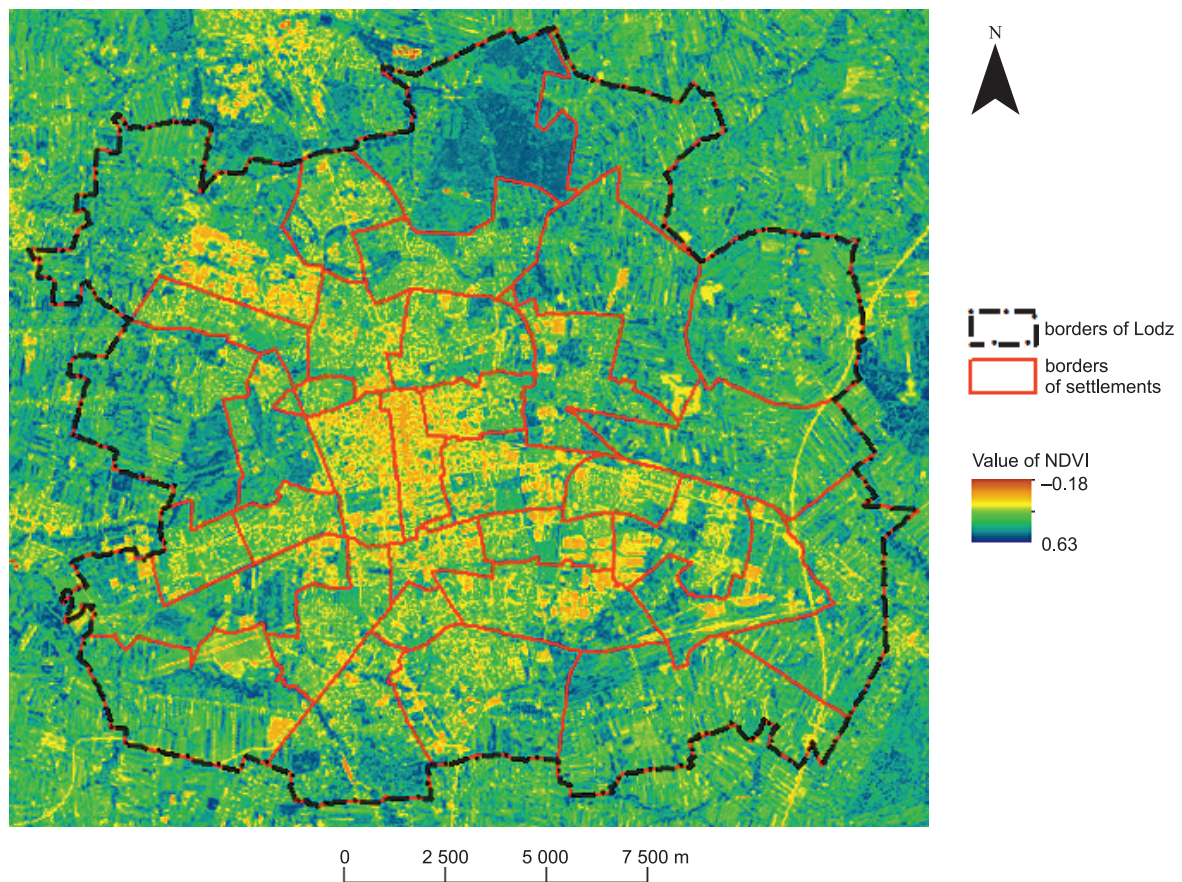


Fig. 4. NDVI for the area of the city of Lodz in the raster 30×30 m
Source: own preparation based on Landsat 8 image.

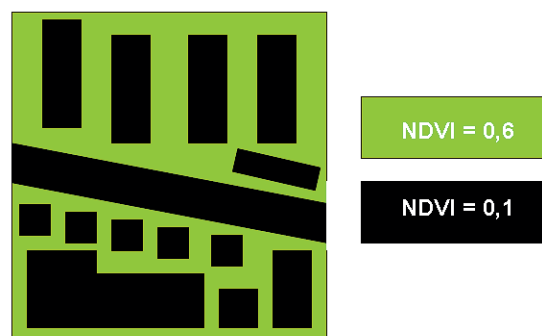


Fig. 5. Method of establishing NDVI values for areas composed of objects with different NDVI values. If the share of built-up areas and green areas are equal (50% each), the NDVI for the whole area is 0.35
Source: own preparation.

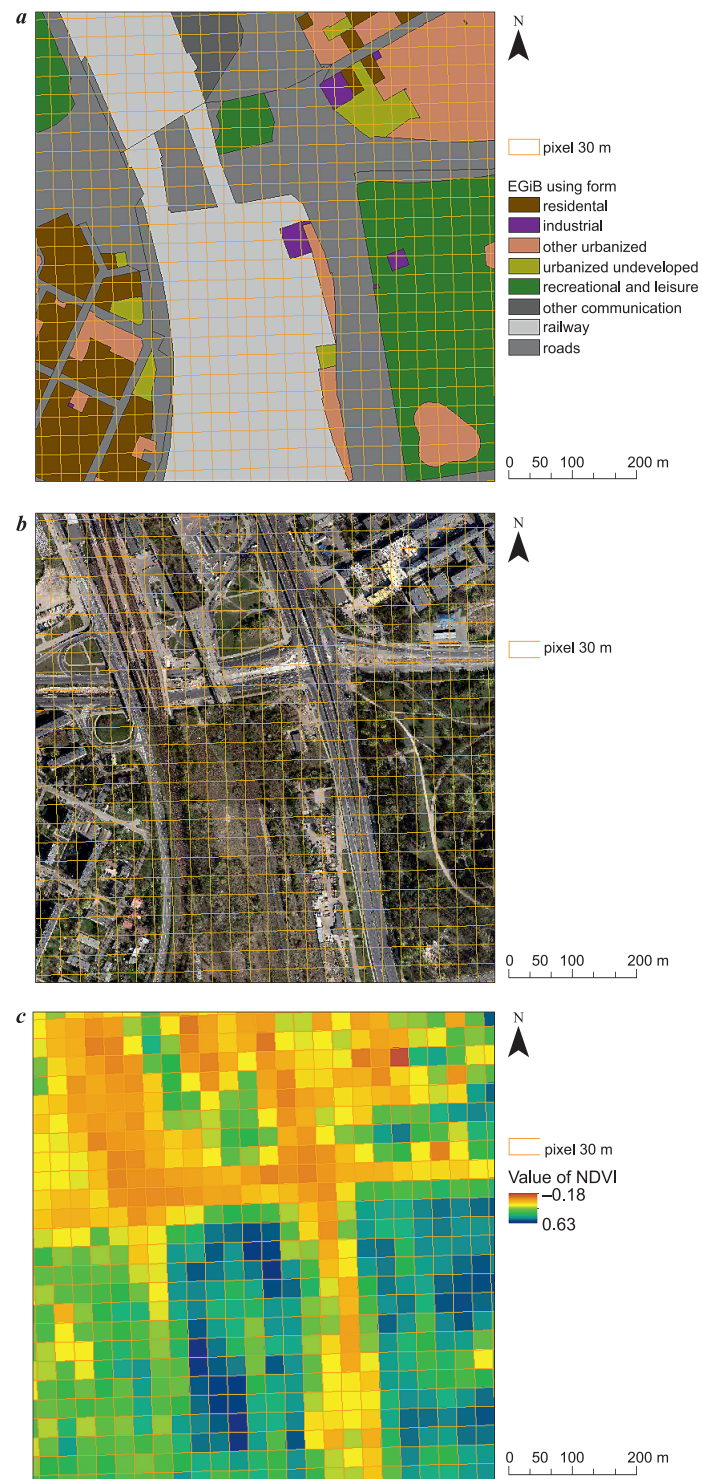


Fig. 6. Forms of land cover and registered NDVI values in pixels 30×30 m: a) objects according to LPR database, b) fragment of RGB composition of orthophotomap and grids of Landsat 8 image (30×30 m), c) calculated NDVI values
Source: own preparation based on EGiB, orthophotomap and Landsat 8 image.

METHODS

NDVI of selected functional areas of the city

Areas classified as green areas we focused on, include forests, parks, squares, lawns and cemeteries (Fig. 7, Table 2). The share of these green areas in the total city area is 10.50% (30.77 km²). They are largely covered with vegetation, but not fully, which is reflected in their average NDVI values (Fig. 8).

Table 2. The green areas in Lodz

Name	Area [km ²]	Share in the city area [%]
Forests	20.19	6.89
Parks	7.41	2.53
Lawns	0.94	0.32
Cemeteries	2.05	0.70
Squares	0.18	0.06
Total greenery	30.77	10.50

Source: own preparation based on LCG data.

Apart from the official greenery, there are many other areas with well-developed vegetation in the city, which successfully perform many important functions. For the precise characterisation of greenery resources, it is therefore necessary to also take into account the vegetation associated with undeveloped areas, i.e. areas called open according to Cieślak (2006) and residential and industrial development, traffic routes, watercourses, post-industrial wastelands, mines, etc. For a full balance, greenery associated with agricultural land (orchards, meadows, arable land) cannot be omitted, as the crops grown also fulfil many positive environmental functions (Lutz & Felici, 2008). According to Trzaskowska (2011) in analyzes of urban greenery, spontaneous, natural and synanthropic vegetation are rarely taken into account. It is most often not accepted by the society due to low aesthetic values and deteriorating sense of security. Nevertheless, it plays an important role, as it complements the spatial continuity of the urban greenery system and for this reason it should be used in the development of urban development strategies

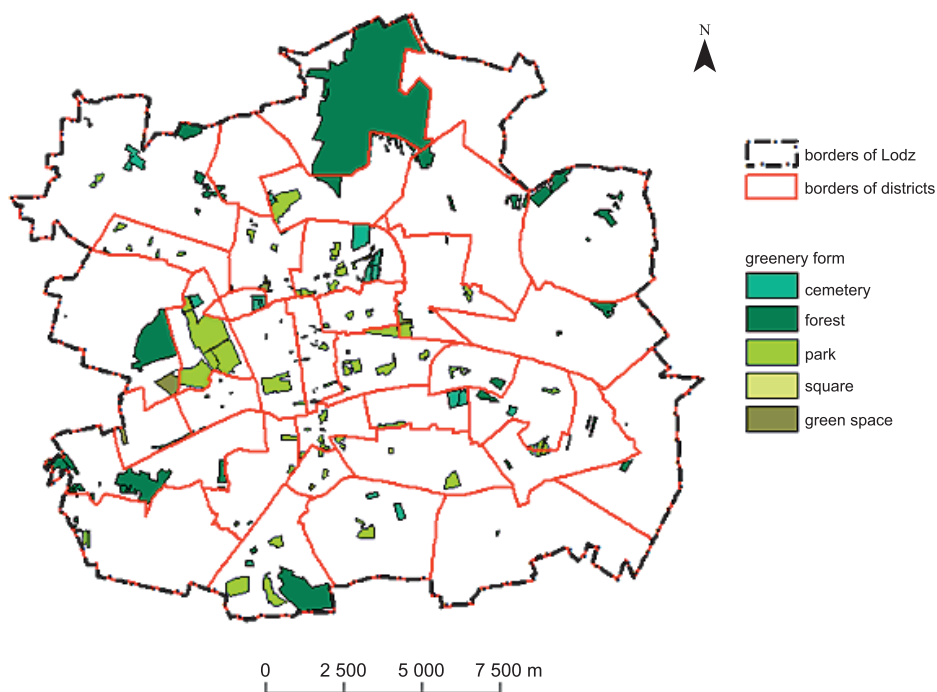


Fig. 7. Green areas in Lodz

Source: own preparation based on LCG data.

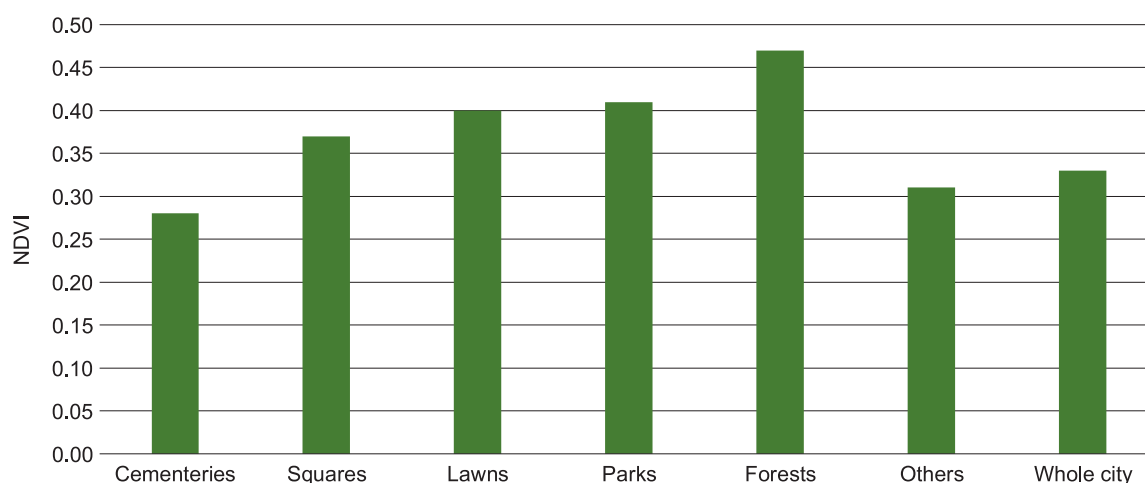


Fig. 8. Average NDVI values of selected functional areas of the city of Lodz
Source: own preparation based on LCG data.

in accordance with the principles of sustainable development.

The presence of greenery is expressed in the NDVI value calculated for each pixel of the satellite image. The distribution of NDVI values (Figures 9–11) is a good characteristic of the variability of vegetation in individual parts of the city. On the basis of NDVI distributions, typical ranges of values for this index were established for areas considered as greenery. These limits have been determined by establishing the modal value for the area under analysis and then including in the range the successive ranges the values adjacent to the modal value until the required percentage of the area is reached. Since such a procedure does not achieve a value exactly equal to the assumed value (68% of pixels in this case), its completion was decided when the next range was included and the number closest to 68% was reached (with the lowest possible undervalue or excess). The adopted method of determining the range for NDVI is similar to that of the mean value and standard deviation, which is, however, more appropriate for variables with distributions close to normal distribution (Wasilewska, 2009).

The established NDVI ranges have been used to designate areas of the city which, although not officially classified as green areas, have the same values of this index. In other words, areas with a level

of greenery development similar to known forms: forests, parks, lawns, squares and cemeteries were indicated, so one can expect that in a given location there are similar developed vegetation complexes (Table 3, Figures 12–13).

Green areas and population distribution

In order to assess the living conditions and quality of life of the city's residents, it is important for the city's green spaces to be located in the areas they live in. For the analysis of spatially variable factors of the urban environment, it is recommended to use a network of basic fields, with a hexagonal grid being the best. However, there are no clear guidelines as to their size (Szarek-Iwaniuk, 2020). We have adopted 90 × 90 m grid, corresponding to groups of 9 (3 × 3) pixels of Landsat 8 satellite image as residential areas. The rationale for choosing this size of the primary field was the desire to take into account the condition of vegetation in the place of residence and its immediate surroundings. It was assumed that the immediate surrounding means a space contained within a circle with a 50 m radius, whose area is approximately equivalent to a square of 90 × 90 m. Consequently, the NDVI values determined had to be converted, by averaging, from a grid of pixels to a grid of 90 × 90 m primary units (Fig. 9). This operation

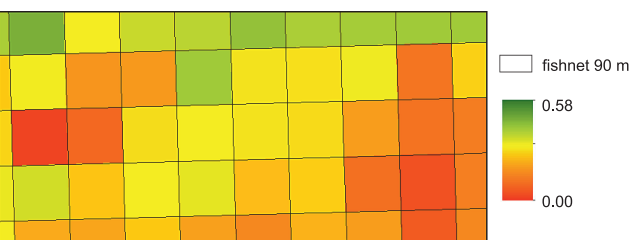
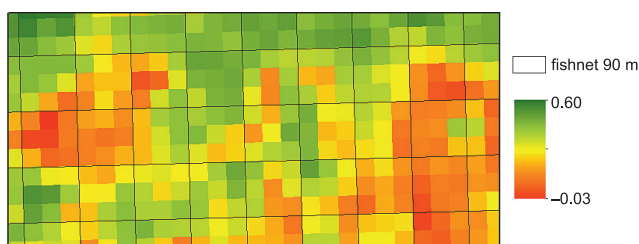


Fig. 9. Conversion of NDVI from a 30×30 m pixel grid of the Landsat 8 image into a 90×90 m grid of primary fields
Source: own preparation based on Landsat 8 image.

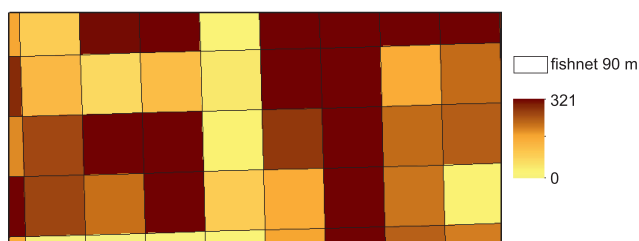
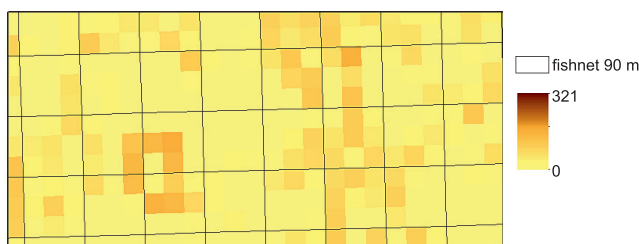


Fig. 10. Population distribution in the grid of $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ primary fields. Source: own preparation based on the electoral register of voters (2016)
Source: own preparation.

only slightly changed the range of the index to values from -0.11 to 0.60.

For the purpose of the planned analyses, the number of people living was determined for each of the primary fields of a square grid of 90×90 m, corresponding, as was the case with the NDVI value, to the size and range of 9 pixels of the satellite image.

The grid schematically divides the city space, including individual housing estates and individual buildings, into smaller sections. The way of calculating the approximate number of inhabitants in the individual primary fields was presented in the chapter Population data.

Tabular lists were prepared (Table 3).

RESULTS

The distribution of NDVI values for many functional areas of the city clearly shows that in some areas the share of greenery in the coverage of these areas is large. The NDVI even reaches values typical of forests and parks in many places (such as wastelands).

The average value of NDVI for the whole Lodz is 0.33 and takes values from -0.18 (surface waters) to 0.63 (forests). The distribution of NDVI values within the city limits is close to the normal distribution with a predominance of areas with a low NDVI (Fig. 11a).

When comparing the NDVI distribution of individual forms of land use, it can be seen that in most cases there is no specific level of greenery for particular areas (Fig. 12).

However, there are land use types that are in practice limited to a narrow spectrum of NDVI values, such as forests. The grid size of 90×90 m, as well as the high fragmentation of land use, means that in many cases the NDVI value represents more than one form of land cover (utility function). The analysis shows that as much as 32% of land use in LPR has an area equal to or less than 900 m^2 , i.e. less than one image pixel. However, it should not be forgotten that the functions of greenery are not limited to the area it occupies, but also very important for adjacent areas.

An analysis of the distribution of NDVI values for urban-specific land use forms (residential, industrial and wasteland), not associated with greenery, was also carried out. The selected areas vary considerably in terms of the distribution of NDVI values. Residential areas show a distribution close to normal, with the median established for $\text{NDVI}=0.3$ (Fig. 13a). The graph for industrial areas (Fig. 11b) with a high prevalence

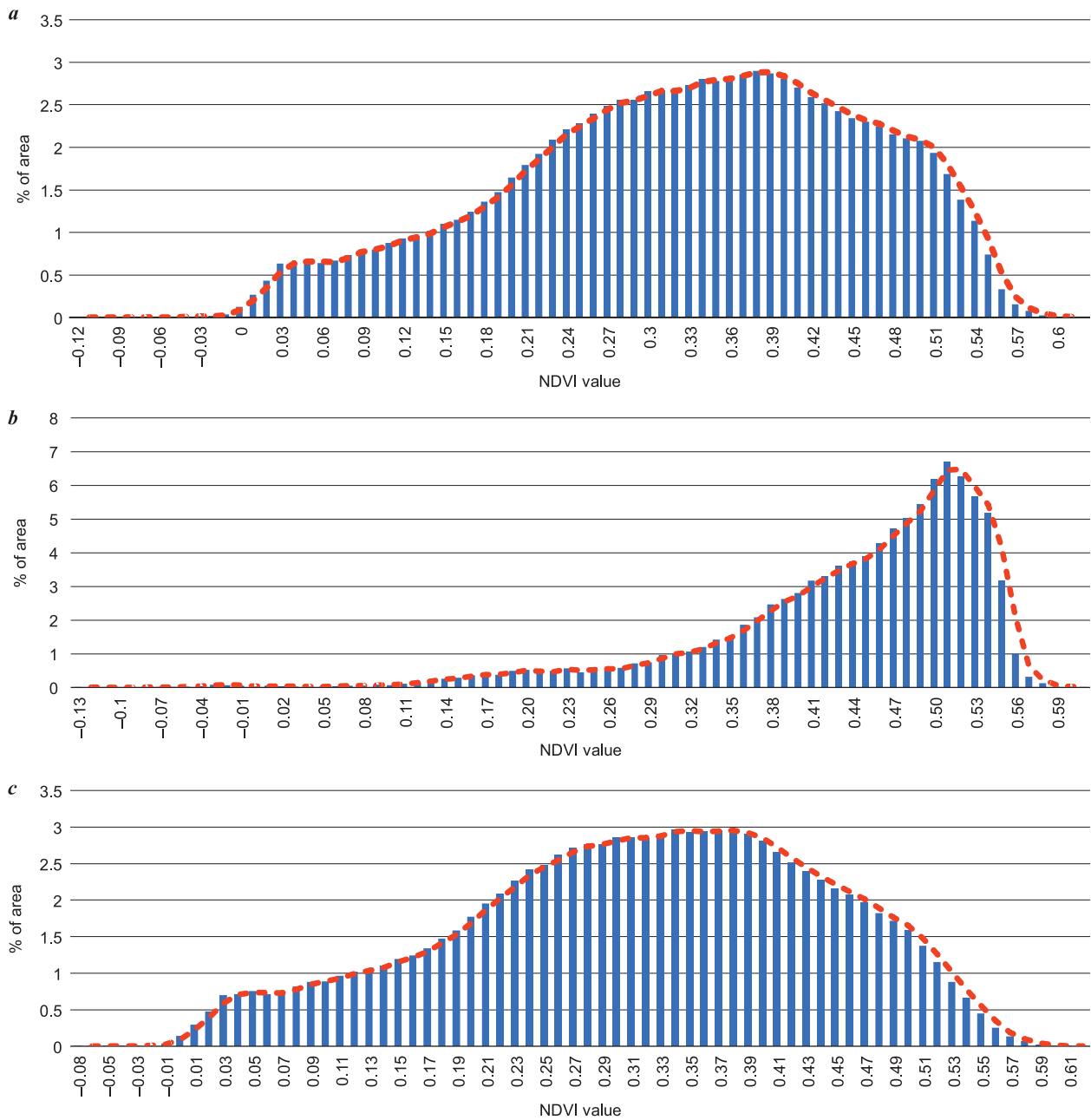
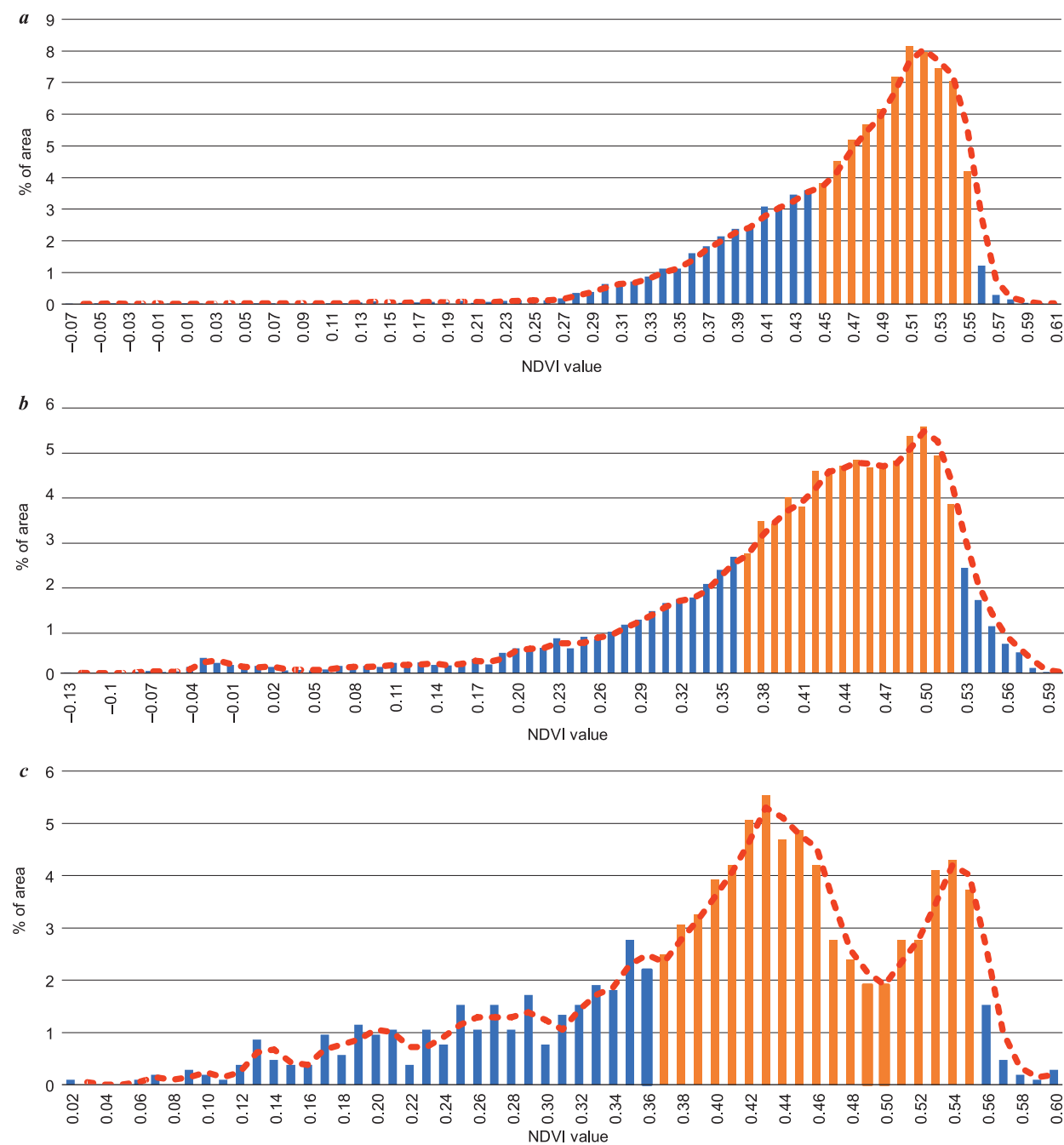


Fig. 11. NDVI distributions in the range $\Delta\text{NDVI} = 0.01$ for: a) the whole city, b) areas officially classified as green areas (forests, parks, lawns, squares, cemeteries), c) other areas not including green areas

Source: own preparation based on Landsat data.



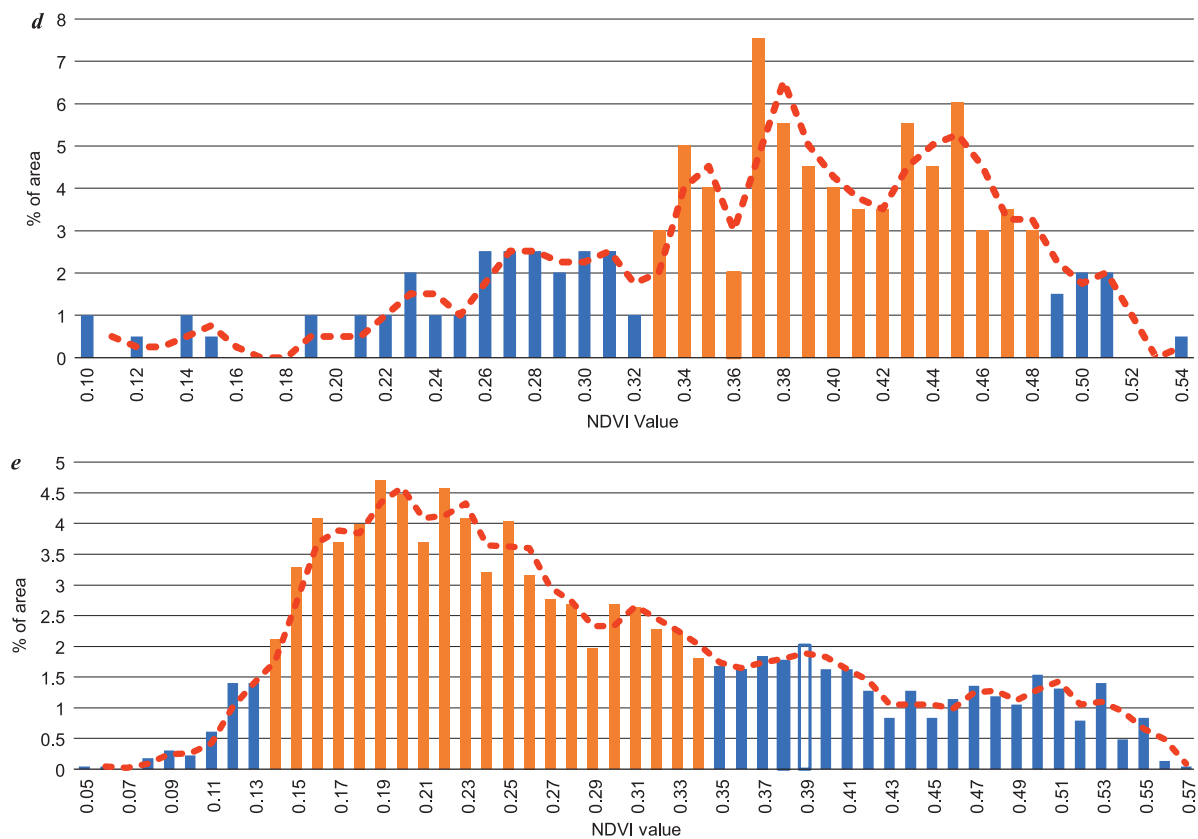


Fig. 12. NDVI distributions in ranges of $\Delta\text{NDVI} = 0.01$ for areas officially recognised as green areas in Lodz: a) forests, b) parks, c) lawns, d) squares, e) cemeteries. Red is for the range of typical (68%) NDVI values

Source: own preparation based on Landsat data.

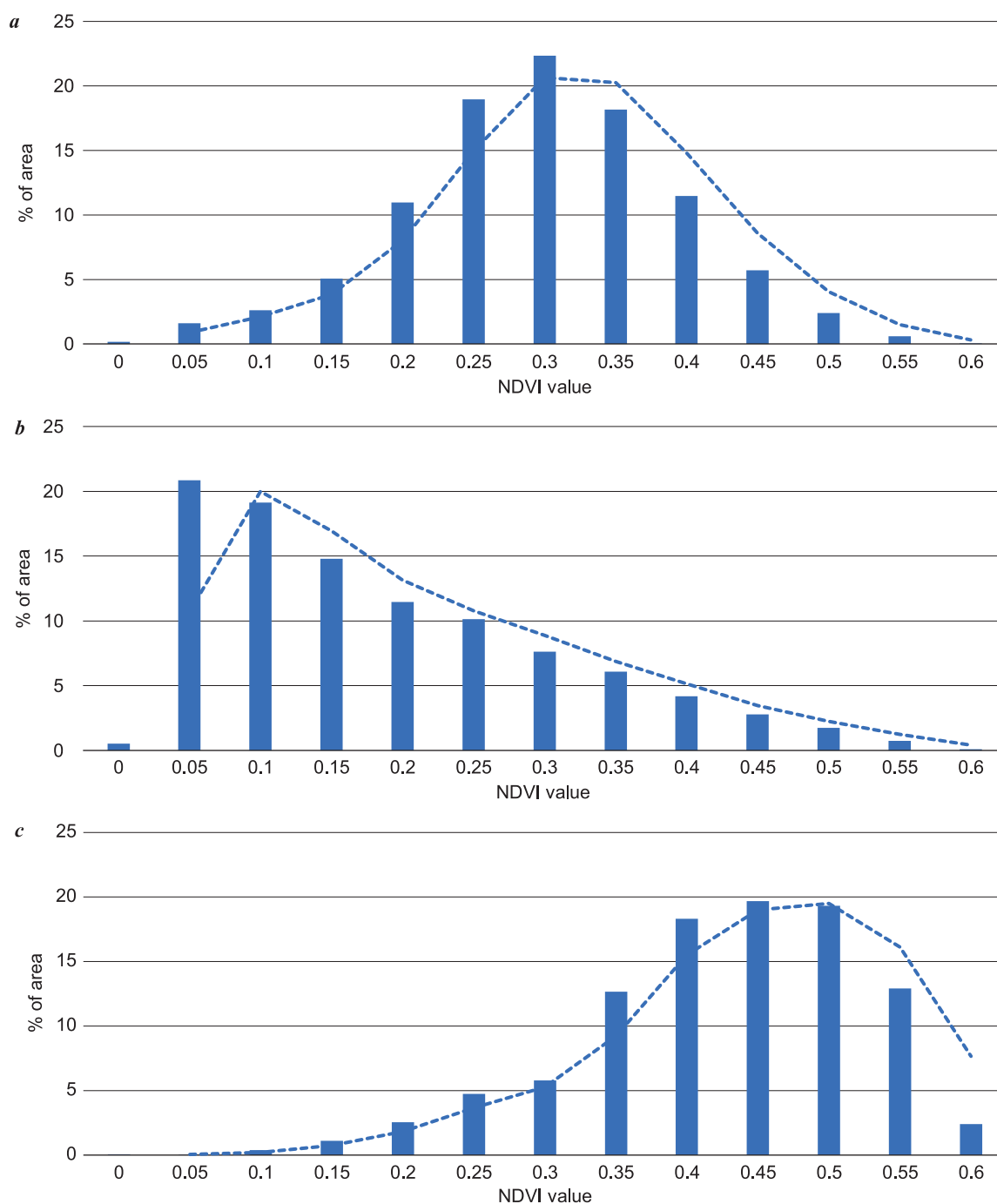


Fig. 13. NDVI distributions within $\Delta\text{NDVI} = 0.05$ for areas of Lodz not classified as green areas: a) residential areas, b) industrial areas, c) wastelands

Source: own preparation based on Landsat data.

of low values and a median = 0.05 clearly shows that greenery is very rare in these areas. The situation in wastelands, where the distribution of NDVI values (Fig. 11c) resembles the distribution for green areas, is the opposite. This is because, after some time, vegetation enters such areas through spontaneous succession (Rostański, 2000).

Based on the determined characteristic NDVI values for individual types of green areas in Lodz, maps were drawn of areas within the borders of Lodz, where the density and quality of vegetation is similar to the specific forms of land use (Figures 14–15), i.e. the NDVI value is within the above mentioned ranges.

The data thus collected were compared with information on the number of inhabitants living in specific characteristic areas (Table 3).

Table 3. Share in the city's area of areas where the NDVI value corresponds to ranges typical for green areas

Object	Typical NDVI range for particular green areas	City area where NDVI is comparable to typical NDVI range		Number of inhabitants	
		NDVI range	[km ²] [%]	[thousands] [%]	
Forests	0.45-0.55		56.11 19.16	3.72	0.57
Parks	0.37-0.52		110.73 37.81	26.99	4.14
Lawns	0.37-0.55		118.78 40.56	27.04	4.14
Cemeteries	0.14-0.39		169.47 57.87	502.85	77.06
Squares	0.33-0.48		137.43 46.93	94.68	14.51
Total greenery	0.42-0.55		77.78 26.56	7.46	1.14

Source: own preparation based on Landsat data.

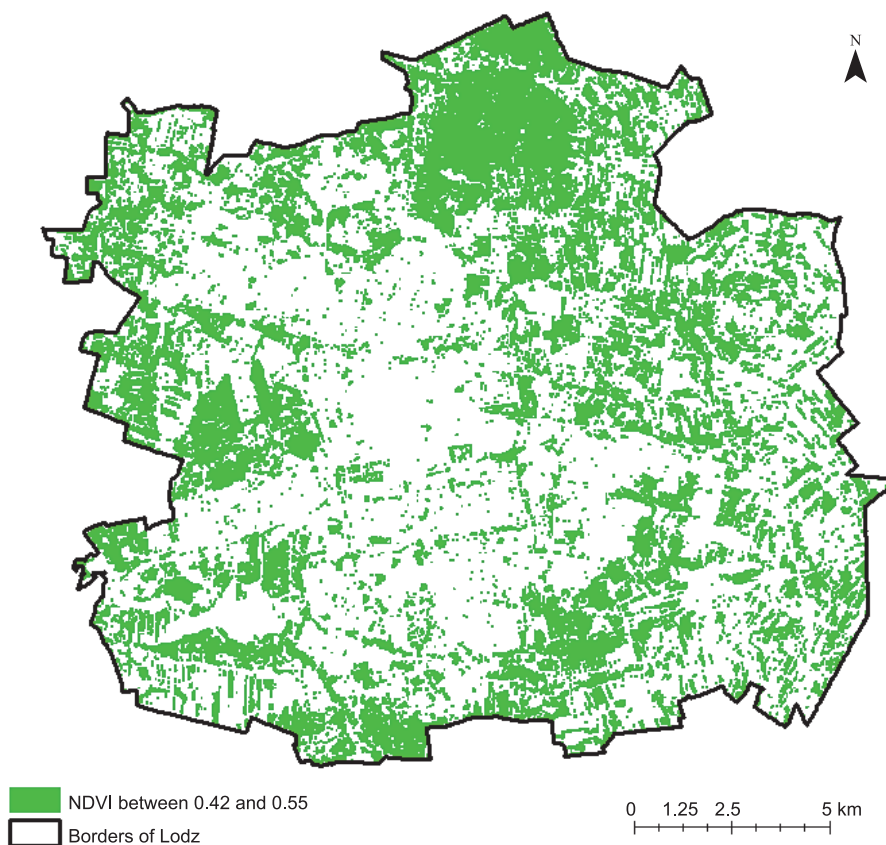
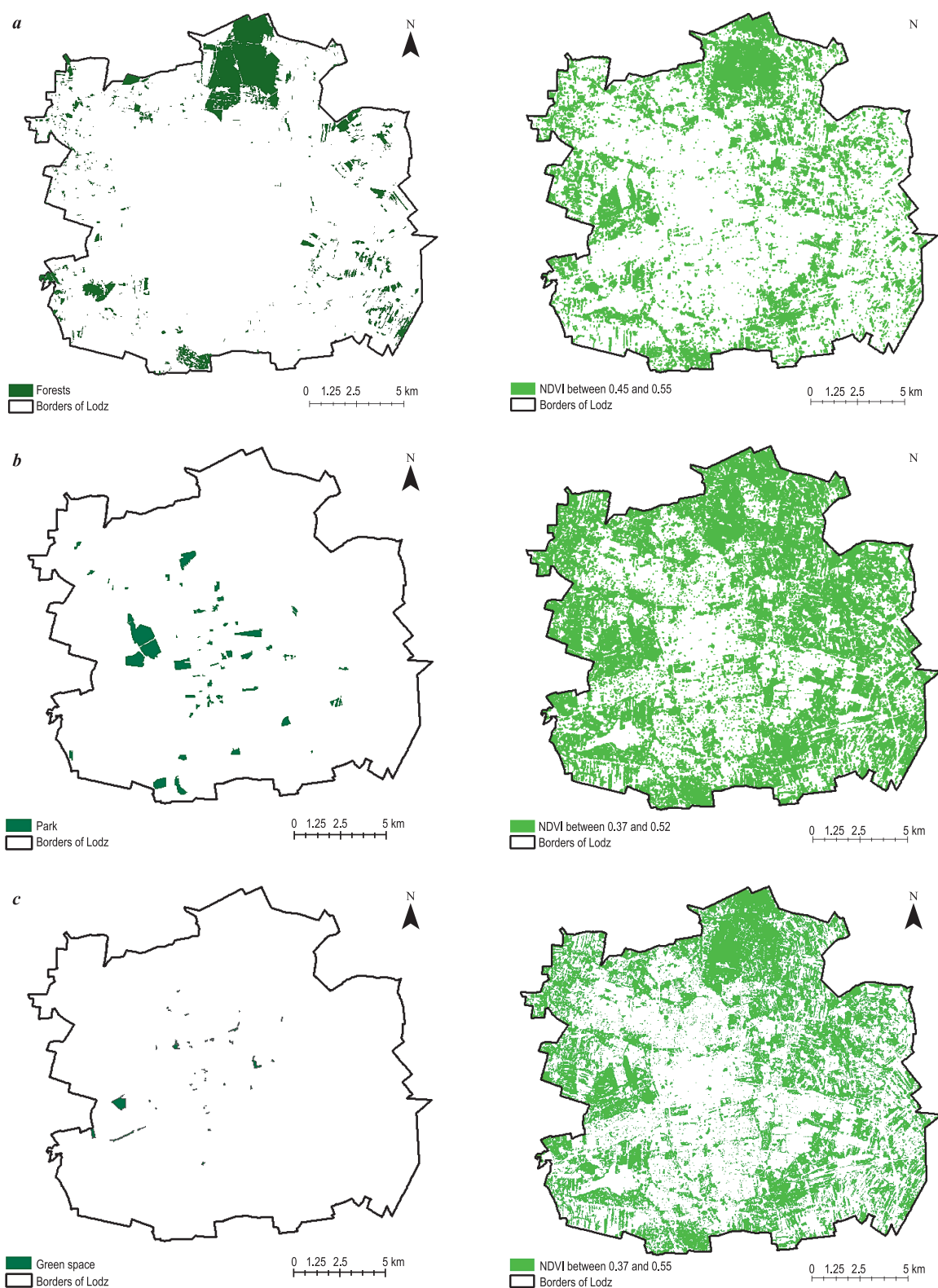


Fig. 14. Areas with an NDVI value within the limits typical for areas officially recognised as greenery in Lodz ($0.42 < \text{NDVI} \leq 0.55$)

Source: own preparation based on own research.



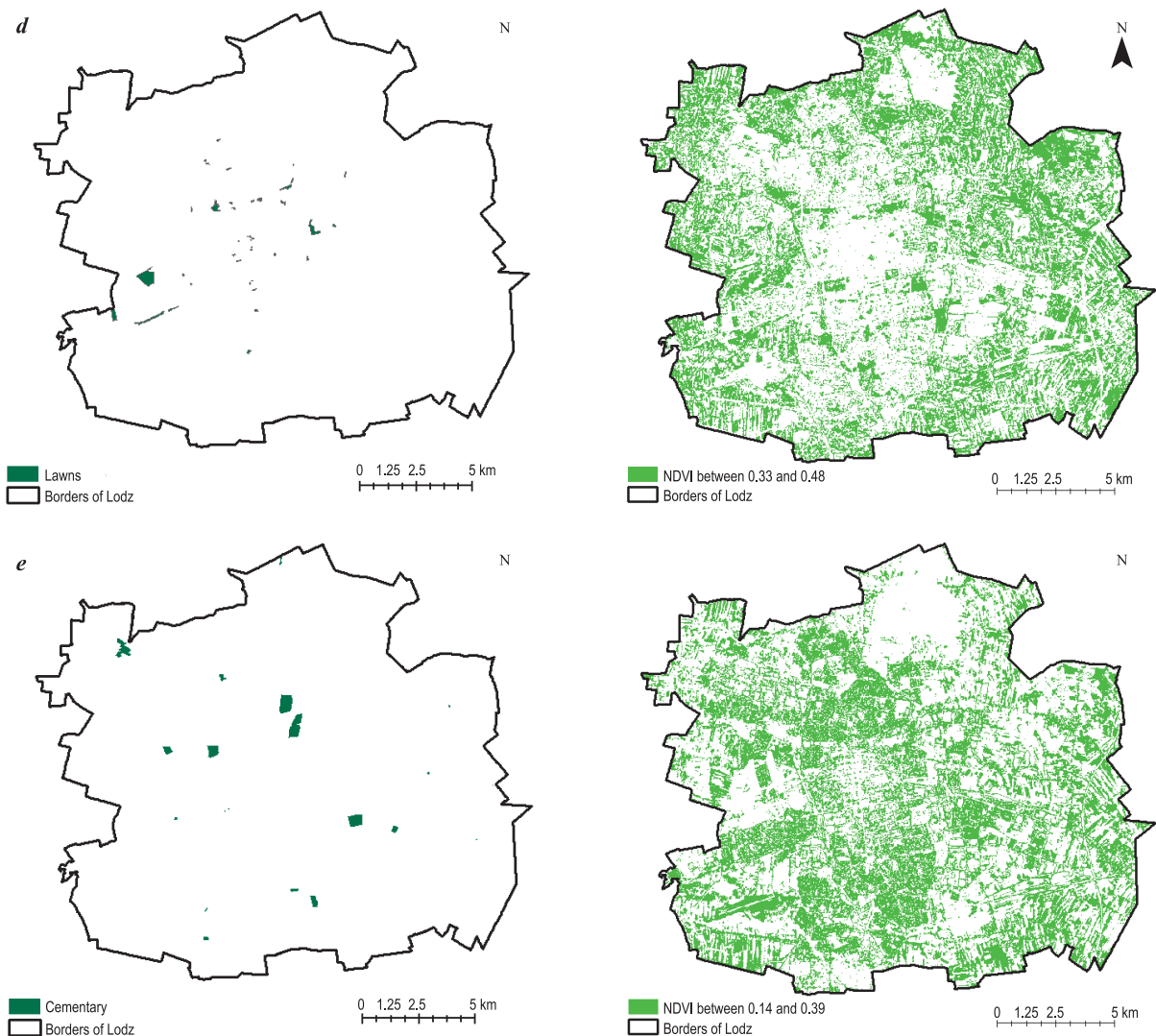


Fig. 15. Location in the Lodz city of (on the left): a) forests, b) parks, c) lawns, d) green squares, e) cemeteries and (on the right) areas where the NDVI value corresponds to their typical ranges (compare with Fig. 10 and Table 3)

Source: own preparation based on Landsat data.

CONCLUSIONS

The presented overview maps (Figures 14–15) very visibly illustrate the fact that there are many areas in Lodz with vegetation at a level not inferior to that in areas officially classified as green areas. The area within the administrative boundaries of Lodz characterised by a similar level of vegetation development as in the areas included in public reports is over 2.5 times larger (30.77 km² to 77.78 km²). This demonstrates that more than ¼ of the city area (26.56%) does not differ in terms of greenery from the areas officially classified as green. However, it should be noted that the range of NDVI values (0.42–0.55), on the basis of which green areas were determined, was underestimated by the index value for cemeteries (0.14–0.39) and also by squares (0.33–0.48). These areas, due to the fact that they are equipped with various elements of impervious surface, have less greenery, as it mixes with surfaces covered with concrete and asphalt with very low NDVI values (Siciński, 1986). It should be noted that cemetery is defined as a green area in the Act on Nature Conservation, but in the Polish Classification of Buildings it is included in the category of buildings (intended for worship and religious activities), similarly in the Construction Law Act (Długozima, 2020).

On the opposite side, there are urban forests, which are obviously less intensively developed than the other areas of urban greenery (Łonkiewicz, 1997). In the case of Lodz, the limit NDVI values that characterise these areas to the greatest extent, are set at 0.45–0.55. Despite quite characteristic physiognomy, similar NDVI values were detected in an area of over 56 km², which is almost three times the area of the forests themselves (Fig. 15a).

In general, the results show that there are much more green spaces, comparable in terms of vegetation abundance with the official green spaces. That means the city is underestimated when talking about the greenery.

Another issue is the presence of these areas in the place where the inhabitants of Lodz live and their immediate surroundings. Despite the fact

that almost 1/5 of the area of Lodz has greenery comparable to that of the forest, only one inhabitant in 200 has direct access to it without having to leave their place of residence. In the case of the NDVI zone corresponding to parks and lawns, only 4% of the inhabitants (or 27 thousand in absolute numbers) have similar quality greenery in their place of residence. In the case of cemeteries, the situation is the opposite, as the majority of inhabitants (77%) have similar greenery in their place of residence. This shows that most cemeteries do not have the same environmental functions as forests, parks or lawns (Długozima, 2014).

It is also noteworthy that, despite the often very uneven distribution, the range determined by taking a next value of NDVI in increments of 0.05 starting from the modal values ranged between 67.32% and 68.44% of the analysed areas, while for normal distribution it is 68.3%. The above results therefore indicate that the method used to determine the characteristic values, as regards the NDVI for individual forms of land use, is correct.

It is also worth considering the possibility of linking the NDVI or other vegetation indices with features that describe other qualities of the vegetation, such as its height and volume. Proposals in this area were presented by Worm and others (2019), based on the example of the city of Lodz.

In addition to these research, it might be a good idea to take into consideration an open access spatial datasets, e.g. OpenStreetMap where users who know a specific area classify the space based on its physiognomy.

A similar approach to the assessment of the greenness of the city was adopted by Gupta et al. (2012). They made an attempt to take into account, in addition to vegetation, also the characteristics of buildings (density and height), which were to indirectly indicate the density of the population. The data they used for this purpose came from the interpretation / processing of remote sensing data, while we used information from official databases. Additionally, what distinguishes our approach is the reference of NDVI intervals to easy-to-imagine objects and related forms of covering (and filling) the space

with greenery (parks, trees, lawns, squares, cemeteries), while the above-mentioned authors adopted the artificial boundaries of the intervals values for NDVI and other products. What is common, however, is the endeavor to identify, finally, areas requiring, as a priority, greater development of green areas.

Table 4. Translated and original names and their abbreviations concerning institutions and databases used in this work

Translated name	Original name in Polish
TOD, Topographic Objects DataBase	BDOT10k, Baza Danych Obiektów Topograficznych
GGOD, General Geographic Objects DataBase	BDOO, Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych
LPR, Land and Property Register	EGiB, Ewidencja Gruntów i Budynków
LCG, Lodz Centre of Geodesy	ŁOG, Łódzki Ośrodek Geodezji

Source: own preparation.

Author contributions: authors have given approval to the final version of the article. Authors contributed to this work as follows: A.B. and K.B. developed the concept and designed the study, A.B. collected the data, A.B. and K.B. analysed and interpreted the data, A.B. prepared draft of article, K.B. revised the article critically for important intellectual content.

Funding: This research was not undertaken as part of the any project and was not funded by any grant.

REFERENCES

Badgley, G., Field, C.B., & Berry, J.A. (2017). Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis, *Science Advances*, 3, 1–5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602244>.

Będkowski, K., & Bielecki, A. (2017). Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza [Assessment of the availability of greenery in the place of residence in cities using NDVI and the Lorenz's concentration curve]. *Teledetekcja Środowiska*, 57, 5–14.

Białobok, S. (1976). Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka [Protection of trees and plants in the immediate vicinity of humans]. In W. Michajłow et al. (Eds.), *Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka* (pp. 223–245). Warszawa: PWN.

Borsa, M., Zagajewski, B., & Kulawik, B. (2017). *Teledetekcja w planowaniu przestrzennym [Remote sensing in spatial planning]*. Warszawa: Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa.

Cieślak, I. (2006). Identyfikacja układu terenów otwartych w mieście Olsztynie [Identification of an arrangement of open spaces in the city of Olsztyn]. *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*, 5(1–2), 17–24.

Colombo, R., Bellingeri, D., Pasolini, D., & Marino, C.M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86, 120–131. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00094-4).

Cudny, W. (2011). Model przemian miasta postsocjalistycznego – przykład Łodzi [Model of changes in a post-socialist city – the example of Łódź]. *Studia Miejskie*, 4, 153–159.

DeFries, R.S., Rudel, T., Uriarte, M., & Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3(3), 178–181. <https://doi.org/10.1038/ngeo756>.

Deering, D.W. (1978). *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors* (Ph.D. Dissertation). Texas A&M University, College Station.

Długozima, A., & Rej, M. (2014). Współczesne tendencje w projektowaniu cmentarzy w Europie [Contemporary trends in designing cemeteries in Europe]. *Przestrzeń i Forma*, 21, 403–416. <https://doi.org/10.3390/su13169303>.

Długozima, A. (2020). Social infrastructure of burial nature in Poland by voivodeships – conditions and changes. *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*, 19(1), 19–31. <https://doi.org/10.31648/aspa.4382>.

Forster, B. (1982). Some Urban Measurements from Landsat Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Maryland, 49(12), 1693–1707.

Gupta, K., Kumar, P., Pathan, S.K., & Sharma, K.P. (2012). Urban Neighborhood Green Index – A measure of green spaces in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 105(3), 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.003>.

Haber, Z., & Urbański, P. (2005). *Kształtowanie terenów zieleni z elementami ekologii [Shaping green areas*

- with elements of ecology]. Poznań: Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- Jackson, R.D., & Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2).
- Jarocińska, A. (2011). Modelowanie charakterystyk spektralnych heterogenicznych zbiorowisk trawiastych przy użyciu modelu transferu promieniowania [Simulating spectrum for heterogenous meadows using Radiative Transfer Model]. *Teledetekcja Środowiska*, 46, 29–42.
- Jarocińska, A., & Zagajewski, B. (2008). Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki [Correlations of ground- and airborne-level acquired vegetation indices of the Bystrzanka catchment]. *Teledetekcja Środowiska*, 40, 100–124.
- Konijnendijk, C.C. (2003). A decade of urban forestry in Europe. *Forest Policy and Economics*, 5(2), 173–186. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00023-6).
- Kopańczyk, K., & Fitrzyk, M. (2016). Satellite imagery for the improvement of SOZO database – the case study in Central and High Sudetes. *Acta Scientiarum Polonorum. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 15(1–4), 5–18.
- Kosiński, K., & Hoffmann-Niedek, A. (2008). Klasyfikacja obiektowa użytków zielonych z wykorzystaniem wieloletnich zmian NDVI i filtracji kierunkowych obrazu satelitarnego [Object grassland classification using multi-year NDVI changes and directional filtering of satellite image]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 273–282.
- Kosiński, K., Hoffmann-Niedek, A., & Kozłowska, T. (2012). Rozpoznawanie ekologicznych użytków zielonych na zdjęciach Landsat ETM+ [Ecological grasslands recognition on Landsat ETM+ images]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, 155–163.
- Kosiński, K., & Kozłowska, T. (2003). Zastosowanie wskaźnika NDVI i filtracji kierunkowej do rozpoznawania użytków zielonych oraz analizy zmian siedlisk i zbiorowisk łąkowych [Application of NDVI index and directional filtration in grassland recognition and changes of grassland habitats and communities analyzing]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 13B, 387–395.
- Kressler, F., Mucher, C.A., Steinnocher, K., & Thunnissen, H.A.M. (2000). Evaluation of medium-resolution satellite images for land use monitoring using spectral mixture analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, Part B7, Amsterdam, 709–716.
- Krukowski, M. (2018). Modelowanie kartograficzne w ocenie jakości życia w mieście – aspekt zieleni miejskiej w Lublinie [Cartographic modeling in assessing the quality of life in the city – aspect of urban greenery in Lublin]. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio B–Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 73, 7–27. <http://dx.doi.org/10.17951/b.2018.73.0.7-27>.
- Krukowski, M., Cebrykow, P., & Płusa, J. (2016). Klasyfikacja terenów zieleni w Lublinie na podstawie zdjęcia satelitarnego IKONOS 2 [Classification of green areas in Lublin based on satellite imagery IKONOS 2]. *Barometr Regionalny. Analizy i prognozy*, 2, 35–44.
- Kubalska, J., & Preuss, R. (2014). Wykorzystanie danych fotogrametrycznych do inwentaryzacji zieleni na terenach zurbanizowanych [Use of the photogrammetric data for vegetation inventory on urban areas]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, <https://doi.org/10.14681/afkit.2014.006>.
- Lhermitte, S., Verbesselt, J., Verstraeten, W.W., & Coppin, P. (2010). A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(6), 673–682. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.6.673>.
- Lutz, M., & Felici, F. (2008). Indicators to identify the agricultural pressures on environmental functions and their use in the development of agri-environmental measures. *Regional Environmental Change*, 9(3), 181–196. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0061-9>.
- Lüdecke, M.K.B., Ramge, P.H., & Kohlmaier, G.H. (1996). The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: Application to the Frankfurt Biosphere model. *Ecological Modelling*, 91, 255–270. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00192-1](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00192-1).
- Łonkiewicz, B. (1997). Urządzanie i zagospodarowanie lasu w terenach zurbanizowanych i uzdrowiskowych [Organization and management of the forest in urban and spa areas]. *Postępy Techniki w Leśnictwie*, 64, 31–37.
- Łukasiewicz, A., & Łukasiewicz, S. (2016). Rola i kształtowanie zieleni miejskiej [The role and shaping of urban greenery]. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Michałowska, K., & Hejmanowska, B. (2008). Możliwości wykorzystania wieloczasowych obrazów znormali-

- zowanego indeksu wegetacji (NDVI) i archiwalnych ortofotomap do badania zmienności wybranych elementów środowiska [A possibility of using temporal images normalised difference vegetation index (NDVI) for detection of environmental changes]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 397–407.
- Musiał, J. (2009). Metodyka oceny stanu środowiska przyrodniczego obszarów prawnie chronionych w Polsce w oparciu o zintegrowane dane teledetekcyjne i klimatyczne [The methodology of assessment of the environmental conditions in protected areas in Poland based on integrated remote sensing and climatic data]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 307–320.
- Niedzielko, J., Szepietowska, M., Boral, B., Milczarek, M., Pokrzywnicka, M., Łach, G., Kaźmierczak, M., & Jarocińska, A. (2012). Analiza zależności między zawartością wody w roślinach zmierzoną w terenie a teledetekcyjnymi wskaźnikami roślinności [Analysis of the relationships between vegetation water content obtained from field measurements and vegetation indices]. *Teledetekcja Środowiska*, 47, 43–57.
- Nouri, H., Beecham, S., Anderson, S., & Nagler, P. (2014). High spatial resolution WorldView-2 imagery for mapping NDVI and its relationship to temporal urban landscape evapotranspiration factors. *Remote Sensing*, 6, 580–602. <https://doi.org/10.3390/rs6010580>.
- Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 3 stycznia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa w sprawie ewidencji gruntów i budynków [Notice of the Minister for Investment and Development of 3 January 2019 on the publication of the single text of the Regulation of the Minister of Regional Development and Construction on land and building records], *Journal of Laws* of 2019 item 393.
- Panda, S.S., Ames, D.P., & Panigrahi, S. (2010). Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. *Remote Sensing*, 2, 673–696. <https://doi.org/10.3390/rs2030673>.
- Parysek, J.J. (2004). Warunki życia w miastach polskich w okresie transformacji [Living conditions in Polish cities during the transition]. In I. Jażdżewska (Ed.). *XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście „Zróżnicowanie warunków życia ludności w mieście”* (pp. 55–66). Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Pluto-Kossakowska, J., Władyka, M., & Tulkowska, W. (2018). Ocena obrazowych danych teledetekcyjnych do identyfikacji obiektów w zielonej i błękitnej infrastrukturze [Assessment of remote sensing image data to identify objects in green and blue infrastructure]. *Teledetekcja Środowiska*, 59, 13–27.
- Pyra, M., & Adamczyk, J. (2018). Klasyfikacja zorientowana obiektowo w inwentaryzacji obiektów Zielonej Infrastruktury na przykładzie dzielnicy Ursynów w Warszawie [Object-oriented classification in the inventory of Green Infrastructure objects on the example of the Ursynów district in Warsaw]. *Teledetekcja Środowiska*, 59, 29–49.
- Rejestr wyborców wg stanu na dzień 30 czerwca 2016 [Register of voters as of June 30], 2016, Urząd Miasta Łodzi.
- Robinson, N.P., Allred, B.W., Jones, M.O., Moreno, A., Kimball, J.S., Naugle, D.E., Erickson, T.A., & Richardson, A.D. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Product for the Conterminous United States. *Remote Sens.*, 9, 863. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>.
- Rocznik 2015: Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2015 [Yearbook of 2015: Statistical Yearbook of the Republic of Poland 2015], Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Rostański, A. (2000). Trawy spontanicznie zasiedlające nieużytki poprzemysłowe w aglomeracji katowickiej [Grasses spontaneously inhabiting post-industry wasteland in the Katowice agglomeration]. *Grassland Science in Poland*, 3, 141–150.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., & Schell, J.A. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Progress Report RSC 1978–2, Texas A & M University, USA.
- Siciński, J.T. (1986). Zieleń polskich nekropolii [Green of Polish necropolises]. *Aura*, 11, 17–18.
- Sulma, S., Yulianto, F., Nugroho, J.T., & Sofan, P. (2016). A support vector machine object based image analysis approach on urban green space extraction using Pleiades-1A imagery. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2), 2–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0108-8>.
- Szarek-Iwaniuk, P. (2020). Changes and correlations in land-use structure within the administrative boundaries of a town – a case study. *Acta Sci. Pol.*

- Administratio Locorum* 19(1), 61–69. <https://doi.org/10.31648/aspal.4935>.
- Szarek-Iwaniuk, P. (2021). Measurement of spatial order as an indicator of sustainable development of functional urban areas in regional capitals. *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*, 20(2), 139–152. <https://doi.org/10.31648/aspal.6536>.
- Tomaszewska, M., Lewiński, S., & Woźniak, E. (2011). Wykorzystanie zdjęć satelitarnych MODIS do badania stopnia pokrycia terenu roślinnością [Use of MODIS Satellite Images to Study the Percentage of Vegetation Cover]. *Teledetekcja Środowiska*, 46, 13–22.
- Trisakti, B. (2017). Vegetation type classification and vegetation cover percentage estimation in urban green zone using pleiades imagery. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1), IOP Publishing: 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012003>.
- Trzaskowska, E. (2011). Zbiorowiska synantropijne – niedoceniony potencjał współczesnych miast [Synantropic communities – underappreciated potentiation of contemporary cities]. *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*, 10(3), 55–66.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- Turlej, K. (2009). Porównanie wartości NDVI odczytanych z obrazów satelitarnych NOAA AVHRR, SPOT-VEGETATION I TERRA MODIS [Comparison of NDVI index based on NOAA AVHRR, SPOT-VEGETATION and TERRA MODIS satellite data]. *Teledetekcja Środowiska*, 42, 83–88.
- Ustawa 2004: Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody [Act 2004: Law of 16 April 2004 on the Protection of Nature] (c.t. Journal of Law of 20.10.2015 item 1651).
- Walker, D.A. et al. (2012). Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects. *Environmental Research Letters*, 7, 015504. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015504>.
- Wang, T., Skidmore, A.K., Toxopeus, A.G., & Lin, X. (2009). Understory bamboo discrimination using a winter image. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(1), 37–47.
- Wasilewska, E. (2009). *Statystyka opisowa od podstaw [Descriptive statistics from scratch]*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Wang, L., Hunt, J.E.R., Qu, J.J., Hao, X., & Daughtry, C.S.T. (2011). Towards estimation of canopy foliar biomass with spectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(3), 836–840. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.011>.
- Wirth, H., Schilbach, G., & Wirth, A. (1987). Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich. *Vermessungstechnik*, 33(2), 56–59. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3313.8162>.
- Worm, A., Będkowski, K., & Bielecki, A. (2019). Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi [The use of surface and volume indicators from high resolution remote sensing data to assess the vegetation filling of urban quarters in Łódź city centre, Poland]. *Teledetekcja Środowiska*, 60, 5–20.
- Wu, W., Wang, M., Zhu, N., Zhang, W., & Sun, H. (2019). Residential satisfaction about urban greenness: Heterogeneous effects across social and spatial gradients. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.011>.
- Yan, J., Zhou, W., Han, L., & Qian, Y. (2018). Mapping vegetation functional types in urban areas with WorldView-2 imagery: Integrating object-based classification with phenology. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.021>.
- Zarzecki, M., & Pasierbiński, A. (2009). Zastosowanie GIS i teledetekcji w badaniach szaty roślinnej [Use of GIS and remote sensing in vegetation cover studies]. *Wiadomości Botaniczne*, 53(3/4), 53–66.
- www.gugik.gov.pl
www.sdg.data.gov
www.stat.gov.pl
www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing

Adam Bielecki

<https://orcid.org/0000-0003-1460-2961>

Uniwersytet Łódzki

Wydział Nauk Geograficznych

Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

adam.bielecki@edu.uni.lodz.pl

PLURALIZM DEFINICJI ZIELENI MIEJSKIEJ W LITERATURZE. STANDARDY, ASPEKTY PRZYRODNICZE I TECHNICZNE

Abstrakt: W artykule zawarto informacje na temat terenów zielonych na obszarach zurbanizowanych. Głównym celem pracy był przegląd i weryfikacja metodyki stosowanej do interpretacji wyników, określania znaczenia i zakresu ochrony zieleni na terenach miejskich, które są opisane w literaturze naukowej bądź w aktach prawnych. Weryfikację oparto na przeglądzie szerokiego spektrum źródeł (m.in. uchwał czy wytycznych międzynarodowych organizacji) odnoszących się do zieleni miejskiej. Zaprezentowano wybrane koncepcje planowania zieleni w różnej wielkości miastach, z różnymi ich funkcjami dominującymi czy warunkami naturalnymi. W artykule zawarto też informacje na temat metod inwentaryzacji zieleni na obszarach zurbanizowanych na podstawie mniej lub bardziej precyzyjnych wytycznych, zarówno opisowych, jak i numerycznych, a także uzyskanych poprzez interpretację danych teledetekcyjnych. W konsekwencji wykazano różnorodność i niespójność stosowanych definicji oraz na wielorakość podejść do analizy stopnia zazieleniania miast, co w efekcie prowadzi do nierzetelnych analiz przestrzennych wykorzystywanych do oceny jakości życia mieszkańców i planowania rozwoju przestrzennego danej jednostki.

Słowa kluczowe: roślinność, inwentaryzacja przestrzenna, geostatystyka, urbanistyka

PLURALISM OF URBAN GREENERY DEFINITIONS IN LITERATURE: STANDARDS AND NATURAL AND TECHNICAL ASPECTS

Abstract: The article contains information on green areas in urban locations. The main objective of the work was to review and verify the methodology used to interpret the results, and determine the importance and scope of greenery protection in urban areas as described in the academic literature or in statutory laws. The verification was based on a review of a wide range of sources (including resolutions or guidelines of international organizations) relating to

urban greenery. Selected concepts of green planning in cities of various sizes, with different dominant functions or natural conditions are presented. The article also contains information on methods of green inventories in urban areas based on more or less precise guidelines, both descriptive and numerical, as well as obtained through the interpretation of remote sensing data. As a result, the diversity and inconsistency of the definitions used and the multiplicity of approaches to the analysis of the degree of greening in cities were demonstrated, which in effect has led to the unreliable spatial analyses used to assess the quality of life of residents and to plan the spatial development of a given unit.

Keywords: vegetation, spatial inventory, geo-statistics, urban planning

1. WSTĘP

Roślinność jest kluczowym elementem życia na Ziemi. Obszary lasów, łąk, stepów oraz - roślinności wodnej, a także tereny rolnicze, mimo głównej funkcji produkcyjnej, pełnią liczne funkcje niezbędne do prawidłowego przebiegu wszelkich procesów przyrodniczych. Inaczej wygląda sytuacja na obszarach miejskich, które odpowiadają za część niekorzystnych zmian w środowisku naturalnym zachodzących na naszej planecie. Jednak w miastach, bardzo zróżnicowanych pod względem zagospodarowania przestrzeni, występują także tereny porośnięte roślinnością. Im więcej takich obszarów, tym wolniejszy jest proces zanieczyszczenia powietrza i wody czy degradacji gleby (Ozsoy i Aksoy, 2015). Aby skutecznie prowadzić politykę zrównoważonego rozwoju, niezbędna jest rzetelna wiedza zarówno na temat wielkości powierzchni zajmowanej przez zieleń w miastach (Szczepanowska, 2012), jak i jej jakości (Batala i Tsitsoni, 2009). Dlatego celem przeprowadzonego przeglądu była analiza dostępnych źródeł naukowych, administracyjnych oraz prawnych i wykazanie różnych podejść do tematu zieleni na obszarach zurbanizowanych, z podkreśleniem, na czym te różnice polegają.

Tereny zieleni pełnią wiele niezwykle ważnych funkcji przyrodniczych, technicznych, społecznych, zdrowotnych, edukacyjnych, gospodarczych, estetycznych i promocyjnych. Do głównych walorów funkcji przyrodniczych należy zaliczyć zmniejszanie się amplitudy temperatury powietrza (eliminacja wysp ciepła), oczyszczanie powietrza oraz wód powierzchniowych i podziemnych (Białobok, 1976; Liu i Li, 2012) oraz produkcję fitoncydów (Li i in., 2009). Roślinność zatrzymuje wodę, chroni przed wysychaniem gleby oraz utrzymuje wilgotność powietrza, pochłania dwutlenek węgla (CO_2), wytwarza tlen (O_2), zatrzymuje kurz.

Gleby pokryte zielenią są mniej narażone na erozję – zmniejsza się negatywne działanie kropel deszczu i korzeni roślin utrzymujących ziemię (Licznar, 1995). Cień roślin (drzew, krzewów) padający na nawierzchnie bitumiczne ogranicza wydzielanie się związków asfaltowych, co z kolei może zmniejszać deformację nawierzchni drogi, a także ograniczać parowanie węglowodorów z nagranych silników pojazdów (Błaszczuk i Kosmala, 2009).

Na terenach pozamiejskich zieleń przydrożna chroni po zmroku przed oślepianiem przez pojazdy, a zimą przed zawiewaniem śniegu na drogi (Szczepanowska, 2008). Flora zapewnia cień ludziom i zwierzętom, stanowi dom i schronienie dla zwierząt oraz miejsce odpoczynku i rekreacji dla ludzi. Pozytywnie wpływa na układ nerwowy, poprawia krążenie i proces oddychania. Pomaga także w koncentracji i przyspiesza proces podejmowania decyzji (Taylor i in., 2001). Zieleń towarzysząca szlakom komunikacyjnym zmniejsza również zmęczenie i jednocześnie zwiększa przyjemność podróżowania (Szczepanowska, 2010). Roślinność może stanowić też barierę dla hałasu. Przykładowo, pas izolacyjny o szerokości do 8 m może obniżyć poziom hałasu nawet o 12–13 dB (Kawoń i Żmuda, 1977). Roślinność działa również bakteriobójczo i grzybobójczo poprzez wydzielanie fitoncydów, które korzystnie wpływają na odporność (Krauz, 1997). Ponadto zieleń ujemnie jonizuje powietrze, co pomaga w leczeniu kataru, migreny oraz przyspiesza gojenie ran (Urbański, 2005). W przypadku zieleni ulicznej jest pierwszą barierą izolującą tereny mieszkalne od mikropyłów powstających w wyniku spalania paliw, ścierania nawierzchni dróg i opon (Popek i in., 2011). Obecność roślinności wokół obszarów mieszkalnych przeważnie oddziałuje na poziom szczęścia mieszkańców (Szczepanowska, 2008). Ma bezpośredni wpływ na zdrowie psychiczne i jakość życia człowieka, m.in. poprzez podniesienie walorów estetycznych. Zieleń jest zatem ważnym czynnikiem determinującym popyt na grunty i obiekty znajdujące się na nim lub w jego bliskim sąsiedztwie, a tym samym wpływa na wartość ekonomiczną wielu nieruchomości (Crompton, 2001). Szacuje się, że aleje wysadzone drzewami podnoszą cenę nieruchomości nawet o 30% (Walków i Kronenberg, 2012). Badania pokazują, że 75% klientów woli robić zakupy w sklepach znajdujących się w otoczeniu dużych drzew (Kosmala, 2005). Co więcej, obecność drzew w bezpośrednim sąsiedztwie budynków obniża koszty ogrzewania nawet o 25% i koszty klimatyzacji o 30%. Wciąż może istnieć duża presja, aby zabudowywać więcej terenów zielonych, a tym samym zwiększać renty gruntowe i zyski dla miasta lub indywidualnych właścicieli działek (Szczepańska i in., 2017).

Niezwykle istotnym aspektem są usługi ekosystemowe, czyli zespół korzyści, jakie środowisko zapewnia ludziom (Daily, 1997; Kronenberg, 2012). Idea ta opiera się nie na altruistycznym podejściu skupionym na ochronie gatunków zwierząt czy roślin, ale na dobrze

skalkulowanym interesie własnym polegającym na tym, że musimy chronić to, co przynosi nam zysk (Costanza i in., 1997; Fisher i in. 2009). Wcześniej przedstawiono funkcje zieleni rozumiane tradycyjnie. Roślinność jest jednak tylko częścią elementów usług ekosystemowych, na które składają się inne komponenty środowiska przyrodniczego. Tabela 1 pokazuje, jak obszerna jest klasyfikacja usług ekosystemowych.

Tabela 1. Klasyfikacja usług ekosystemowych wraz z przykładami

Klasa usług ekosystemowych	Przykład
Podstawowe (siedlisko)	Tworzenie gleby Fotosynteza i produkcja pierwotna Cykl biogeochemiczny (cykl azotu, węgla, siarki, fosforu itp.) Cykl hydrologiczny
Aprowizacja	Żywność (produkty pochodzenia zwierzęcego i roślinnego, miód, zioła) Woda Leki Trwałe materiały (drewno, włókna naturalne) Paliwo Produkty przemysłowe (tłuszcze, oleje, woski, guma, perfumy, barwniki) Formuła tworzenia analogicznych substancji syntetycznych Zasoby genetyczne
Regulacyjne	Regulacja klimatu Neutralizacja i rozkład odpadów Oczyszczanie gleby, powietrza i wody Ograniczenie erozji Procesy przenoszenia (np. zapylenie roślin) Ochrona przed promieniowaniem UV Łagodzenie ekstremalnych warunków pogodowych Ograniczenie rozprzestrzeniania się zarazków
Kulturalny	Funkcja rekreacyjna, turystyczna, estetyczna i edukacyjna Inspiracja kulturowa, intelektualna i duchowa Spokój, cisza, relaks Budowanie więzi społecznych, łączenie się z miejscem

Źródło: Millennium Ecosystem Assessment (2005, s. 40–45).

Problem wykorzystania obszarów zurbanizowanych na cele przyrodnicze jest zatem niezwykle istotny dla szerokiego spektrum dyscyplin naukowych. Roślinność ma istotny wpływ na wiele aspektów życia człowieka, dlatego należy traktować ją priorytetowo

2. DEFINICJE I INTERPRETACJA MIEJSKICH TERENÓW ZIELONYCH

Problematyką terenów zielonych w mieście zajmowało się wielu badaczy, jednak znamienne jest to, że tylko niewielka część z nich posługiwała się jakąkolwiek definicją. Dlatego w literaturze spotykamy się z pluralizmem definicji i opisów zieleni miejskiej (Taylor i Hochuli, 2017). Różnice w postrzeganiu terenów zielonych wynikają przede wszystkim z dyscypliny, w której specjalizuje się dany badacz, np. ekologia i ochrona środowiska, gospodarka przestrzenna, geografia, medycyna, nauki społeczne czy ekonomiczne. Ze względu na wielowątkowość zagadnienia należy rozważyć wiele kryteriów pozwalających określić, który obszar można, a którego nie można nazwać miejskim terenem zieleni. Zróżnicowanie w postrzeganiu zieleni miejskiej przekłada się bezpośrednio na brak możliwości porównania miast między sobą pod względem zasobności w zieleni miejską, a co za tym idzie także pod względem jakości życia ich mieszkańców.

Dodatkowym problemem w definiowaniu zieleni miejskiej jest zróżnicowane rozumienie pojęcia „miejski”. Koncepcja ta jest bardzo złożona i wymaga konsensusu różnych dyscyplin naukowych, takich jak: geografia, urbanistyka i architektura, socjologia, ekonomia czy ekologia i ochrona środowiska. Dla niektórych autorów jest to obszar w granicach jednostki mającej prawa miejskie, czyli posiadający taki status prawny (McCann, 2002; Ustawa z dnia 29 sierpnia 2003 r. o urzędowych nazwach miejscowości i obiektów fizjograficznych, 2003), dla innych jedynie tereny pełniące funkcje miejskie, tj. produkcyjne i usługowe (Czornik, 2012). W pierwszym przypadku do terenów zieleni miejskiej należeć będą nie tylko skwery, parki czy cmentarze, ale także łąki, pastwiska, grunty orne i lasy zlokalizowane w granicach administracyjnych miasta. Natomiast obszary bezpośrednio graniczące z miastem, położone na terenie wiejskim, nie będą interpretowane jako zieleni miejska. W innych przypadkach kluczowe jest podejście do zagadnienia zieleni miejskiej przez pryzmat funkcji. Tym samym obszary rolne lub leśne nieobjęte funkcjami miejskimi nie będą oznaczane jako zieleni miejska. Z drugiej strony krajobraz miejski charakteryzuje się widocznym wpływem człowieka (McIntyre i in., 2000). Należy jednak zaznaczyć, że taka definicja jest zbyt szeroka, aby można ją było stosować do wyznaczania obszaru miejskiego.

Prawa miejskie nadawane są w różnych krajach według innych kryteriów. W Polsce kryterium przyznania praw miejskich obejmuje 5 obligatoryjnych aspektów: 1) liczba mieszkańców powyżej 2000; 2) dochody co najmniej 60% mieszkańców muszą pochodzić z działalności pozarolniczej; 3) brak zabudowy zagrodowej w części miejskiej; 4) infrastruktura techniczna (wodno-kanalizacyjna); 5) posiadanie (ewentualnie) w przeszłości praw miejskich

(Ustawa z dnia 8 marca 1990 r. o samorządzie gminnym, 1990). Trudność w zdefiniowaniu, a w konsekwencji w wytyczeniu obszaru miejskiego wynika z faktu, że obszary miejskie są z natury bardzo zróżnicowane, zarówno pod względem cech fizycznych, jak i form użytkowania terenu (Feltynowski, 2023; Hohtola, 1978). Dlatego wielu badaczy podejmowało próby obliczania zmiennych charakteryzujących obszar zurbanizowany, takie jak: odsetek powierzchni pokrytej zielenią, średnia wysokość zabudowy czy gęstość zabudowy (Blanco i Velasco, 1996; Edgar i Kershaw, 1994; Friesen i in., 1995; Natuhara i Imai, 1996; Ruszczyk i in., 1987). W wielu przypadkach teren zurbanizowany, miejski jest przedstawiany jako przeciwieństwo obszaru naturalnego, niezagospodarowanego przez człowieka (Walbridge, 1997; Woolfenden i Rohwer, 1969), co zaprzecza stwierdzeniu, że np. park miejski jest obszarem naturalnym.

Najbardziej ogólny opis zieleni miejskiej stanowi, że obejmuje ona wszystkie ty biologicznie czynne znajdujące się w granicach administracyjnych miasta, niezależnie od formy ich użytkowania i właściciela (Böhm w Walkowicz, 2002). Węższe definicje odnoszą się do przestrzeni porośniętej roślinnością na obszarach miejskich (Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016). Należy także zaznaczyć, że zieleń w miastach charakteryzuje się większym rozdrobnieniem niż zlokalizowana poza obszarami miejskimi (Girvetz i in., 2008; Jomaa i in., 2008). W kontekście prawnym pojawiają się także problemy ze zdefiniowaniem jednoznacznych kryteriów wyznaczania terenów zielonych. Ustawa o ochronie przyrody z 2004 r. stanowi, że tereny zielone to obszary krajobrazowe wraz z elementami z nimi związanymi (takimi jak budynki czy infrastruktura techniczna), porośnięte roślinnością i, co ważne, pełniące funkcje publiczne (Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody). Co ciekawe, ani autorzy ustawy Prawo budowlane (Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane), ani ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Ustawa z 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym) nie uwzględnili szczegółowo terenów zieleni w akcie prawnym. Bardzo ważnym aspektem jest tu rozróżnienie pojęć „pokrycie terenu” i „użytkowanie gruntów” (funkcji). Pokrycie terenu opisuje stan fizyczny określonej części powierzchni Ziemi. Użytkowanie gruntów wskazuje, w jaki sposób ludzie korzystają z kawałka ziemi (Fischer i in., 2005).

W niemieckiej federalnej ustawie o ochronie przyrody i krajobrazie wymieniono następujące tereny naturalne na obszarach zaludnionych: parki, działki, lasy i ich obrzeża, pojedyncze drzewa, obszary wykorzystywane rolniczo, ogrody, powierzchnie doświadczeń przyrodniczych oraz obszary zbliżone do natury towarzyszące terenom komunikacyjnym, a także powierzchnie wolne od zabudowy (Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli, 2009).

Zgodnie z definicją opublikowaną przez Federalne Ministerstwo Środowiska, Ochrony Przyrody, Budownictwa i Bezpieczeństwa Jądrowego Niemiec (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit – BMUB, 2015), zieleń miejska obejmuje wszelkie formy zieleni otwartej i zielonej zabudowy. Ostatni termin jest spotykany tutaj po raz pierwszy. W dalszej części definicji do terenów zielonych zalicza się parki, cmentarze, ogrody działkowe, ugory, place zabaw, tereny sportowe, zieleń uliczną, zieleń osiedlową, tereny zielone na budynkach użyteczności publicznej, obszary ochrony przyrody, lasy i ogrody prywatne oraz użytki rolne. Uwzględnia się także elewacje i dachy porośnięte roślinnością, roślinność na obiektach infrastrukturalnych oraz zieleń we wnętrzach budynków. Można zatem stwierdzić, że cała roślinność zlokalizowana w granicach miasta, niezależnie od jej charakteru, mieści się w pojęciu „zieleń miejska”.

W Wielkiej Brytanii zieleń miejska (wraz z obszarami zajęтыми przez wodę) jest często uznawana za część kapitału naturalnego, który z kolei definiuje się jako element przyrody tworzący określoną wartość dla człowieka (Natural capital: An overview, 2016, s. 1). Nasuwa się wniosek, że nieużytki, nawet mimo pokrycia samowysiewającą się roślinnością, nie mieszczą się w zakresie tej definicji.

Jednym z najczęściej spotykanych w literaturze naukowej terminów odnoszących się do terenów zieleni miejskiej jest „las miejski”. Pod tym pojęciem rozumie się obecnie na świecie obszary leśne, ale także grupy drzew, pojedyncze drzewa oraz krzewy i roślinność występującą w parkach, na cmentarzach czy terenach ogrodowych (Escobedo i in., 2011; Ferrini i in., 2017; Konijnendijk i in., 2006).

Zielona infrastruktura (*green infrastrucutre* – GI) to termin najczęściej używany w Stanach Zjednoczonych w odniesieniu do obszarów roślinnych zaznaczonych w lokalnych planach zagospodarowania przestrzennego. Często używa się go zamiennie z określeniem „las miejski” (Zięba-Kulawik i in., 2021). W większości planów koncepcja nie jest jednak jasno zdefiniowana. Co ciekawe, w planach, w których występuje taka definicja, najczęściej odnosi się ona do możliwości absorpcji wód opadowych, podczas gdy w Polsce używa się określenia „warstwa nieprzepuszczalna” (Nowakowska-Błaszczuk, 1988), nie używa się jednak takich terminów jak „krajobraz” czy „przyroda” (Grabowski i in., 2022). Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska zdefiniowała koncepcję zielonej infrastruktury jako zestaw praktyk mających na celu kontrolę wód opadowych (Komunikat, 2019).

W Polsce odpowiednikiem GI jest koncepcja niebiesko-zielonej infrastruktury, która z kolei nawiązuje do pojęcia zielonej infrastruktury zdefiniowanego przez Komisję Europejską. Definicja ta mówi, że przez zieloną infrastrukturę należy rozumieć sieć obszarów naturalnych

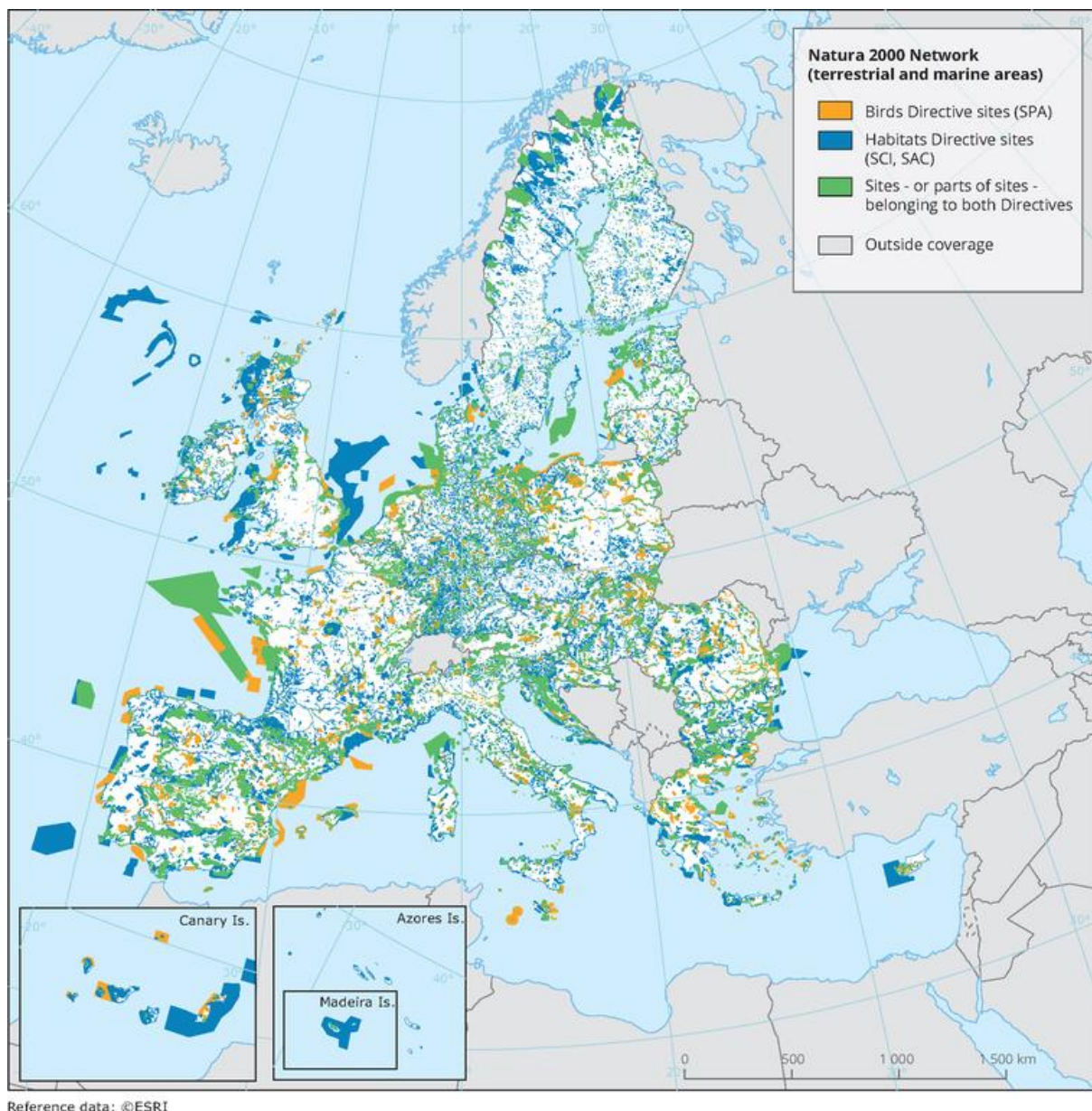
i półnaturalnych, zaprojektowaną i zarządzaną w taki sposób, aby zapewnić jak największe spektrum usług ekosystemowych. Pojawia się także informacja, że błękitno-zielona infrastruktura może być zlokalizowana wyłącznie na terenach miejskim lub wiejskim, a zatem nie dotyczy obszarów poza granicami miast i wsi (Komunikat, 2013). Wymieniono rodzaje elementów przyrodniczych wchodzących w skład niebiesko-zielonej infrastruktury, a mianowicie: lasy, naturalne tereny zielone, rzeki, potoki i inne ciek, obszary naturalnej retencji, łąki, pola, pastwiska, tereny przybrzeżne, drzewa i krzewy (Solarek i in., 2016).

Kolejnym repozytorium z wyznaczonymi terenami zieleni jest sieć Natura 2000 przyjęta przez Komisję Europejską (Dyrektywa Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk naturalnych oraz dzikiej flory i fauny, 1992). Jest to sposób wyznaczania i ochrony terenów zielonych o dużym znaczeniu przyrodniczym. Obszary wchodzące w skład tej sieci występują także na terenach miejskich, gdzie odgrywają szczególną rolę. Są terenami zieleni, które nie mogą zmienić swojej funkcji na podstawie decyzji władz lokalnych. Jest więc duża doza pewności, że ich powierzchnie nie będą się zmniejszać (rysunek 1).

Europejska Agencja Środowiska (Komunikat, 2019) w swoim raporcie podaje trzy sposoby wyznaczania miejskich terenów zielonych: 1) zieloną infrastrukturę (tereny zielone i zbiorniki wodne, obszary podmokłe, ogrody prywatne, drzewa przyuliczne); 2) obszar osłonięty (przykryty) koronami drzew; 3) tereny przeznaczone do użytku publicznego – dostępne tereny zielone (Komunikat, 2013).

Europejska Agencja Środowiskowa (European Environment Agency - EEA) prowadzi także jeden z najpopularniejszych programów badawczych zapewniających informacje na temat pokrycia terenu – CORINE Land Cover (CLC). Obecnie przygotowywane są bazy danych pokrycia terenu dla 39 krajów europejskich (Bielecka, Ciołkosz, 2004). CLC jest bazą danych wektorowych zawierającą wielokąty reprezentujące określone formy pokrycia terenu. Informacje te są uzyskiwane na podstawie interpretacji danych satelitarnych. Same dane prezentowane są na trzech poziomach szczegółowości. Na najwyższym, trzecim poziomie zdefiniowano 44 podstawowe typy pokrycia terenu. Niektóre zlokalizowane są na obszarach antropogenicznych, jak np. tereny zielone czy sportowo-rekreacyjne. Do pierwszych zaliczają się parki, skwery i zadrzewione cmentarze (nie wszystkie) zlokalizowane w granicach zabudowy miejskiej. Z kolei do obszarów sportowo-rekreacyjnych zalicza się boiska i stadiony sportowe, pola namiotowe i kempingi, parki rozrywki i wypoczynku, pola golfowe, tory wyścigów konnych itp. Do terenów zabudowanych zalicza się także parki i działki położone poza granicami miasta oraz typowo rekreacyjną zabudowę letniskową (Land.copernicus.eu, 2024).

Urban Atlas (UA) to baza danych przestrzennych przygotowana przez Europejską Agencję Środowiskową mająca na celu analizę środowiska europejskich miast liczących powyżej 100 tys. mieszkańców. Główną różnicą w kontekście roślinności miejskiej pomiędzy CLC a UA jest fakt, że pierwszy dostarcza informacje głównie rolne i leśne, podczas gdy dla obszarów miejskich wyróżnia jedynie dwie formy pokrycia zieleni. Urban Atlas obejmuje jedynie tereny około 200 europejskich miast, na obszarze których zdefiniowano 20 różnych klas pokrycia terenu (Prastacos i in., 2011). Urban Atlas jest bardziej szczegółowym opracowaniem o większej skali. Dla niniejszej pracy istotna jest szczególnie klasa „zurbanizowane obszary zielone”, zdefiniowana jako tereny publiczne przeznaczone głównie do celów rekreacyjnych. Ważnym aspektem jest to, że nie są zaliczane do tej klasy wszelkie obszary zieleni, niezarządzane jako zieleń miejska (Dijkstra, L., Poelman, H., 2012). Do powierzchni pokrytych roślinnością należałoby również dołączyć obszary sportowe i rekreacyjne, rolne, półnaturalne, bagna oraz lasy.



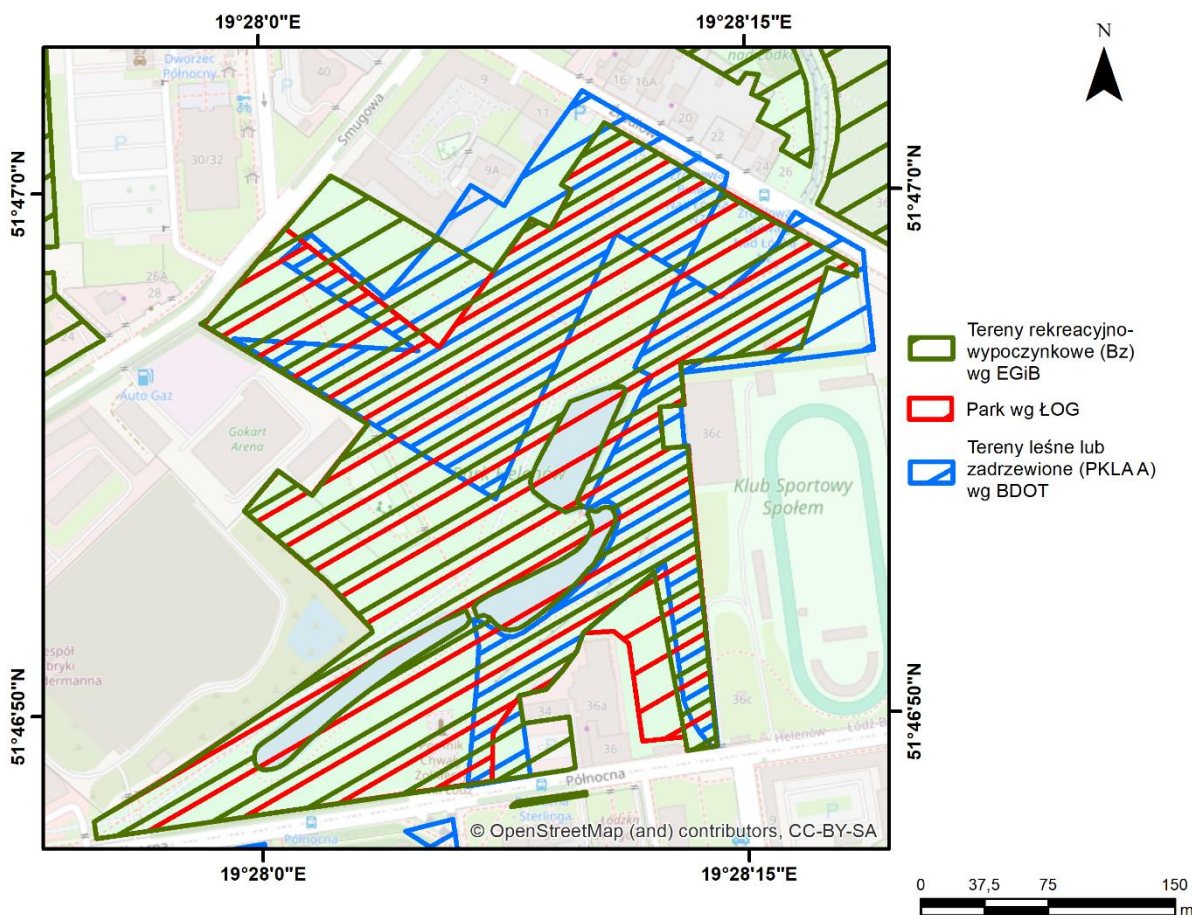
Rysunek 1. Sieć Natura 2000

Źródło: European Environment Agency (b.r.).

Oficjalne dane statystyczne prowadzone przez Główny Urząd Statystyczny w Polsce (ale także w wielu innych krajach) dostarczają danych opartych na podziale według granic działek katastralnych, często nie ze względu na ich zasięg, ale na pełnioną funkcję. W Ewidencji Gruntów i Budynków wskazano wyłącznie tereny rekreacyjno-wypoczynkowe (Bz), do których zalicza się m.in. parki krajobrazowe, skwery, tereny zielone (z wyjątkiem ulic), ogrody botaniczne, ogrody działkowe oraz obszary zieleni nieurządzonej niezaliczone do lasów oraz gruntów zadrzewionych i zakrzewionych, a także tereny porośnięte drzewami i krzewami (Obwieszczenie, 2024, s. 24).

Jednym z systemów klasyfikacji obszarów zagospodarowania przestrzennego w Polsce jest krajowa Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). W rozporządzeniu określającym klasy obszarów zagospodarowania przestrzennego można znaleźć następujące nazwy obiektów związanych z terenami zielonymi, takimi jak: tereny zalesione, drzewa i krzewy, cmentarze oraz trawniki (Rozporządzenie, 2021). Inne ważne repozytoria prezentujące dane przestrzenne w Polsce to: Ewidencja Gruntów i Budynków (EGiB), o której mowa powyżej, Ogólna Baza Danych Obiektów Geograficznych (BDOO) oraz mapy tematyczne tworzone przez Powiatowe Ośrodki Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (PODGiK). Niestety te bazy danych nie są kompatybilne (rysunek 2). Dane pochodzące z odrębnych źródeł były uzyskiwane za pomocą różnych systemów klasyfikacji i nie są spójne przestrzennie (np. tereny rekreacyjne w bazie EGiB, powierzchnie leśne lub zakrzewione w bazie BDOT, czy parki na mapach roślinności miejskiej Łódzkiego Ośrodka Geodezji ŁOG obejmują te same obszary, ale różnią się pod względem przebiegu granic).

Niemiecki Federalny Urząd Statystyczny wyróżnia 28 form użytkowania gruntów, w tym 8, które można zaliczyć do obszarów w przeważającej mierze pokrytych roślinnością: tereny sportowo-rekreacyjne, tereny zielone, cmentarze, roślinność, obszary użytkowane rolniczo, lasy, zagajniki, stepy.



Rysunek 2. Zasięgi terenu zieleni wytyczone na podstawie różnych baz danych na przykładzie Parku Helenów w Łodzi

Źródło: opracowanie własne

Głównym urzędem statystycznym dla krajów Unii Europejskiej i Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu (EFTA) jest Eurostat. Zajmuje się opracowywaniem prognoz i analiz statystycznych istotnych przy podejmowaniu decyzji przez władze wspólnotowe, koordynacją i monitorowaniem pracy krajowych urzędów statystycznych w celu ujednolicenia stosowanych przez nie metod badawczych, a także konsolidacją statystyki krajowej państw członkowskich (Sozański, 2010, s. 143). Biuro to przeprowadza ramowe badanie zagospodarowania przestrzennego i pokrycia powierzchni o nazwie LUCAS (ang. Land Use and Coverage Area frame Survey - Badanie powierzchni i zasięgu użytkowania gruntów). Celem LUCAS jest gromadzenie zharmonizowanych informacji na temat użytkowania gruntów, pokrycia terenu i parametrów środowiskowych.

LUCAS obejmuje następujące główne klasy, które można zaliczyć do zieleni miejskiej (Eurostat Statistics Explained, 2024): lasy, krzewy, użytki zielone oraz podkategorie użytków zielonych.

1. Lasy – obszary porośnięte drzewami o koronach rozwiniętych co najmniej w 10%. Drzewa typu leśnego mogą również występować w sadach. Do tej klasy zaliczają się także zdrewniałe żywopłoty i palmy. Należy ocenić wysokość drzew w okresie dojrzałości i szerokość koron na poziomie ich zdrewniałych fragmentów. Jeżeli obszar zalesiony jest większy niż 0,5 ha, wysokość drzew w okresie dojrzałości przekracza 5 m, a szerokość obiektu leśnego przekracza 20 m, geodeta musi podać kod lesistości w odpowiednim polu „gatunków roślin LC” (*least concern*, czyli gatunków najmniejszej troski), zgodnie z klasyfikacją typów lasów Europejskiej Agencji Środowiska.
2. Krzewy – obszary zdominowane (stanowiące co najmniej 10% powierzchni) przez krzewy i niskie rośliny drzewiaste, zwykle nie osiągające wysokości większej niż 5 m.
3. Użytki zielone – grunty porośnięte głównie zbiorowiskami użytków zielonych, roślinami trawiastymi i krzewami. Klasa ta obejmuje trwałe użytki zielone (czyli użytki rolne) oraz trwałe użytki zielone nieobjęte płodozmianem (zwykle przez 5 lat lub dłużej), na których występują trawy (łąki) lub inne pastewne rośliny zielne rozsiewające się w sposób naturalny (samosiew) lub w drodze uprawy (siew). Może obejmować drzewa rzadko występujące, z rozwiniętymi w mniej niż 10% koronami oraz krzewy z 20% całkowitego zwarcia (w tym drzew). Tereny te nadają się do wypasu, pod warunkiem że dominują na nich trawy i inne rośliny zielne.
4. Podkategorie użytków zielonych obejmują takie obszary, jak powierzchnie samoistnie odnowione, definiowane jako obszary składające się głównie z gruntów rolnych, ale nie uprawiane w roku ich klasyfikacji ani w latach wcześniejszych (w roku klasyfikacji nie były przygotowane do siewu żadnej rośliny). Do tej klasy gruntów można zaliczyć również tereny po wycinkach leśnych, obszary przemysłowe, magazynowe oraz także tereny opuszczone lub nieużytkowane itp. pokryte spontanicznie występującymi roślinami (np. rośliny synantropijne czy ruderalne).

Istotną rolę odgrywają także tereny nieobjęte ochroną prawną, pominięte jako zieleń w oficjalnych wykazach, a także niewidoczne i niedostępne dla mieszkańców – zieleń niezagospodarowana. Są to przeważnie powierzchnie nieużytków, na których nastąpiła spontaniczna sukcesja roślinności.

Swoją definicję ma również Organizacja Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO), według której na zieleń miejską (las miejski) składają się wszystkie drzewa, niezależnie od tego, czy występują w lasach, czy tworzą grupy, czy rosną pojedynczo oraz czy są zlokalizowane na obszarach miejskich lub podmiejskich (Salbatino i in., 2016). Dodatkowo wprowadzono 5 głównych typów lasów, a mianowicie: 1) podmiejskie lasy i lasy, 2) parki

miejskie i lasy miejskie, 3) parki kieszonkowe i ogrody z drzewami, 4) drzewa rosnące wzdłuż ulic lub przy placach publicznych, 5) inne przestrzenie zielone z drzewami. W porównaniu z innymi definicjami można tu dostrzec dwie niestosowane wcześniej koncepcje. Jedna to przyjęcie, że aby uznać teren za las miejski wystarczy obecność drzew oraz druga, że obszary te nie muszą być zlokalizowane w strefie miejskiej, mogą zajmować również obszar podmiejski.

Z powyższego fragmentu rozdziału wyraźnie wynika konkluzja, że interpretacja zieleni miejskiej według różnych źródeł i metod ich wyróżniania jest inna. Różnorodność cech terenu, takich jak: dostępność, rodzaj pokrycia, funkcja czy stan utrzymania, powodują, że proponowane definicje są ich kombinacją i uniemożliwiają jednoznaczne zdefiniowanie miejskich terenów zielonych.

3. WYZNACZANIE TERENÓW ZIELONYCH Z WYKORZYSTANIEM DANYCH TELEDETEKCYJNYCH

Istnieją również mierzalne metody delimitacji obszarów zielonych z wykorzystaniem wskaźników roślinności obliczonych na podstawie obrazowych danych teledetekcyjnych (Xue i Su, 2017). Bazują one na matematycznych formułach wyliczanych za pomocą wartości odbicia promieniowania elektromagnetycznego w poszczególnych kanałach zdjęcia satelitarnego lub lotniczego i wskazują m.in. zagęszczenie czy stan roślinności w danym miejscu (Kopańczyk i Fitrzyk, 2016; Lhermitte i in., 2010). Jednym z najczęściej opisywanych i wykorzystywanych w literaturze naukowej wskaźników dotyczących roślinności jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI, czyli Normalized Difference Vegetation Index) oparty na informacji z kanałów podczerwonego i czerwonego danego zobrazowania (Deering, 1978; Jackson i Huete, 1991; Rouse i in., 1974). Jego formuła przedstawia się następująco:

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

gdzie: NIR – kanał podczerwony, RED – kanał czerwony.

Ważną cechą NDVI jest jego związek zarówno z ilością, jak i jakością roślinności (Jarocińska, 2011; Jarocińska i Zagajewski, 2008). Jeżeli piksel obrazu składa się z obiektów o różnym współczynniku odbicia, to wartość jest wypadkową współczynników NDVI tych elementów, średnią ich udziału w powierzchni piksela (Wirth i in., 1987). NDVI umożliwia

zróźnicowanie pokrycia terenu (m.in. ze względu na gęstość bądź kondycję roślinności) w obrębie zbiorowisk często uznawanych za jednorodne (w innych badaniach), takich jak łąki (Kosiński i Kozłowska, 2003; Kosiński i Hoffmann-Niedek, 2008), wskazując na dużą wrażliwość wskaźnika na różnorodność pokrywy roślinnej. Powyższe cechy NDVI powodują, że jest on często stosowany w badaniach obszarów miejskich (Maurya i in., 2012).

Różni autorzy w odmienny sposób definiują progi NDVI, aby zróźnicować obszary porośnięte roślinnością od terenów, na których roślinność nie występuje. Kubalska i Preuss (2014) wykorzystali cyfrowe zdjęcia lotnicze (o rozdzielczości przestrzennej 10 cm) i dane z lotniczego skaningu laserowego (gęstość 15 punktów m²) do przeprowadzenia inwentaryzacji terenów zielonych we Wrocławiu. Przyjęli minimalną wartość NDVI $\geq 0,1$ obliczoną z pikseli ortofotomapy CIR utworzonej przy użyciu kanału podczerwieni. Krukowski i in. (2016) oraz Krukowski (2018) wykorzystali zobrazowania IKONOS 2 i wyróżnili dwie klasy zieleni miejskiej: wysoką i niską. Pierwszym krokiem było przyjęcie progu NDVI $> 0,2$ w celu oddzielenia roślinności obu klas, następnie wyznaczono pola treningowe dla tych klas i przeprowadzono nadzorowaną klasyfikację terenów zielonych. Zaobserwowali wyższe wartości wskaźnika dla roślinności wysokiej i dlatego skorygowali próg rozróżniania tej roślinności do wartości NDVI = 0,35. Będkowski i Bielecki (2017) ocenili dostępność terenów zielonych za pomocą wskaźnika NDVI obliczonego na podstawie obrazu z misji Landsat 8. Duża część miasta charakteryzowała się wartościami wskaźników mieszczącymi się w przedziale od 0,2 do 0,3. Stwierdzono, że są to obszary miasta obejmujące dobrze rozwiniętą zieleń. Robak i in. (2016) wybrali niski próg NDVI wynoszący 0,1, aby rozróżnić szatę roślinną miasta Łodzi na podstawie lotniczej ortofotomapy CIR. Z tych samych progów korzystali Pyra i Adamczyk (2018), badając roślinność miejską warszawskiego Ursynowa. Analizując roślinność, rozumianą jako element zielono-niebieskiej infrastruktury, Pluto-Kossakowska i in. (2018) założyli, że optymalny zakres wartości NDVI wynosi od 0,2 do 1 w przypadku stosowania lotniczej mapy ortofotomapy CIR oraz 0,5 do 1 dla obrazów Sentinel-2. Michałowska i Hejmanowska (2008) obliczyły natomiast różnice NDVI między rokiem 1979 (Landsat MSS) a 2000 (Landsat +ETM), aby pokazać zmiany w szacie roślinnej na obszarze Słowińskiego Parku Narodowego i stwierdziły, że wartość z przedziału od -0,41 do +0,41 oznacza tereny o niewielkich zmianach. Tomaszewska i in. (2011) przyjęli, że piksele MODIS o wartości NDVI poniżej 0,3 reprezentują powierzchnie pozbawione roślinności, natomiast piksele o wartości powyżej 0,7 obszary intensywnie pokryte roślinnością. Wartości z zakresu $0,3 < \text{NDVI} \leq 0,7$ odnoszą się do częściowego pokrycia terenu roślinnością.

Doświadczenie wielu autorów pokazuje, że nie można jednoznacznie określić, jak powinno się interpretować konkretną wartość NDVI, ani z jakimi formami pokrycia terenu można ją wiązać. Należy każdorazowo eksperymentalnie zweryfikować obowiązujące progi, aby rozróżnić szatę roślinną od innych form i wykazać zróżnicowanie w obrębie szaty roślinnej. Próbę taką podjęto dla terenu Łodzi (Bielecki i Będkowski, 2022). W swoich badaniach autorzy wyznaczyli charakterystyczne wartości wskaźnika NDVI dla różnych typów obszarów oficjalnie zaliczanych do raportów statystycznych jako tereny zielone.

Ponadto wskaźnik NDVI może służyć jako jeden z kanałów obrazowych wraz z wybranymi innymi obrazami, np. w celach klasyfikacyjnych (Pyra i Adamczyk, 2018). Klasyfikacja nadzorowana i nienadzorowana oparta na danych obrazów Pléiades została przetestowana przez Trisakti (2017), który osiągnął dużą dokładność dzięki połączeniu wskaźnika NDVI i kanału niebieskiego. Sulma i in. (2016) natomiast odróżnili obszary porośnięte roślinnością od innych terenów miejskich w Dżakarcie (Indonezja) na podstawie wskaźników spektralnych NDVI, NDWI (Normalised Difference Water Index – znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji) i MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index – zmodyfikowany wskaźnik roślinności dostosowany względem gleby) z ogólną dokładnością 86%.

NDVI można obliczyć na podstawie danych obrazu z wielu systemów satelitarnych. Ze względu na różną rozdzielczość przestrzenną, spektralną i radiometryczną tych systemów, a także zmienność warunków naturalnych między nawet czasowo blisko siebie rozmieszczonymi danymi obrazowymi zmienność wyznaczanych wartości wskaźników jest nieunikniona. Jest to szczególnie prawdziwe w przypadku porównywania indywidualnych obserwacji. Jak jednak wykazano (Turlej, 2009), różnice między wynikami uśrednionymi w poszczególnych przedziałach czasowych są nieistotne (ok. 0,1 NDVI). To powód, aby tam, gdzie jest to konieczne, stosować różne systemy (po ewentualnym odpowiednim ich przekształceniu).

Podsumowując powyższe, widać, że nie ma jednego uniwersalnego sposobu na jednoznaczne określenie, które obszary należy zaliczyć do terenów zieleni miejskiej. Większość definicji przyjmuje formę opisową, która często jest związana z funkcją danego obszaru lub jego dostępnością. Dodatkowym problemem może być odmienne nazewnictwo w różnych krajach. Nie ma oficjalnie obowiązujących metod porównywania różnych miast czy dzielnic. Jedyną opcją wydaje się być analiza oparta na danych teledetekcyjnych, które po odpowiednim przetworzeniu (kalibracji) i określeniu konkretnych wytycznych co do daty i warunków pogodowych w danym okresie, mogą być doskonałym źródłem do ustalenia mierzalnych wskaźników, co z kolei może służyć do porównywania liczb danych pomiędzy poszczególnymi lokalizacjami.

4. STANDARDY I WSKAŹNIKI MIEJSKIE DOTYCZĄCE ZIELENI MIEJSKIEJ

Pojęcie zieleni miejskiej jest również często wykorzystywane przy tworzeniu standardów urbanistycznych zawierających szczegółowe wskaźniki dotyczące zieleni. Najczęściej stosowanymi wskaźnikami ilościowymi są: wielkość poszczególnych obszarów zielonych, powierzchnia zajmowana przez tereny zielone oraz łączna powierzchnia zieleni przypadająca na 1 mieszkańca (Wang, 2009). Trudnym zadaniem jest jednak określenie jednego idealnego wskaźnika obrazującego stan faktyczny (Haq, 2011). W tabeli 2 przedstawiono próbę określenia minimalnych standardów dla terenów zielonych dla różnych poziomów funkcjonalnych miasta.

Tabela 2. Przykład minimalnych standardów dla miejskich przestrzeni zielonych

Poziom funkcjonalny	Maksymalna odległość od domu (m)	Minimalna powierzchnia (ha)
Zieleń mieszkaniowa	150	1
Okolica zielona	400	10 (park: 5)
Kwartał zielony	800	30 (park: 10)
Dzielnica zielona	1 600	60
Zieleń miejska	3 200	200 (mniejsze miasta)
Las miejski	5 000	300 (duże miasta)

Źródło: Van Herzele i Wiedemann (2003).

Zgodnie z Polskimi Normami Urbanistycznymi, które były ostatnim obowiązującym w Polsce prawem dotyczącym standardów urbanistycznych dla terenów zielonych, istnieją przepisy mówiące m.in., że minimalna powierzchnia zieleni rekreacyjnej powinna wynosić 8 m² na 1 mieszkańca, przy czym łączna powierzchnia zieleni rekreacyjnej i izolacyjnej powinna wynosić co najmniej połowę powierzchni netto. Wprowadzono także przepis mówiący o konieczności zaplanowania przestrzeni rekreacyjnej o powierzchni co najmniej 5,5 m² na 1 mieszkańca w odległości nie większej niż 500 m od miejsca zamieszkania. Norma ta przestała obowiązywać w 1990 r., co oznacza, że obecnie żadne przepisy nie nakładają na projektantów i planistów obowiązku zapewnienia odpowiedniej ilości terenów zielonych (Dąbrowska-Milewska, 2010).

Na początku XXI w. w Anglii zostały stworzone standardy przez Dudley Metropolitan Borough Council (b.r.), które opisywały potrzebę wyznaczenia obszaru zielonego o powierzchni co najmniej 2 ha na każde 1000 mieszkańców, z maksymalną odległością spaceru wynoszącą 0,25 mili

Cennym porównaniem mogłoby być także przedstawienie standardów obowiązujących na Białorusi. W 2013 r. powstała norma określająca minimalną ilość powierzchni zajmowanej przez roślinność ze względu na wielkość miasta i znaczenie samych terenów zielonych. Szczegółowe dane przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wskaźniki powierzchniowe do planowania terenów zielonych i rekreacji w miastach według standardów budowlanych Republiki Białorusi

Liczba mieszkańców	Powierzchnia terenów zielonych w m ² na każdego mieszkańca		
	w zabudowie mieszkaniowej	Znaczenie	
		regionalne	ogólnomiejskie
Powyżej 1 000 000	9–10	8–10	9–11
250 000–1 000 000	10–11	7–9	8–10
100 000–250 000	12–15	6–8	8–10
20 000–100 000	15–20	3–5	6–8

Źródło: *Stroitielnyje normy Republiki Bielarus* (2003).

Analiza wskaźników przedstawionych w tabeli 3 pozwoliła określić Dąbrowskiej-Milewskiej (2010) zbiorcze wytyczne ujęte przez autorkę w postaci tabeli (tabela 4).

Tabela 4. Zagregowane wskaźniki zieleni dla obszarów zurbanizowanych

Wyszczególnienie	Program	Minimalny obszar	Indeks minimalnego obszaru	Maksymalny promień dostępu
Powierzchnie mieszkalne, na działce budowlanej (netto)	Place zabaw dla dzieci do lat 7, Place zabaw dla dzieci starszych (ponad 50 mieszkań)	250 m ²	5,0 m ² / 1 mieszk.	50 –100 m
Podstawowe ogólnodostępne tereny rekreacyjno-sportowe	Ogród osiedlowy	2 ha	4,0 m ² /1 mieszk.	500 m
	Boiska sportowe do gier zespołowych		1,5 m ² /1 mieszk.	

Ponadpodstawowe tereny rekreacyjno-sportowe	Park	2 ha	4,0 m ² /1 mieszk.	1000 m
	Boiska sportowe do gier zespołowych, Pływanie w pomieszczeniach Hale sportowe	2 ha	2,5 m ² /1 mieszk.	

Źródło: Dąbrowska-Milewska (2010).

Stosunkowo nową koncepcją w literaturze dotyczącej zieleni miejskiej jest zasada 3–30–300, określająca minimalną liczbę drzew, jakie powinny rosnąć na terenach mieszkalnych. Zdaniem autora koncepcji na każdy budynek mieszkalny powinny przypadać minimum trzy drzewa, osiedle powinno pokrywać co najmniej 30% koron drzew, a odległość od najbliższego parku lub innego terenu zielonego nie powinna przekraczać 300 m od miejsca zamieszkania (Konijnendijk, 2022).

W polskim ustawodawstwie istnieje przepis dotyczący obszarów przyrodniczych w kontekście zagospodarowania poszczególnych działek na terenie miasta. Przez powierzchnię terenu biologicznie czynnego rozumie się „grunt rodzimy pokryty roślinnością oraz wodę powierzchniową na działce budowlanej, a także 50% sumy nawierzchni tarasów i stropodachów, urządzonych jako stałe trawniki lub kwietniki na podłożu zapewniającym ich naturalną vegetację, o powierzchni nie mniejszej niż 10 m²” (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, 2002, s. 5203). Nie można jednak utożsamiać każdego obszaru biologicznie czynnego z terenami zielonymi, gdyż autorzy zdefiniowali go jako „zapewniający naturalną vegetację” a nie pokryty roślinnością.

Udział powierzchni zielonej może być jednym z ważnych wskaźników (wymiarów środowiskowych) wykorzystywanych w analizach zrównoważonego rozwoju miasta, obok wymiaru społecznego i gospodarczego (Szarek-Iwaniuk, 2021). Dlatego należy ujednolicić standardy dotyczące obecności zieleni miejskiej w miejscu zamieszkania, aby można było je skutecznie egzekwować.

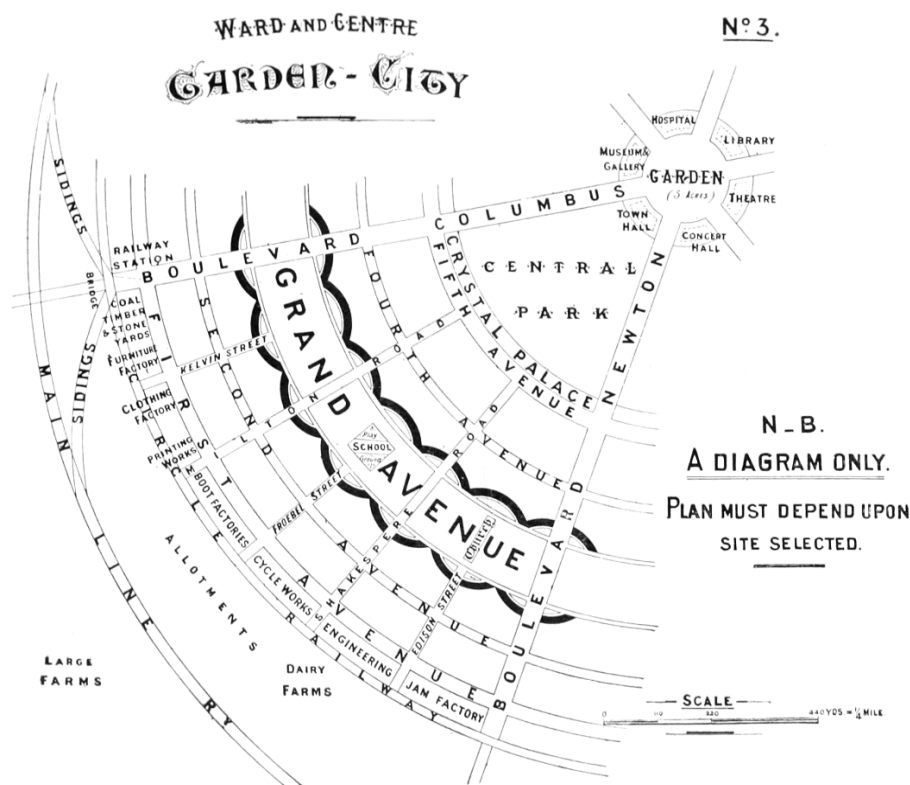
5. KONCEPCJE PLANOWANIA MIAST WRAZ Z TERENAMI ZIELENI MIEJSKIEJ DAWNIEJ I WSPÓŁCZEŚNIE

Problematyka terenów zielonych na obszarach miejskich jest analizowana od wieków. Już w starożytności roślinność w miastach była bardzo ważną wartością (Gutowski, 2006). Najbardziej znanym przykładem są wiszące ogrody królowej Semiramidy w Babilonie, uważane za jeden z siedmiu cudów starożytnego świata. Sama koncepcja zakładała wprowadzenie jak największej liczby roślin umieszczonych na wielopoziomowych tarasach do środowiska nieprzyjaznego roślinom, jakim jest obszar dawnej Mezopotamii. Całość nawadniana była poprzez system kanałów, którymi płynęła woda z rzeki Eufrat. Pomimo tamtejszego klimatu, utrudniającego rozwój roślinności, zdecydowano się inwestować na terenach zajętych przez roślinność.

Najpopularniejszą teorią urbanistyczną, w której roślinność odgrywa wiodącą rolę, była teoria miasta ogrodu brytyjskiego planisty Ebenezera Howarda (Choay, 1969, za: Howard, 1902). Koncepcja ta zakładała zaprojektowanie miasta dla około 30 tys. mieszkańców na planie koła z parkiem zlokalizowanym w jego centralnym miejscu. Miasto miało zostać podzielone na 6 stref, zgodnie z ich funkcjami. Tym samym dostęp do terenów zielonych miał być równy dla wszystkich jego mieszkańców. Według założeń stosunek powierzchni zabudowanej do powierzchni terenów zielonych i rolniczych miał wynosić 1:4 (rysunek 3).

Linearne miasto hiszpańskiego urbanisty Arturo Sorina y Mata było koncepcją opartą na wydajnych usługach komunikacyjnych. Przestrzeń miejską należało podzielić na trójkąty, z których każdy powinien być otoczony terenami zielonymi, zapewniającymi szybki i łatwy dostęp do przestrzeni odpoczynku i rekreacji (Ostrowski, 2001). Idea ta, rozwinięta przez Gonzalesa del Castillo w bardziej nowoczesną koncepcję miasta linearnego, przewidywała szersze pasy zabudowy podzielone na strefy o różnym przeznaczeniu, przeniknięte systemem parków i terenów zielonych, które z kolei miały być powiązane z obszarami rolniczymi i leśnymi poza granicami miasta.

W koncepcji miasta przemysłowego francuskiego urbanisty Tony'ego Garniera, którego zadaniem było łączenie funkcji przemysłowych, mieszkaniowych i rekreacyjnych, miasto miało być traktowane jako duży park, w którym czynnikiem miastotwórczym był zakład przemysłowy (Styrna-Bartkowicz, 1977). Strefa mieszkaniowa miała być oddzielona od strefy przemysłowej terenami zielonymi (Misztal, 1999).



Rysunek 3. Schemat przedstawiający układ przestrzenny miasta ogrodu

Źródło: Choay (1969, za Howard, 1902)

Bruno Taut, niemiecki architekt, którego szczyt działalności przypadł na lata 20. XX w., twierdził, że miasto powinno być projektowane jako pojednanie natury i twórczości człowieka. Był zwolennikiem teorii miasta ogrodu. Twierdził, że należy budować osiedla od podstaw, co miało odzwierciedlać nowy porządek społeczny. Jednym z głównych założeń było całkowite pokrycie terenów mieszkalnych zielenią (Szczypka-Gwiazda, 2012).

William Morris, XIX-wieczny angielski protosecesjonista, uważał, że wszystkie elementy miasta powinny być otoczone zielenią. Nienawidził przemysłu i głosił, że nawet fabryki powinny być umieszczane w ogrodach. Za niezwykle istotne uznał zacieranie różnic między wsią a miastem poprzez łączenie przestrzeni zurbanizowanej z zielenią. W swojej głównej wizji przedstawił Anglię przyszłości w 2003 r. jako kraj lasów i ogrodów (Mayer, 2011).

Francuski architekt, urbanista pochodzenia szwajcarskiego Le Corbusier na początku XX w. głosił, iż miasto powinno być wewnętrznie jednolite, otoczone zaś powinno być miastami ogrodami oraz oazami zieleni przeznaczonymi dla większości mieszkańców miasta. W późniejszych latach stworzył projekt *Ville radieuse*, czyli miasta promienistego. W założeniu zakładał koegzystencję terenów zielonych jako „symfonię terenów zieleni, listowia, gałęzi, trawników oraz połyskiwania diamentów przez gęstwinę drzew” (Ostrowski, 1975, s. 107).

Obszary zieleni w mieście miały przywrócić odpowiednią skalę nowoczesnego miasta dla mieszkańca, który może czuć się przytłoczony otaczającymi go gmachami.

W 1933 r. w Atenach odbył się IV Międzynarodowy Kongres Architektury Nowoczesnej (CIAM – Congrès International D’architecture Moderne) pod przewodnictwem Le Corbusiera, podczas którego przyjęto dokument głoszący zasady nowoczesnego planowania urbanistycznego, zwany Kartą Ateńską. Jej mottem było „słońce, przestrzeń, zieleń”. Na zakończenie odbyła się dyskusja o planowanym wprowadzeniu zieleni do miasta poprzez wykorzystanie zielonych dachów i roślinności otaczającej nową inwestycję, a także wciśnięcie jej pomiędzy istniejącą zabudową (Mumford, 2019).

Ekomiasto Berkeley to koncepcja miasta ekologicznego stworzona w nurcie Nowego Urbanizmu, który wbrew idei Howarda nie zakładał budowania miasta od podstaw, ale rozkwit miasta w oparciu o szacunek do przyrody i jej rozwój przyrody (Roseland, 2002). Ekomiasto miało zostać podzielone na ekowioski, rozwijane na bazie małych parków i terenów zielonych. Wiele punktów tej koncepcji odwołuje się do natury jako ważnej wartości we współczesnym mieście. Wyraźne są odniesienia do bliskości natury jako wartości o charakterze estetycznym, prowadzącej do doświadczenia piękna wynikającego z harmonijnego połączenia świata natury i kultury. Tendencja ta miała wielu przedstawicieli. Najbardziej znani z nich to Paul i Percival Goodmanowie, Ian McHarg, Christopher Alexander.

W 1990 r. Komisja Europejska opublikowała Zieloną Księgę w sprawie środowiska miejskiego, w której autorzy wskazują na potrzebę mieszania funkcji poszczególnych obszarów w mieście, np. poprzez wprowadzanie małych powierzchni zielonych, zielonych dachów i zielonych placów (Zielona Księga, 1990).

Kolejnym dokumentem opublikowanym przez Komisję Europejską jest Raport Europejskich Miast Zrównoważonych z 1996 r. Dokument ten jako główne zagrożenie dla zrównoważonego rozwoju miast wskazuje na malejącą liczbę powierzchni zielonych na terenach zurbanizowanych. Wskazuje także na podstawową zasadę współczesnego planowania przestrzennego, jaką jest podejście prośrodowiskowe (Raport, 1996). Wskazano, że jednym z głównych zadań rewitalizacji obszarów miejskich jest tworzenie nowych terenów zielonych, terenów rekreacyjnych lub innych obszarów cennych przyrodniczo.

Nowa Karta Ateńska, utworzona w 1998 r., zakłada m.in., że tereny zielone oraz wszelkie obszary środowiska przyrodniczego (*greenfields*) powinny pozostać pod szczególną ochroną i nie mogą podlegać presji miejskiej. Wymaga to wykorzystania wcześniej zagospodarowanych terenów (*brownfields*) (New Charter of Athens, 1998, s. 10).

W 2003 r. Europejska Rada Urbanistów wydała zaktualizowaną Kartę Nowych Aten. Po raz kolejny podkreślono potrzebę szczególnej ochrony obszarów przyrodniczych nie tylko poprzez odpowiednie regulacje prawne, ale także przez zwiększanie świadomości społecznej co do znaczenia tych obszarów i konieczności ich ochrony. W pracach planistycznych miasta należy traktować jako spójne ekosystemy, w których każde działanie powinno być poprzedzone analizą wpływu na środowisko naturalne (Nowa Karta Ateńska 2003 Wizja miast XXI wieku, 2003, s. 6).

Obecnie główną koncepcją zagospodarowania przestrzennego miast jest zasada zrównoważonego rozwoju, w której obok zagadnień społeczno-ekonomicznych kluczowe znaczenie ma stan środowiska przyrodniczego (Wojnarowska, 2011). Przejawia się to m.in. w Europejskim Zielonym Ładzie. Przyjęty w 2019 r. przez Komisję Europejską dokument zatytułowany „Europejski Zielony Ład” zawiera kilka wytycznych i kierunków działań mających na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej przez państwa członkowskie Unii Europejskiej do 2050 r. (Komunikat, 2019). Jednak w 28-stronicowym dokumencie dotyczącym ochrony środowiska w Europie nie ma informacji na temat rozwoju roślinności miejskiej.

Najnowsze trendy w zarządzaniu miastem opierają się na idei *smart city*, która zawiera przede wszystkim podstawy w postaci technologii cyfrowej. Koncepcja ta zakłada doskonalenie wszystkich usług komunalnych oraz sposób zarządzania oparty na współpracy z mieszkańcami (Yu, Merritt, 2022). Istnieje ponad 100 definicji samej koncepcji *smart city*. Liczba ta wynika z różnic ekonomicznych, kulturowych i wielu innych. Po przeanalizowaniu większości można przyjąć następującą definicję:

„Inteligentne, zrównoważone miasto (SSC) to miasto innowacyjne, które wykorzystuje technologie informacyjno-komunikacyjne (ICT) oraz inne środki w celu poprawy jakości życia, efektywności funkcjonowania i usług miejskich, i konkurencyjność, zapewniając jednocześnie zaspokojenie potrzeb obecnych i przyszłych pokoleń w odniesieniu do aspektów gospodarczych, społecznych i środowiskowych” (Yu, Merritt, 2022, s. 8).

W ramach koncepcji *smart city* funkcjonuje termin „*climate-smart and green city*”, którego głównym założeniem jest wspomniany już zrównoważony rozwój. Jednym z nadrzędnych celów jest rozwój zielonej infrastruktury poprzez planowanie i zarządzanie nią w systemach informacji geograficznej (GIS) (Crnčević i Bakić, 2012). Nie ustalono jednak wytycznych dla tych obszarów, nie zdefiniowano terenów zielonych i nie określono sposobu ich inwentaryzacji.

Najnowsza spośród analizowanych tutaj koncepcja miasta 15-minutowego powstała w 2020 r. jako wizja miasta po pandemii Covid-19. Zakłada możliwość dotarcia do urzędów, obiektów i miejsc użyteczności publicznej lub miejsc rozrywki dla wszystkich mieszkańców w ciągu jednego kwadransa pieszo lub na rowerze (Moreno i in., 2021). Zwolennicy tej koncepcji opowiadają się za możliwością komunikacji głównie pieszej, z wykorzystaniem wspomnianej wcześniej zielonej infrastruktury. Przy czym wszystkie trasy piesze i rowerowe powinny być wyposażone w zagospodarowaną zielen (Abdelfattah i in., 2022).

Warto również wspomnieć o inicjatywie Komisji Europejskiej nowego europejskiego Bauhausu. Celem projektu jest poprawa procesów projektowania dla zrównoważonego rozwoju, w tym zmniejszenia emisyjności. Jednym z problemów opisywanych w ramach tej inicjatywy jest konieczność zwiększenia udziału rozwiązań opartych na elementach przyrody w mieście. Założono, że jest to możliwe głównie poprzez zastosowanie programów partycypacji społecznej i zdefiniowaniu wspólnej odpowiedzialności za zrównoważony rozwój miasta (New European Bauhaus, 2022).

Pomimo obecności od wielu stuleci problematyki zagospodarowania terenów zieleni miejskiej w szeroko rozumianym planowaniu przestrzennym, wciąż brakuje jednoznacznych kryteriów prezentujących najlepsze sposoby projektowania terenów zielonych w miastach. Dzieje się tak z kilku powodów. Mamy do czynienia z zagadnieniem wielowątkowym, uwzględniającym zarówno elementy przyrodnicze, ekonomiczne, logistyczne, jak i socjologiczne, które w wielu aspektach mają zupełnie przeciwne priorytety. Dlatego na przestrzeni lat powstawały i będą powstawać nowe pomysły, uwzględniające tereny zielone w miastach. Co więcej, wciąż istnieją nowe technologie i metody, które mogą pomóc w interpretacji obszarów zielonych, szczególnie miejskich. Hiperspektralne dane satelitarne i chmury punktów LiDAR mogą dostarczyć nam nowego rodzaju informacji o pokryciu przestrzennym obszarów miejskich. Dlatego bardzo ważne jest stworzenie nowych definicji zieleni w oparciu o wartości liczbowe pochodzące z danych teledetekcyjnych.

Poszukiwanie jednolitej interpretacji terenów zielonych w mieście jest daremne, zarówno w kontekście definicji literaturowych, jak i aktów prawnych. Należy zatem zadbać o ujednolicenie tego pojęcia na poziomie międzynarodowym, aby móc posługiwać się nim w sposób jednoznacznie interpretowany. Wskazane byłoby rozpoczęcie od ujednolicenia nomenklatury, tak aby zakres stosowanych do opisu obszarów pokrytych roślinnością pojęć ograniczał się do terminów powszechnie znanych.

6. SYNTEZA – RAPORT PRZEGLĄDU

W tabeli 5 zaprezentowano informacje opisujące zieleni miejską według autorów, których jej interpretacja została wykorzystana w niniejszej pracy. Zbiór ten przedstawia 22 źródła, w których wymieniono prace naukowe oraz akty prawne. Mimo że tabela zawiera jedynie część istniejących definicji widać wyraźnie rozbieżność w interpretacji terenów zielonych w mieście.

Tabela 5. Wybrane definicje zieleni miejskiej oraz ich autorzy

Definicja zieleni miejskiej	Autor, rok
Wszystkie tereny biologicznie czynne w granicach miasta	Böhm w Walkowicz (2002)
Przestrzeń porośnięta roślinnością na obszarach miejskich	Łukasiewicz i Łukasiewicz (2016)
Obszary krajobrazowe wraz z elementami z nimi związanymi porośnięte roślinnością, pełniące funkcje publiczne	Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody.
Parki, działki, lasy i ich obrzeża, pojedyncze drzewa, tereny wykorzystywane rolniczo, ogrody, obszary doświadczeń przyrodniczych oraz obszary zbliżone do natury towarzyszące obszarom komunikacyjnym	Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009. (2009). (BGBl. I S. 2542)
Wszelkie formy zieleni otwartej i zielonej zabudowy, parki, cmentarze, ogrody działkowe, ugory, place zabaw, tereny sportowe, zieleń uliczną, zieleń osiedlową, tereny zielone na budynkach użyteczności publicznej, obszary ochrony przyrody, lasy i ogrody prywatne oraz ziemia rolna, elewacje i dachy porośnięte roślinnością, roślinność na obiektach infrastrukturalnych oraz zieleń we wnętrzach budynków	Federalne Ministerstwo Środowiska, Ochrony Przyrody, Budownictwa i Bezpieczeństwa Jądrowego Niemiec (2015)
Element przyrody tworzący określoną wartość dla człowieka	Parlamentarne Biuro Nauki i Technologii Wielkiej Brytanii (2016)
Las miejski (<i>urban forestry</i>) – obszary leśne, ale także grupy drzew, pojedyncze drzewa, a także krzewy i roślinność występującą w parkach, cmentarzach i na terenach ogrodowych	Konijnendijk i in. (2006); Escobedo i in. (2011); Ferrini i in. (2017)
Zielona infrastruktura – tereny zdolne do absorpcji wód opadowych	Grabowski i in. (2022); Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (2019)
Sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych, zaprojektowanych i zarządzanych w taki sposób, aby zapewnić jak największe spektrum usług ekosystemowych wyłącznie na obszarze miejskim	Komisja Europejska (2013)
Niebiesko-zielona infrastruktura – lasy, naturalne tereny zielone, rzeki, potoki i inne ciekły, obszary naturalnej retencji, łąki, pola, pastwiska, tereny przybrzeżne, drzewa i krzewy	Solarek i in. (2016)
Tereny zielone i zbiorniki wodne, tereny podmokłe, ogrody prywatne, drzewa przyuliczne, obszary porośnięte koronami drzew oraz tereny przeznaczone do użytku publicznego	Europejska Agencja Środowiskowa (2019)

Parki, skwery i zadrzewione cmentarze (nie wszystkie) zlokalizowane w granicach zabudowy miejskiej	Corine Land Cover, Land.copernicus.eu (2017)
Zurbanizowane obszary zielone, obszary sportu i rekreacji, obszary rolne, pół-naturalne, bagna oraz lasy.	Urban Atlas, EEA (2009)
Parki krajobrazowe, skwery, tereny zielone (ale tylko te poza ulicami), ogrody botaniczne, ogrody działkowe oraz tereny zieleni nieurządzonej niesklasyfikowane, jak lasy i tereny porośnięte drzewami i krzewami	Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 29 stycznia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii w sprawie ewidencji gruntów i budynków
Tereny zalesione, drzewa i krzewy, cmentarze oraz trawniki	Baza Danych Obiektów Topograficznych
Tereny sportowo-rekreacyjne, tereny zielone, cmentarze, roślinność (cała), tereny rolne, lasy, zagajniki, stepy	Niemiecki Urząd Statystyczny
Lasy, krzewy, użytki zielone, powierzchnie samoistnie odnowione	Land Use and Coverage Area frame Survey (LUCAS)
Wszystkie drzewa, niezależnie od tego, czy występują w lasach, czy występują w grupach, czy pojedynczo, i są zlokalizowane w obszarach miejskich lub podmiejskich	Organizacja Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO)
Teledetekcyjny wskaźnik wegetacyjny NDVI powyżej 0,7	Tomaszewska i in. (2011)
NDVI powyżej 0,2 dla ortofotomapy oraz NDVI powyżej 0,5 dla zdjęć satelitarnych	Pluto-Kossakowska i in. (2018)
NDVI > 0,1	Pyra i Adamczyk 2018; Robak i in. (2016)
NDVI > 0,3	Bielecki i Będkowski (2022)

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowano także w formie tabelarycznej zebrane wytyczne standardów urbanistycznych uwzględniające zielen miejską (tabela 6). Znalaziono jedynie 5 aktów prawnych bądź rekomendacji, w których przedstawiono zalecenia dotyczące terenów zieleni w miastach.

Tabela 6. Wytyczne standardów urbanistycznych dla zieleni miejskiej wraz z rokiem i miejscem ich opracowania/wprowadzenia

Wytyczne	Czas i miejsce
3200 m od miejsca zamieszkania, minimalna powierzchnia 200 ha	Belgia, 2003
Min 8 m ² na 1 mieszkańca	Polska, 1974
2 ha na każde 1000 mieszkańców, z maksymalną odległością wynoszącą 0,25 mili	Anglia, 2009
Między 3 a 20 m ² na mieszkańca w zależności od rangi terenu oraz wielkości miasta	Białoruś, 2003
Odległość od miejsca zamieszkania max 300 m (zasada 3–30–300)	Miasta klimatu umiarkowanego, 2022

Źródło: opracowanie własne.

Ostatnim zestawieniem jest prezentacja wybranych założeń urbanistycznych, w których zielen miejska była jednym z kluczowych elementów planowania miasta (tabela 7). Wyselekcjonowano 14 koncepcji znanych od starożytności aż do czasów współczesnych (tabela 7). Wyraźnie zarysowuje się dysproporcja między liczbą dostępnych koncepcji uwzględniających zielen miejską a konkretnych wytycznych dotyczących ich egzekwowania (tabela 6).

Tabela 7. Wybrane założenia urbanistyczne uwzględniające zielen miejską wraz z czasem i miejscem ich opracowania

Koncepcje zieleni – główne założenie	Czas, miejsce
Ogrody Semiramidy – jak największa liczba roślin na sztucznie nawadnianych tarasach	VI w. p.n.e., Babilon
Miasto ogród – tereny zieleni pomiędzy innymi funkcjami, stosunek terenów zabudowanych do zielonych 1:4	1902, Anglia
Miasto linearne – tereny zieleni pomiędzy innymi funkcjami	1882, Hiszpania
Miasto przemysłowe – tereny mieszkaniowe oddzielone od przemysłowych terenami zieleni	1901, Francja
Zielone miasta Bruno Tauta – całkowite pokrycie wolnych przestrzeni terenów mieszkaniowych roślinnością	1925, Niemcy
Teoria Williama Morrisa – umieszczanie każdej funkcji miejskiej w głębokiej zieleni, w ogrodach	1885, Anglia
Miasto promienne – miasto jednolite, otoczone terenami zieleni	1947, Francja
Karta ateńska – zielen wtłoczona pomiędzy budynki, zielone dachy	1933, Europa
Ecocity – miasto podzielone na ekologiczne wioski rozwijające się w oparciu o małe parki i ciągi zieleni	1987, USA
Zieloną Księgę Środowiska Miejskiego – wymieszanie funkcji miejskich z niewielkimi terenami zieleni, wprowadzenie zielonych dachów i zazielenionych podwórz	1990, Europa
Raport Europejskich Miast Zrównoważonych – głównym założeniem rewitalizacji miast powinno być wprowadzenie terenów zielonych	1996, Europa
Nowa Karta Ateńska – miasta jako spójne ekosystemy	2003, Europa
Europejski Zielony Ład – neutralność klimatyczna poprzez wprowadzenie większej ilości terenów zieleni (brak specyficznych wytycznych)	2019, Europa
Miasto 15-minutowe – wszystkie ciągi komunikacyjne powinny być wyposażone w zagospodarowaną zielen	2020, kraje wysoko rozwinięte

Źródło: opracowanie własne.

7. PODSUMOWANIE

Roślinność miejska od setek lat jest jednym z kluczowych czynników wyznaczających kierunki rozwoju obszarów zurbanizowanych. Nawet w czasach intensywnej industrializacji urbaniści dostrzegali zalety i potrzeby inwestowania w tereny zielone, zwłaszcza w sąsiedztwie osiedli mieszkaniowych. Temat zagospodarowania terenów zieleni miejskiej stał się szczególnie istotny w ostatnich dziesięcioleciach, gdyż tematyka związana z zapobieganiem postępowi globalnego ocieplenia staje się coraz ważniejsza w opinii publicznej.

Kolejną kwestią jest jednolity sposób wyznaczania takich obszarów i klasyfikowania ich do odpowiednich grup. Obecnie brak jest jakichkolwiek relacji i zależności między

poszczególnymi sposobami i metodami definiowania terenów zieleni. Sposobem na to mogą być badania teledetekcyjne, szczególnie w kontekście obszarów samoistnie zasiedlonych przez roślinność, które są pomijane w większości definicji, klasyfikacji, standardów urbanistycznych czy koncepcji planistycznych. Ważne jest uzyskanie mierzalnych wskaźników, które w jednolity sposób definiują daną klasę lub typ zieleni miejskiej. Należy jednak mieć na uwadze, że nie tylko jakość zieleni, widoczna dzięki stosowaniu odpowiednich wskaźników dotyczących roślinności, obliczonych na podstawie zdjęć satelitarnych, ale także jej objętość są głównymi czynnikami określającymi stan zieleni na danym obszarze.

Kluczowe znaczenie mają także dane demograficzne, gdyż tereny zielone powinny jak najlepiej służyć mieszkańcom, bo wtedy najskuteczniej spełniają swoją funkcję. Konieczne byłoby zatem opracowanie jednolitych kryteriów opartych na mierzalnych danych, niezależnych od interpretacji różnych autorów.

BIBLIOGRAFIA

- Abdelfattah, L., Deponte, D., Fossa, G. (2022). The 15-minute city: Interpreting the model to bring out urban resiliencies. *Transportation Research Procedia*, 60, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.043>
- Batala, E., Tsitsoni, T. (2009). Street tree health assessment system: A tool for study of urban greenery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 4(4), 345–356. <https://doi.org/10.2495/SDP-V4-N4-345-356>
- Będkowski, K., Bielecki, A. (2017). Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. *Teledetekcja Środowiska*, 57, 5–14.
- Białobok, S. (1976). Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka. W: W. Michajłow (red.), *Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka* (s. 223–245). PWN.
- Bielecka, E., Ciołkosz, A. (2004). Metodyczne i realizacyjne aspekty aktualizacji bazy Corine Land Cover. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, 50(108), 73–92.
- Bielecki, A., Będkowski, K. (2022). The degree of greenery in Łódź city, Poland – Clearing up discrepancies between official statistics and satellite data. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 21(4), 489–512.
- Blanco, G., Velasco, T. (1996). Bird-habitat relationships in an urban park during winter. *Folia Zoologica*, 45, 35–42.
- Błaszczyk, M., Kosmala, M. (2009). Rola i znaczenie drzew w krajobrazie – aleje przydrożne i przyuliczne. *Przegląd Komunalny*, 8.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2015) https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00015987
- Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009. (2009). (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ger96959.pdf>
- Choay, F. (1969). The modern city: Planning in the 19th century. Ann Arbor: G. Braziller Copernicus. European Geosciences Union. <https://acp.copernicus.org>
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.

- Crnčević, T., Bakić, O. (2012). GIS u funkciji planiranja predela na primeru donjeg Podunavlja. W S. Milijić, B. Josimović, T. Crnčević (red.) *Održivi prostorni razvoj Podunavlja u Srbiji*, Knjiga 1, Posebna izdanja No. 71, Belgrade: IAUS, 179–194.
- Crompton, J. (2001). The impact of parks on property values: A review of the empirical evidence. *Journal of Leisure Research*, 33. <https://doi.org/10.1080/00222216.2001.11949928>
- Czornik, M. (2012). Konsumpcja miejska. Ekonomiczne refleksje nad ewoluowaniem funkcji miejskich. *Prace Naukowe. Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach*,
- Daily, G.C. (1997). Introduction: What are ecosystem services? W: G.C. Daily (red.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (s. 1–10). Island Press, Washington.
- Dąbrowska-Milewska, G. (2010). Standardy urbanistyczne dla terenów mieszkaniowych – wybrane zagadnienia. *Architecturae et Artibus*, 2(1), 17–31.
- Deering, D.W. (1978). Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station.
- Dijkstra, L., Poelman, H. (2012). Cities in Europe: the new OECD-EC definition. *Regional focus*, 1(2012), 1-13.
- Dudley. Metropolitan Borough Council. (b.r.). <https://www.dudley.gov.uk>
- Dyrektywa Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk naturalnych oraz dzikiej fauny i flory. [https://orka.sejm.gov.pl/Drektywy.nsf/all/31992L0043/\\$File/31992L0043.pdf](https://orka.sejm.gov.pl/Drektywy.nsf/all/31992L0043/$File/31992L0043.pdf)
- Edgar, D.R., Kershaw, G.P. (1994). The density and diversity of the bird populations in three residential communities in Edmonton, Alberta. *Canadian Field-Naturalist*, 108, 156–161.
- Escobedo, F.J., Kroeger, T., Wagner, J.E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2011.01.010>
- European Commission. (1990, 27 czerwca). *Green paper on the urban environment: Communication from the Commission to the Council and Parliament* (COM [90] 218 final). Brussels. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0e4b169c-91b8-4de0-9fed-ead286a4efb7/language-en>
- European Commission. (1996, marzec). *European sustainable cities: Report*. Expert Group on the Urban Environment, Directorate General XI. Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Brussels. <https://edz.bib.uni-mannheim.de/www-edz/pdf/sonstige/sustcities.pdf>
- European Commission. (b.r.). *Science for environment policy*. https://environment.ec.europa.eu/research-and-innovation/science-environment-policy_en

- European Commission: Directorate-General for Environment. (2014). *Building a green infrastructure for Europe*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/54125>
- European Environment Agency. (b.r.a). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7230759d-f136-44ae-9715-1eacc26a11af> (27.10.2024)
- European Environment Agency. (b.r.b). *Environmental statement 2023*. Pobrano 6.04.2023 r. z <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-statement-2023>
- European Environment Agency. (2019). *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów*. COM/2019/640 final. Bruxelles. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- European Environment Agency. (2020). *Healthy environment, healthy lives: How the environment influences health and well-being in Europe* (EEA Report. No 21/2019). <https://doi.org/10.2800/53670>
- Eurostat Statistics Explained, LUCAS - Land use and land cover survey (2024). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=LUCAS_-_Land_use_and_land_cover_survey#Defining_land_use.2C_land_cover_and_landscape
- Feltynowski, M., (2023). Urban green spaces in land-use policy – types of data, sources of data and staff – the case of Poland. *Land Use Policy*, 127, Artykuł 106570. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106570>.
- Ferrini, F., Konijnendijk van den Bosch, C.C., Fini, A. (2017). Routledge handbook of urban forestry. *Routledge Handbook of Urban Forestry*, 1–547. <https://doi.org/10.4324/9781315627106>
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653.
- Fisher, P., Comber, A.J., Wadsworth, R. (2005). Land use and land cover: Contradiction or complement. *Re-presenting GIS*, 85, 98.
- Friesen, L.E., Eagles, P.F.J., MacKay, R.J. (1995). Effects of residential development on forest-dwelling Neotropical migrant songbirds. *Conservation Biology*, 9, 1408–1414.
- Girvetz, E.H., Thorne, J.H., Berry, A.M., Jochen A.G. Jaeger, J.A.G. (2008). Integration of landscape fragmentation analysis into regional planning: A statewide multi-scale case study from California, USA. *Landscape and Urban Planning*, 86(3–4), 205–218, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.02.007>.

- Grabowski, Z., McPearson, T., Matsler, M., Groffman, P., Pickett, S. (2022). What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(3). <https://doi.org/10.1002/fee.2445>
- Gutowski, B. (2006). Przestrzeń marzycieli. *Miasto jako projekt utopijny*, Warszawa. Pobrano 12.04.2023 r. z http://www.miastoidealne.sztuka.edu.pl/filozofia_miasta_miasto_jako_projekt_utopijny.pdf
- Haq, S.M.A. (2011). Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment. *Journal of Environmental Protection*, 2(5), 601–608.
- Hohtola, E. (1978). Differential changes in bird community structure with urbanisation: A study in central Finland. *Ornis Scandinavica*, 9, 94–100.
- Houses of Parliament. The Parliamentary Office of Science and Technology. (2016). *Natural capital: An overview* (POST Note, 542). <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/POST-PN-0542/POST-PN-0542.pdf>
- Jackson, R.D., Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Jarocińska, A. (2011). Modelowanie charakterystyk spektralnych heterogenicznych zbiorowisk trawiastych przy użyciu modelu transferu. *Teledetekcja Środowiska*, 46, 29–42.
- Jarocińska, A., Zagajewski, B. (2008). Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja Środowiska*, 40, 100–124.
- Jomaa, I., Auda, Y., Saleh, B.A., Hamze, M., Safi, S. (2008). Landscape spatial dynamics over 38 years under natural and anthropogenic pressures in Mount Lebanon. *Landscape and Urban Planning*, 87, 67–75.
- Kawoń, K., Żmuda, S. (1977). Rola zieleni w kształtowaniu środowiska człowieka regionów przemysłowo-miejskich. *Studia nad Ekonomiką Regionu*, 8, 181–120.
- Komisja Europejska (2013). Zielona infrastruktura—zwiększanie kapitału naturalnego Europy. Dostępne na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT>.
- Konijnendijk, C.C. (2022). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z>
- Konijnendijk, C.C., Ricard, R.M., Kenney, A., Randrup, T.B. (2006). Defining urban forestry – A comparative perspective of North America and Europe. *Urban Forestry Urban Greening*, 4 (3–4), 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2005.11.003>

- Kopańczyk, K., Fitrzyk, M. (2016). Satellite imagery for the improvement of SOZO database – the case study in Central and High Sudetes. *Acta Scientiarum Polonorum Geodesia et Descriptio Terrarum*, 15(1–4), 5–18.
- Kosiński, K., Hoffmann-Niedek, A. (2008). Klasyfikacja obiektowa użytków zielonych z wykorzystaniem wieloletnich zmian NDVI i filtracji kierunkowych obrazu satelitarnego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 273–282.
- Kosiński, K., Kozłowska, T. (2003). Zastosowanie wskaźnika NDVI i filtracji kierunkowej do rozpoznawania użytków zielonych oraz analizy zmian siedlisk i zbiorowisk łąkowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 13B, 387–395.
- Kosmala, M. (2005). Po co ludziom drzewa, czyli o roli i znaczeniu drzew w życiu człowieka. W: E. Oleksiejuk, J. Piotrowiak (red.), *Zieleń miejska – naturalne bogactwo miast – zasady gospodarowania o ochrona. Materiały konferencyjne* (s.), Toruń.
- Krauz, K. (1997). Oddziaływanie fitoncydów na organizm człowieka. *Folia Turistica*, 7, 39–43.
- Kronenberg, J. (2012). Usługi ekosystemów w miastach. W: *Zrównoważony rozwój – zastosowanie*. Kraków, Fundacja Sendzimira, 7–26.
- Krukowski, M. (2018). Modelowanie kartograficzne w ocenie jakości życia w mieście – aspekt zieleni miejskiej w Lublinie, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio B–Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 73, 7–27. <http://dx.doi.org/10.17951/b.2018.73.0.7-27>
- Krukowski, M., Cebrykow, P., Płusa, J. (2016). Klasyfikacja terenów zieleni w Lublinie na podstawie zdjęcia satelitarnego IKONOS 2. *Barometr Regionalny. Analizy i Prognozy*, 2, 35–44.
- Kubalska, J., Preuss, R. (2014). Wykorzystanie danych fotogrametrycznych do inwentaryzacji zieleni na terenach zurbanizowanych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 75–86. <https://doi.org/10.14681/afkit.2014.006>.
- Land.copernicus.eu (2024). Pobrane z: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover> (27.10.2024)
- Lhermitte, S., Verbesselt, J., Verstraeten, W.W., Coppin, P. (2010). A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(6), 673–682. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.6.673>
- Li, Q., Kobayashi, M., Wakayama, Y., Inagaki, H., Katsumata, M., Hirata, Y., Hirata, K., Shimizu, T., Kawada, T., Park, B. J., Ohira, T., Kagawa, T., Miyazaki, Y. (2009). Effect of

- phytoncide from trees on human natural killer cell function. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 951–959.
<https://doi.org/10.1177/039463200902200410>
- Licznar, M. (1995). Erozja gleb w Polsce. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 418(1), 91–100.
- Liu, C., Li, X. (2012). Carbon Storage and Sequestration by Urban Forests in Shenyang, China. *Urban Forestry Urban Greening*, 11(2), 121–128.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.03.002>
- Łukasiewicz, A., Łukasiewicz, S. (2016). *Rola i kształtowanie zieleni miejskiej*. Wyd. Naukowe UAM. <https://doi.org/10.14746/amup.9788323237297>
- Maurya, R., Gupta, P. R., Shukla, A. S., & Sharma, M. K. (2012, March). Building extraction from very high resolution multispectral images using NDVI based segmentation and morphological operators. In *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM-2012)* (pp. 577-581)
- McCann, E.J. (2002). Space, citizenship, and the right to the city: A brief overview. *GeoJournal*, 58(2–3), 77–79. <http://www.jstor.org/stable/41147753>
- McIntyre, N.E., Knowles-Yáñez, K. Hope, D. (2000). Urban ecology as an interdisciplinary field: differences in the use of “urban” between the social and natural sciences. *Urban Ecosystems*, 4, 5–24. <https://doi.org/10.1023/A:1009540018553>
- Mayer, J. (2011). A darker shade of green: William Morris, Richard JeVeries, and posthumanist ecologies. *The Journal of William Morris Studies*, 19, 79–92.
- Michałowska, K., Hejmanowska, B. (2008). Możliwości wykorzystania wieloczasowych obrazów znormalizowanego indeksu wegetacji (NDVI) i archiwalnych ortofotomap do badania zmienności wybranych elementów środowiska. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 397–407.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, D.C.: Island Press
- Misztal, S. (1999), Kierunki zmian w strukturze funkcjonalnej i przestrzeni miasta Unii Europejskiej, W: J.M. Chmielewski (red.), *Przestrzeń Europy* (s. 14–17). Odział Warszawski Towarzystwa Urbanistów Polskich.
- Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., Pratlong, F. (2021). Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart Cities*, 4(1), 93–111.
- Mumford, E. (2019). CIAM and its outcomes. *Urban Planning*, 4(3), 291–298.

- Natuhara, Y., Imai, C. (1996). Spatial structure of avifauna along urban-rural gradients. *Ecological Research*, 11, 1–9.
- New Charter of Athens 1998 (1998, marzec). <https://archive.ectp-ceu.eu/ectp-ceu.eu/images/stories/download/Athens-Charter-1998.pdf>
- New Charter of Athens 2003. *Wizja miast XXI wieku*. European Council of Town Planners, Lizbona, 20.11.2003, s. 6. <https://toruntour.pl/upload/file/nowakartaatenska.pdf>
- New European Bauhaus (2022). Pobrane z: https://new-european-bauhaus.europa.eu/about/about-initiative_en (27.10.2024)
- Nowakowska-Blaszczyk, A. (1988). Możliwości wprowadzania wód deszczowych do gruntu. *Ochrona Środowiska*, 81(3–4), 36–37.
- Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 29 stycznia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii w sprawie ewidencji gruntów i budynków. Dz.U. 2024 poz. 219. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20240000219>
- Ostrowski, W. (2001). Wprowadzenie do historii budowy miast. *Ludzie i środowisko*, wyd. 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Ozsoy, G., Aksoy, E. (2015). Estimation of soil erosion risk within an important agricultural sub-watershed in Bursa, Turkey, in relation to rapid urbanization. *Environmental Monitoring and Assessment* 187. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4653-9>
- Pluto-Kossakowska, J., Władyka, M., Tulkowska, W. (2018). Ocena obrazowych danych teledetekcyjnych do identyfikacji obiektów w zielonej i błękitnej infrastrukturze. *Teledetekcja Środowiska*, 59, 13–27.
- Popek, R., Gawrońska, H., Gawroński, S. (2011). Zdolność krzewów do akumulacji mikropyłów z powietrza. *Nauka, Przyroda, Technologie*, 5(6), 124–133.
- Prastacos, P., Chrysoulakis, N., Kochilakis, G. (2011). Urban Atlas, land use modelling and spatial metric techniques. 51st Congress of the European Regional Science Association: “New Challenges for European Regions and Urban Areas in a Globalised World”, 30 August – 3 September 2011, Barcelona, Spain.
- Pyra, M., Adamczyk, J. (2018). Klasyfikacja zorientowana obiektowo w inwentaryzacji obiektów Zielonej Infrastruktury na przykładzie dzielnicy Ursynów w Warszawie. *Teledetekcja Środowiska*, 59, 29–49.
- Robak, A., Gadawska, A., Milczarek, M., Lewiński, S. (2016). Wykrywanie wody na zdjęciach optycznych Sentinel-2 na podstawie wskaźników wodnych. *Teledetekcja Środowiska*, nr 55, 59-72.

- Roseland, M., (2002). Dimensions of the eco-city. W: M. Pacione (ed.), *The city. Critical concepts in the social sciences, Vol. 1: The city in global context* (s.197-202). Routledge.
- Rouse, Jr, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. E75-10354).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*. DzU 2002, nr 75, poz. 690. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20020750690/O/D20020690.pdf>
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa z dnia 29 marca 2001* Dz.U. 2001 nr 38 poz. 454.
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20010380454>
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 23 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz mapy zasadniczej*. DzU z 2021, poz. 1385.
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210001385>
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*. DzU 1999, nr 43, poz. 430.
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19990430430>
- Ruszczuk, A., Rodrigues, J.J.S., Roberts, T.M.T., Bendati, M.M.A., del Pino, R.S., Marques, J.C.V., Melo, M.T.Q. (1987). Distribution patterns of eight bird species in the urbanization gradient of Porto Alegre, Brazil. *Ciencia e Cultura*, 39, 14–19.
- Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M., Chen, Y. (2016). *Guidelines on urban and peri-urban forestry*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, nr 178, Rome
- Smart sustainable cities: An analysis of definitions*. (2014). Focus Group Technical Report. International Telecommunication Union ITU-T. Pobrano 16.03.2023 r. z https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ssc/Documents/Approved_Deliverables/TR-Definitions.docx
- Solarek, K., Ryńska, E., Mirecka, M. (2016). *Urbanistyka i Architektura w zintegrowanym gospodarowaniu wodami*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Sozański, J. (2010). *Prawo Unii Europejskiej*. PWP Iuris, 143.
- Stroitielnyje normy Republiki Bielarus*. (2003). *Gradostroi-telstwo. Planirowka i zastrojka nasielonnych pyunktow*, Ministerstwo Architektury i Stroitelstwa Respubliki Bielarus, Minsk, CH 4.3.01.09. <https://normy.by/tnpa/1/6966.pdf>

- Styrna-Bartkowicz, K. (1977). Ekologiczne kryteria analizy „miast idealnych” XIX i początku XX wieku. *Teka Komisji Urbanistyki i Architektury*, XI, 139–145. <https://acp.copernicus.org>
- Sulma, S., Yulianto, F., Nugroho, J.T., Sofan, P. (2016). A support vector machine object based image analysis approach on urban green space extraction using Pleiades-1A imagery. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2), 2–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0108-8>
- Szarek-Iwaniuk, P. (2021). Measurement of spatial order as an indicator of sustainable development of functional urban areas in regional capitals. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 20(2), 139–152. <https://doi.org/10.31648/aspal.6536>.
- Szczepanowska, H.B. (2008). Drzewa w otoczeniu ulic – problemy inżynieryjne, społeczne, ekonomiczne oraz bezpieczeństwa. *Człowiek i Środowisko*, 32(3–4), 87–107.
- Szczepanowska, H.B. (2010). Drzewa przydrożne a bezpieczeństwo ruchu. *Jak zachować aleje*. Wydawnictwo Drogi dla Natury, Wrocław.
- Szczepanowska, H.B. (2012). Miejsce terenów zieleni w strukturze zintegrowanego projektowania, zarządzania i oceny ekologicznej inwestycji miejskich. *Człowiek i Środowisko*, 36(1–2), 25–49.
- Szczepańska, M., Maćkiewicz, B., Dziwiatowska, A. (2017). Tereny zieleni a ceny nieruchomości mieszkaniowych w Poznaniu. *Biuletyn KPZK*, 266, 142–158.
- Szczypka-Gwiazda, B. (2012). Forma urbanistyczno-architektoniczna a władza. Kilka uwag o planach trójmiasta Bytom–Zabrze–Gliwice na tle utopijnych koncepcji urbanistycznych twórców Republiki Weimarskiej. W: Konstantynów, D., Pasieczny, R., & Paszkiewicz, P. (Red.). (2001). *Sztuka i władza: materiały z konferencji zorganizowanej przez Instytut Sztuki Polskiej Akademii Nauk w dniach 30 XI-2 XII 1998 roku w Warszawie* (s. 133–142). Warszawa: Instytut Sztuki Polskiej Akademii Nauk.
- Taylor, A.F., Kuo, F.E., Sullivan, W.C. (2001). Coping with ADD: the surprising connection to green play settings. *Environment and Behavior*, 33(1), 54–77.
- Taylor, L., Hochuli, D.F. (2017). Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. *Landscape and Urban Planning*, 158, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.024>
- Tomaszewska, M., Lewiński, S., Woźniak, E. (2011). Wykorzystanie zdjęć satelitarnych MODIS do badania stopnia pokrycia terenu roślinnością. *Teledetekcja Środowiska*, 46, 13–22.

- Trisakti, B. (2017). Vegetation type classification and vegetation cover percentage estimation in urban green zone using pleiades imagery. W: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012003>
- Turlej, K. (2009). Porównanie wartości NDVI odczytanych z obrazów satelitarnych NOAA AVHRR, SPOT-VEGETATION i TERRA MODIS. *Teledetekcja Środowiska*, 42, 83–88. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-2c3caee4-648e-44a8-afc6-2797761107d0>
- Urbański, P. (2005). Znaczenie zieleni w miastach. *Przegląd Komunalny*, 8, 35-36.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane. DzU 1994, nr 89, poz. 414. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19940890414/U/D19940414Lj.pdf>
- Ustawa z dnia 8 marca 1990 r. o samorządzie gminnym. DzU 1990, nr 16, poz. 95. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19900160095/U/D19900095Lj.pdf>
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody. DzU 2004, nr 92, poz. 880. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20040920880/U/D20040880Lj.pdf>
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. DzU 2003, nr 80, poz. 717. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20030800717/U/D20030717Lj.pdf>
- Ustawa z dnia 29 sierpnia 2003 r. o urzędowych nazwach miejscowości i obiektów fizjograficznych. DzU, 2003, nr 166, poz. 1612. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20031661612/U/D20031612Lj.pdf>
- Van Herzele, A., Wiedemann, T. (2003). A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces. *Landscape and urban planning*, 63(2), 109–126. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00192-5)
- Walbridge, M.R. (1997). Urban ecosystems. *Urban Ecosystems*, 1, 1–2
- Walkowicz, T. (2002), Społeczne i ekologiczne aspekty tworzenia i utrzymania terenów zieleni w miastach. W: J. Słodczyk (red.), *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast* (s. 347–358). Uniwersytet Opolski.
- Walków, M., Kronenberg, J. (2012), Przyroda w mieście i biznes kwitnie. Fundacja Sendzimira, *Zieleń Miejska*, 10, 44-45.
- Wang, X. J. (2009). Analysis of problems in urban green space system planning in China. *Journal of Forestry Research*, 20, 79–82. <https://doi.org/10.1007/s11676-009-0014-2>
- What is green infrastructure? (2019). US Environmental Protection Agency. Washington, DC: EPA. https://19january2021snapshot.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure_.html

- Wirth, H., Schilbach, G., Wirth, A. (1987). Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich, *Vermessungstechnik*, 33(2), 56–59.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3313.8162>
- Wojnarowska, A. (2011). *Odnowa środowiska miejskiego w świetle polityki Unii Europejskiej oraz w dokumentach Europejskiej Rady Urbanistów*. <https://doi.org/10.18778/7525-580-5.07>.
- Woolfenden, G.E., Rohwer, S.A. (1969). Bird populations in the suburbs and two woodland habitats in PinellasCounty, Florida. *Journal of the Florida State Board of Health*, 12, 101–109.
- Xue, J., Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1353691
- Yu, X., & Merritt, J. (2022). Digital twin cities: Framework and global practices. *Progress in Planing*.
https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Digital_Twin_Cities_Framework_and_Practice_2022, 2.
- Zięba-Kulawik, K., Hawryło, P., Wężyk, P., Matczak, P., Przewoźna, P., Inglot, A., Mączka, K. (2021). Improving methods to calculate the loss of ecosystem services provided by urban trees using LiDAR and aerial orthophotos. *Urban Forestry Urban Greening*, 63, Artykuł 127195. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127195>

Adam Bielecki
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji

Łódź, 18 października 2024

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy pt. *The use of socio-environmental indicators to assess the needs for the development of urban greenery*, Sustainability, vol. X, 2024, s. YY-ZZ, autorstwa: Adam Bielecki, Krzysztof Będkowski

udział poszczególnych współautorów polegał na:

- **Adam Bielecki** (80%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, oprogramowanie, analiza danych, wizualizacje, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu
- **Krzysztof Będkowski** (20%) - koncepcja pracy, metodyka, przegląd literatury, analiza danych, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, odpowiedź na recenzje i przygotowanie ostatecznej wersji artykułu

Adam Bielecki


.....
podpis

Krzysztof Będkowski


.....
podpis

Article

The Use of Socio-Environmental Indicators to Assess the Needs Relating to the Development of Urban Greenery

Adam Bielecki ^{1,2,*}  and Krzysztof Będkowski ^{1,2} 

¹ University of Lodz, Faculty of Geographical Sciences, Institute of Urban Geography, Tourism Studies and Geoinformation, Stefana Kopcińskiego Street 31, 90-142 Łódź, Poland; krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl

² Polish Geographical Society—Remote Sensing Branch, Krakowskie Przedmieście Street 30, 00-927 Warsaw, Poland

* Correspondence: adam.bielecki@edu.uni.lodz.pl

Abstract: Areas covered with vegetation play a key role in life on Earth and should be inventoried in a clear and complete manner in order to improve the process of their protection and development. Data showing the amount of greenery in areas most deformed by humans, i.e., urbanized areas, are particularly important. Local governments need to know how to invest their limited resources in the quality of life of residents by supplementing the urban fabric with additional vegetation. Unfortunately, there are currently few proposals in the scientific literature that would allow us to uniformly determine the amount of greenery resources in different cities. This article presents a proposal for how to calculate the degree of greenness of cities based on remote sensing data. Additionally, a novel method, including 3 new spatial indicators, was proposed to help in planning the development of areas covered with vegetation, taking into account the spatial distribution of the local population. Results were calculated for the city of Lodz (Poland) using a comprehensive method, which employs original formulas based on satellite and LiDAR data to present the actual natural situation in a specific city. In consequence, the results showed a similar area of green areas as the official repositories, but these areas were much more dispersed than these public databases would suggest.

Keywords: greenery; remote sensing; spatial management; vegetation index



Citation: Bielecki, A.; Będkowski, K. The Use of Socio-Environmental Indicators to Assess the Needs Relating to the Development of Urban Greenery. *Sustainability* **2024**, *16*, 9230. <https://doi.org/10.3390/su16219230>

Academic Editor: Boris A. Portnov

Received: 10 September 2024

Revised: 14 October 2024

Accepted: 20 October 2024

Published: 24 October 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Vegetation is a very important element of urban space that performs many key functions, such as protecting against air pollution, maintaining air humidity, mitigating extreme temperatures, and reducing noise levels, while also creating a positive esthetic impression [1–3]. Research shows that having green areas nearby increases the level of satisfaction with living in a given area [4]. Currently, over half of Poland’s population lives in cities, with forecasts indicating a further increase in the share of the urban population. Therefore, the issue of the presence and functioning of vegetation in urbanized areas is extremely important. Its size and diversity directly shape the esthetics of cities [5].

Despite the above-mentioned aspects, a trend of reducing areas with high-quality greenery in urbanized areas is currently being observed [6,7]. It turns out, however, that despite the inflated prices of space in cities, some local governments are more aware of the need to provide appropriate open space for public use [8]. These areas should be covered with vegetation and an appropriate greenery protection system should be implemented.

The topic of urban green spaces is becoming more and more important every year, which is reflected in the constantly growing number of studies and scientific articles on this topic (Figure 1) [9].

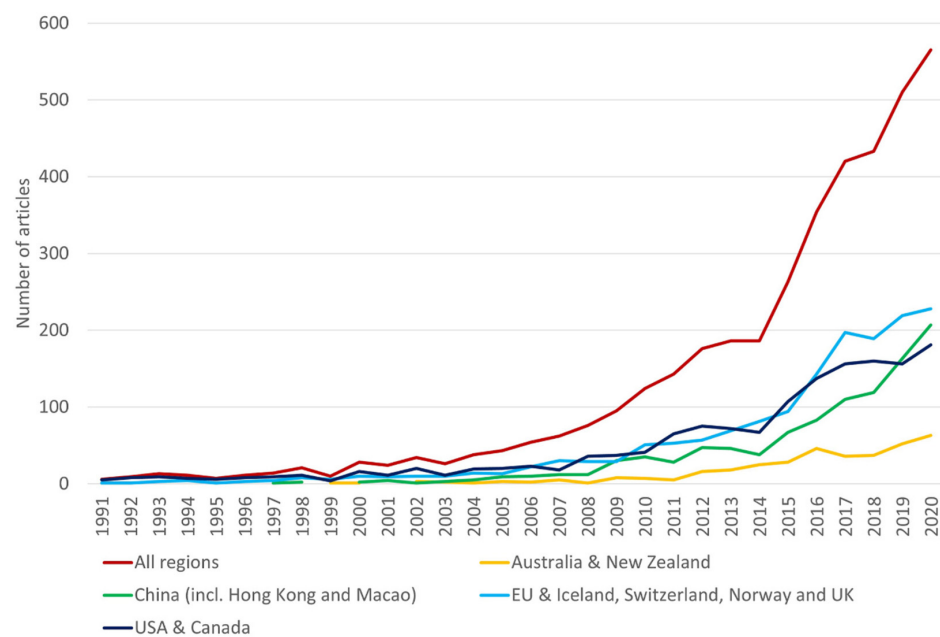


Figure 1. The annual growth of articles dealing with UGS research by region.

Currently, it is difficult to pursue standardization in assessing the degree of greenness of cities within one country, let alone compare cities in different countries. However, a relatively new concept regarding urban greenery can be found in the literature. This which is the 3–30–300 rule, which specifies the minimum number of trees that should grow in residential areas. According to the author of the concept, there should be at least 3 trees for each residential building, an estate should be covered with at least 30% of tree crowns, and the distance from the nearest park or other green area to the place of residence should not exceed 300 m [10]. This concept, however, does not define what a green area is and what it is not. Moreover, there are several equivalent databases in Poland, differing both in terms of their classification of greenery itself and the estimation of its surface area [11].

An excellent example of a diverse approach to defining green areas is the summary developed by Taylor and Hochuli [12], which shows different ways of defining green areas (Table 1).

Table 1. Six types of definition identified from the literature were used to describe ‘greenspace’.

Definition Type	Description	Example
Acknowledged range	A definition that acknowledges the range of what can be considered ‘greenspace’	“greenness describes the level of vegetation, ranging from sparsely landscaped streets to tree-lined walk-ways to play field sand forested parks”
Definition by examples	Examples are provided to illustrate what is meant by green space	“combined areas of open land, cropland, urban open land, pasture, forest, and woody perennial”
Ecosystem services	Examples that embody ecosystem services, such as urban agriculture, and/or a reference to serving human needs	“a type of land use which has significant contributions to urban environments in terms of ecology, aesthetics or public health, and primarily serving human needs and uses”
Green areas	A reference to ‘green’ and/or ‘natural’ areas without further explanation	“the area investigated included substantial green elements”
Land uses	Generic land uses described as green space	“recreational or undeveloped land”
Vegetated areas	Areas that feature vegetation	“green in the sense of being predominantly covered with vegetation”

Establishing a method for measuring the size of greenery is also problematic. According to the official repositories, urban green areas, usually presented in two-dimensional rather than three-dimensional units, only include green spaces that serve public functions, such as parks, lawns, and promenades [13]. However, it appears that this method of presenting the level of greenery in urban areas does not show the real situation since there are many areas with vegetation that are not included even though they perform very important functions [14]. Greenery located in developed plots, industrial and post-industrial spaces [15], and along roads and watercourses can be taken as an example. Additionally, the official reports use various aspects of greenery during classification (e.g., function, majority land cover).

The specific areas included in the official statistics are only measured by taking into consideration their planar surface. The important fact is that not only should the surface area covered by vegetation be taken into account, but so should the entire volume of such areas [16]. The density and condition of vegetation in a given area should also be taken into account [17]. These data can be obtained from remote sensing sources operating at low, medium, and high altitudes. In addition, there are IT systems (Geographic Information Systems, known as GIS) that enable the management and use of spatial data for multiple studies and analyses [18]. Another aspect of this is the fact that the size of green spaces in cities is not the only thing that matters. Their location and the ratio of their size to the number of city inhabitants also play big roles.

Lodz (51°36′25.79″ N, 19°25′15.59″ E) has both one of the largest percentages of areas covered with vegetation in terms of the total area of the city and one of the largest areas covered per inhabitant in Poland [19,20]. The green area per 1 person amounts to almost 50 m². This is an impressive figure, but it does not take into account the actual possibility of staying in areas covered with vegetation and is limited to characterizing them using only one indicator, namely the surface area they occupy. For a city resident, an area of land occupied by tall, well-developed trees that provide shade and significantly influence the esthetics of the neighborhood means more than the same area consisting of low grass, meadows, or shrubs.

In cities, we most often deal with the uneven spatial distribution of inhabitants and greenery—the population tends to be concentrated in city centers, while greenery is more often found on the outskirts. A significant number of residents have dense buildings in their immediate surroundings, and often live without even the smallest patch of greenery. On the other hand, on the outskirts of cities, there are often urban forests, which count towards the overall balance of green areas, but at the same time few people live there. As a result, access to greenery is very uneven [21]. The important fact is that local citizens are much more likely to go to developing city regions which might be located near their place of residence [22]. The proportion of the population that has access to certain green resources in their place of residence can say a lot about the conditions and quality of life in individual cities [23].

One example of an attempt to create an indicator referring to the amount of green space in the vicinity of the place of residence of a local community is the Urban Neighborhood Green Index (UNGI) [24]. The developers of this indicator show uneven access to green spaces and they take into account publicly accessible areas equipped with anthropological objects such as parking lots, city furniture, playing fields, and water facilities. However, it does not take into account areas covered with vegetation to a no less significant degree than those officially recognized as green spaces, but which lack appropriate infrastructure.

A technical approach to the subject of urban green areas was presented by Jia et al. [25], who used mathematical formulas to present green spaces in relation to four aspects: its accessibility, divided into connectivity and walking distance, and its usability, divided into space enclosure and space availability. As a result, the division of urban green spaces was performed according to the different values of individual aspects.

Many spectral indices are used to analyze vegetation, among which the NDVI is the most popular [26–28]. It is used to analyze both aerial photos and satellite images in order

to assess the size of plant biomass at various spatial scales, from single arable fields to global vegetation zones [29]; to recognize vegetation [30] and its condition [31]; to analyze the size of the projection area of leaves, or LAI—leaf area index [32]; to determine the amount of radiation absorbed by plants during photosynthesis [33]; to assess biomass [34]; and to establish many other factors.

An important feature of NDVI is its relationship with the “quantity” and “quality” of greenery present in a given area [35,36]. If the image pixel includes various objects (e.g., buildings, roadways with asphalt or concrete surfaces, tree crowns, or gardens and lawns), then the NDVI is the result of the NDVI coefficients of individual objects, weighted by their share in the pixel area [37].

In many studies, the topic of the urban greenery inventory, based on data from airborne laser scanning (ALS), has also been discussed [38,39]. Airborne laser scanning is a photogrammetric measurement method based on laser scanning, allowing us to record a given surface in the form of a point cloud representing the terrain. This measurement results in a very accurate surface model. The idea of airborne laser scanning is based on measuring the distance between the measuring equipment located onboard an aircraft or helicopter and the terrain points [40]. ALS has many advantages, such as independence from weather conditions (the cloud base is higher than flight altitude, with only heavy rain and fog having a negative impact) and lighting conditions (scanning at night), penetration through vegetation layers, a high density of spatial points, high accuracy when determining the Z coordinate, a short time to obtain the final product, and a relatively low cost when used for large areas [41].

In our review of the scientific literature, we focus on projects carried out mainly in Poland, as they relate to our natural conditions. An example of conducting an inventory of greenery was the research performed in Wrocław, where authors collected and processed, among others, aerial digital photos (10 cm resolution) and aerial laser scanning data (with a density of 15 points m^{-2}) [42]. They used these data to prepare a Digital Terrain Model (DTM), a Digital Surface Model (DSM), a normalized Digital Surface Model (nDSM), and a so-called true orthophotomap. The final classification was obtained by applying a threshold of the minimum value of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) ≥ 0.1 , calculated from the pixels of the infrared orthophotomap (CIR—color infrared), and then integrating the resulting areas with the spatially corresponding elevation data. Based on the results obtained, the authors were able to classify urban greenery into three height classes, which provide better interpretative values than studies limited to the analysis of surface area.

A similar approach to the classification of two different types of urban objects—buildings and vegetation—was adopted by Grigillo and Kanjir [43]. They used digital aerial photography and laser scanning data to produce a DSM, and employed multispectral photogrammetric images to obtain a DTM. The second step was the automatic extraction of vegetation using object-oriented analysis, which they performed on orthoimages with three spectral channels—infrared, red, and green—with an added fourth channel known as the nDSM layer. Carefully selected segmentation parameters made it possible to isolate objects that were classified as “visible vegetation” or “shaded” areas using the NDVI. Then, the segmentation procedure was repeated separately for the shaded zones to isolate the vegetation hidden in them. The combined urban vegetation elements were further divided into high and low vegetation (above and below 1 m) based on the height attribute read from the nDSM.

Myeong et al. [44] also used high-resolution digital infrared images to divide urban space into trees and shrubs, lawns, bare soil, water, and impervious surfaces. Here, too, the challenges for the authors were the shaded areas, but also the large spectral similarities between the distinguished classes. Only repeated attempts at selecting and applying textures, masks, and majority filters allowed the accuracy of their classification to be increased.

Krukowski et al. [45] used high-resolution IKONOS 2 satellite images with a level of detail allowing for the precise allocation of individual pixels to land cover classes. They

decided to distinguish two classes of urban greenery: high and low. The first step was to adopt an $\text{NDVI} > 0.2$ threshold to separate vegetation. Then, training fields for the two previously mentioned classes were determined and the supervised classification of areas covered with vegetation was performed. Taking into account the higher values of the indicator for tall vegetation observed after the field verification of the resulting fields, the authors used an additional discriminatory threshold of $\text{NDVI} = 0.35$. The two classes of vegetation obtained in this way—high and low—were the final result of the categorization.

The lower threshold of NDVI value = 0.3, classifying a given area as being covered with vegetation, was determined by researchers based on data from the city of Saint Petersburg, Russia, in the years 2002–2018 [46]. In their analysis, they showed a constantly decreasing green area due to the increase in the built-up area. The main goal of the analysis was to use the data produced in the spatial planning process in the city.

The original concept of using NDVI to assess the availability of vegetation in cities was presented by Będkowski and Bielecki [21]. They used this indicator as a measure of the size of vegetation resources and determined, using the Lorenz concentration curve, their accessibility to the inhabitants of Lodz. They stated that, due to the uneven distribution of the population and vegetation, access is very difficult, which is reflected in the fact that almost 80% of residents have only about 25% of urban vegetation resources near their places of residence.

The authors of works on forest areas [47,48] unanimously point out that while monitoring vegetation in terms of surface cover or their biophysical condition is undertaken in many different ways, remote research on processes and characteristics of forest stands is still a challenge. However, geomatic techniques are increasingly replacing traditionally used terrestrial methods.

Mu et al. [49] focused on the dimidiate pixel model (DPM), which is a crucial tool for estimating fractional vegetation cover (FVC) via remote sensing. Traditional DPMs, which include vegetation and soil, do not fully consider the influence of shaded vegetation and shaded soil. The authors aimed to address this by processing shaded components separately. The improved DPMs outperformed traditional models, with the FVC value estimated using the improved models ranging from 0.04 to 0.13. The decrease in uncertainty by using the improved DPMs was over 50% compared to that seen using traditional models. The proposed DPM was more accurate and was expected to improve FVC estimation from satellite data.

An approach that was independent of function or cadastral division was demonstrated by Pouya and Majid [50]. They distinguished the share of UGS per capita for each district in the Battalgazi district in Turkey. They designated green areas based on satellite data, which were used to determine as many as 5 different plant indices— NDVI , EVI , PSSR , GNDVI , and NDWI —and then performed unsupervised land classification. As a result of this process, an indicator of the share of actual areas covered with vegetation per capita was obtained for each district.

The popular NDVI is used to develop other indices which, according to their authors, are intended to better characterize the features of urban greenery. The Greenness Index (GI), or simply the Green Index, has been defined many times in the literature. Shekhar and Kumar [51] calculated it based on the NDVI value, where a positive value was taken to indicate a green class and a negative value was taken to indicate a non-green class. Then, a grid layer ($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) was overlaid onto a binary image of NDVI and the percentage of the area where $\text{NDVI} > 0$ was calculated. Yang et al. [52] calculated a Green Index for a whole city based on the manual classification of low-altitude images. Abudaleb et al. [28] calculated the Greenness Index as the percentage of each study region's area divided by the area of the green classes. Area coverage for every land cover class was determined subsequent to Random Forest image classification, which is based on a machine learning algorithm.

One way to assess the size of greenery resources in a given location is to obtain information about the amount of biomass in a given location. To conduct this, Costa Ribeiro

et al. [53] used high-resolution satellite data to examine the potential for CO₂ absorption in the ecological parks of the campus of the Brazilian University in Planatina. However, these activities only make sense in a limited area due to more demanding data and necessary sampling, on the basis of which the data obtained can only be interpreted.

A completely different method of estimating urban greenery was used by Lu et al. [54], who conducted a review of the possibilities of using Street View (SV) images for this purpose. After an in-depth analysis of the available literature, the authors distinguished 3 basic methods of estimating urban greenery: manual analysis, unsupervised classification, and supervised deep learning. While the first two are very time-consuming, the third requires high computer processing power and a very large number of images.

In addition, the very idea of estimating urban greenery using SV images is only a generalization of the actual state of affairs and, as the authors themselves explain, cannot replace traditional remote sensing methods, including the use of the NDVI.

In the scientific literature, there are also works that, in addition to assessing the current state of affairs, also try to analyze trends from recent years and, on this basis, predict changes that may occur in the near future. An example of this is the research carried out in Saint Petersburg, Russia, using Markov chains, thanks to which the authors forecasted further changes in the city's coverage, including greenery, until 2028 [55].

The aim of this work is therefore to develop measures that enable a clear presentation, both qualitatively and quantitatively, of the amount of greenery in a large city (over 100 km²) and, consequently, to demonstrate its spatial diversity and prioritize places for potential investments in greenery, taking into account the uneven distribution of the population. Measurement methods should be reflected in the form of indicators that can be used in different locations. Due to the fact that this issue, according to the authors' best knowledge, has not been previously described in such a broad scope in the scientific literature, the authors decided that it was necessary to consider this topic and develop an appropriate methodology.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

Lodz is a city located in central Poland covering an area of 293 km², which makes it the fourth largest city in Poland. The city has a population of 658,000 inhabitants, which also ranks 4th in Poland regarding the number of inhabitants [19].

Despite 600 years of city rights, it has had a typical urban character for only 200 years. For the first 400 years, Lodz was an agricultural town, and only developed after 1820 as a large industrial center [56]. The current urban layout of the city center is a consequence of the economic changes in the first half of the 19th century. The basis for the construction of the New Town was an octagonal market square with perpendicular urban axes [57]. Many factories were located around the center, along with residential buildings for their employees. Despite the dense and unfriendly development, many parks were built based on the presence of watercourses, which were a source of energy to power machines in the factories [58].

Currently, Lodz is a city with a developed network of green infrastructure and continues to create new places for rest and recreation, including 8 new parks in the 21st century alone [59]. The issue is that a lot of green areas are located away from the housing estates.

2.2. Research Time Frame

All data necessary for this study were collected in 2011–2020. LiDAR point cloud data were the first type of data obtained in this study. These were generated as part of the IT system project for the Country's Protection Against Extreme Hazards (Informatyczny System Oslony Kraju, ISOK) in 2011. These were the latest publicly available laser scanning data when work on the described method began in 2018. Satellite images of Lodz were taken from 2015. The reason for selecting these images was the fact they showed the last available cloudless scenes for the entire area of Lodz in the middle of the growing season

when the research began. In 2018, the latest vector data were obtained from the BDOT, EGİB, and ŁOG spatial databases. Demographic data also came from 2018. The last field inventory was performed in August 2020. As a result, the results obtained in this work present the actual state of urban greenery in 2018.

2.3. Data Sources

This work used a number of spatial data sources whose purpose was to provide information on land cover along with numerical demographic data.

The basic sources presenting data related to the presence of vegetation in a given area were multispectral satellite images. The research used a Landsat 8 satellite scene from July 3, 2015 (track p189, line r024), downloaded from the US Geological Survey (EarthExplorer).

The next component involved airborne laser scanning data from the state ISOK project. These data were obtained from the Main Center for Geodetic and Cartographic Documentation (Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej, CODGiK). The airborne laser scanning (ALS) point cloud had a density of 12 points m^{-2} . The materials for the study area were up to date in 2011. LiDAR data provided information on the volume of vegetation in the given area, including Vegetation Height Model (VHM) calculations.

The main repositories providing geographical data on the topography of Poland are the Land and Property Register (Ewidencja Gruntów i Budynków, EGİB) (Figure 2), the Topographic Objects Database (Baza Danych Obiektów Topograficznych, BDOT10k), the General Geographic Objects Database (Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych, BDOO), and thematic maps produced by local geodesy centers (e.g., Green Space Map by Lodz Geodesy Center (Łódzki Ośrodek Geodezji, ŁOG). The databases are public resources that describe land use types in terms of their functionality. In order to properly refer to the currently applicable standards related to the determination of the degree of greenness of individual cities, these official spatial databases were taken into consideration and carefully analyzed. The process included the verification of the definition of the main areas, which were classified as greenery, and the checking of their borders.

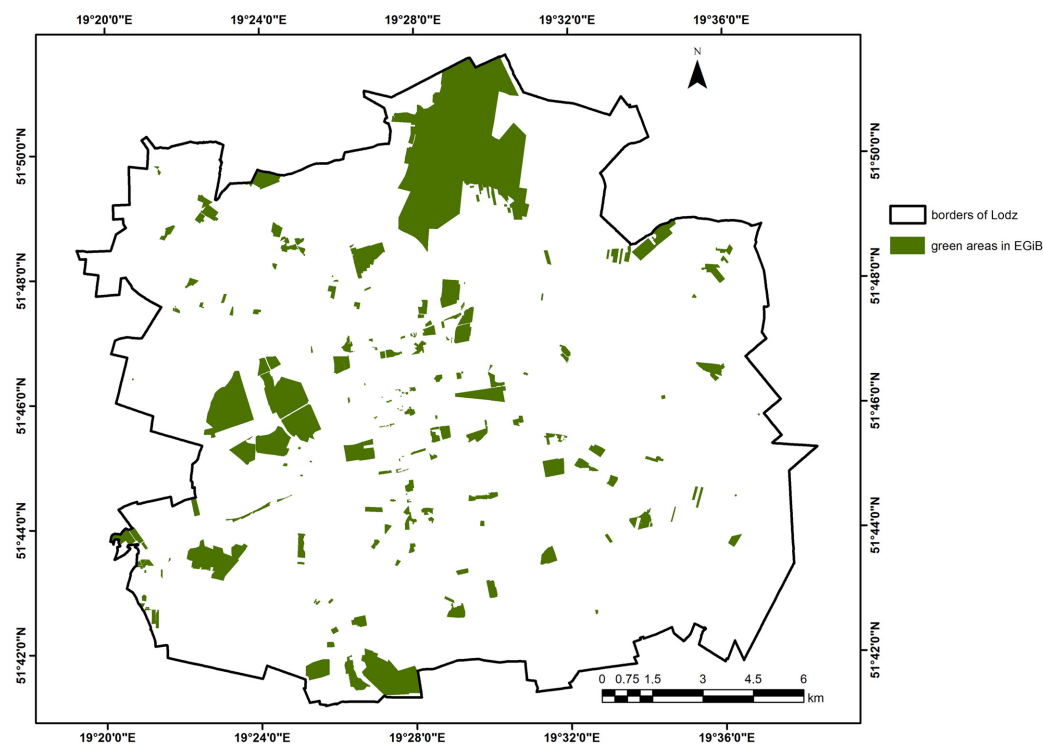


Figure 2. The arrangement of green areas in Lodz according to EGİB.

Unfortunately, these databases are inconsistent. To address these imperfections of current greenery inventory systems, our proposal (detailed below) describes a different way of assessing the size of greenery resources, regardless of their origin and assigned functions. Data from specific sources use different classification systems and are spatially inconsistent (e.g., EGiB-based recreation areas, BDOT10k-based forest or shrub areas, and parks in the Urban Green Map ŁOG cover the same topographical part but have different terminology for the individual boundaries—Figure 3). For example, a part of a park in the ŁOG database is not classified as a recreational area in EGiB.



Figure 3. A comparison of the boundaries of green areas according to different databases.

Data were created by the Lodz Geodesy Centre (ŁOG) as part of the center's mission, which involves producing cartographic studies showing green areas within the administrative boundaries of the city of Lodz. Those geodetic data form the basis of the statistics on the size of green spaces reported in state statistics, i.e., in the yearbooks of the Central Statistical Office and in the local database (Figure 4).

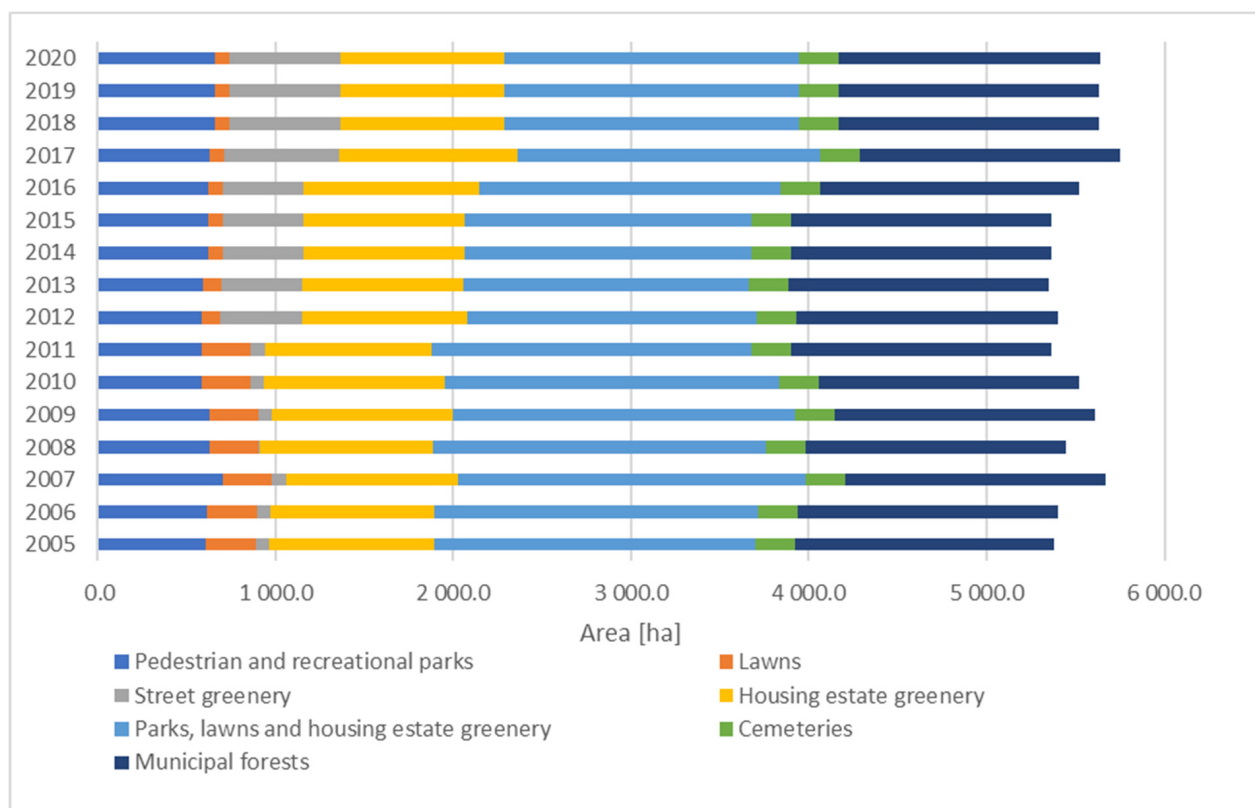


Figure 4. Greenery in Lodz in 2005–2019.

The Land and Property Register (EGiB) database primarily contains information about properties assessed using field or photogrammetric surveys [60]. It is used to perform tasks in the areas of economic planning, spatial planning, tax and benefit determination, the identification of assets in land and mortgage registers, official statistics, and asset management. EGiB data are used, inter alia, by tax authorities and local authorities (municipalities) for the purpose of creating spatial inventories of target areas [61].

The land and property register includes information on the location, boundaries, areas, and types of land use (Table 2).

Table 2. Types of land use according to EGiB, with corresponding acronyms, and their share in the entire area of the city of Lodz in 2021.

Type of Use According to EGiB	Acronym	Surface Area [km ²]	% of the City
Residential areas	B	46.17	16.00
Industrial areas	Ba	13.02	4.51
Other built-up areas	Bi	24.36	8.44
Urbanized undeveloped areas or under development	Bp	10.24	3.55
Built-up agricultural land	Br	6.34	2.20
Recreational areas	Bz	10.95	3.79
Roads	dr	30.84	10.69
Ecological use	E, E-W	0.91	0.31
Mining land use	K	1.07	0.37
Forests	Ls	24.69	8.55
Wooded and bushed land	Lz	3.77	1.31
Wooded and bushed land on agricultural land	Lzr	0.11	0.04
Wasteland	N	1.23	0.43
Pastures	PS	6.66	2.31

Table 2. Cont.

Type of Use According to EGiB	Acronym	Surface Area [km ²]	% of the City
Arable land	R	92.60	32.08
Orchards	S	2.57	0.89
Other communication areas	Ti	2.78	0.96
Railway areas	Tk	7.11	2.46
Land reserved for the construction of public roads or railway lines	Tp	1.08	0.37
Miscellaneous land	Tr	0.34	0.12
Land under ditches	W	0.27	0.09
Land under surface water flowing	Wp	1.21	0.42
Land under surface water still	Ws	0.14	0.05
Land under ponds	Wsr	0.19	0.06

Demographic data were obtained from the voter database and assigned to locations based on the distribution of residential buildings in individual housing estates. We deliberately did not use the Universal Electronic System for Registration of the Population (Powszechny Elektroniczny System Ewidencji Ludności, PESEL) and geolocation was performed based on address points. The reasons for such actions were the inconsistency of data in the PESEL register and carelessness when entering data manually (e.g., many errors, entering full street names, using the initials of the name or entering data without a name, using Polish characters or not, as shown in Figure 5). After several attempts to combine demographic data and address points, it was possible to connect only 70% of the entries from the PESEL register. Due to the time-consuming nature of this activity, which would contradict the purpose of developing the method, the PESEL database was abandoned in favor of estimating the population distribution based on voter registries in individual city estates.

ADR
Czcibora 14, 9Cd8
Czcibora 12, psda
Pszczelna, uds
Pszczelna, uds
Pszczelna, uds
Pszczelna 45, skd-
Jerzego Szaniawskiego 27, 93d8
Zpotno, skd
Zkotno,
Zkotno,
Zkotno,
Zkotno,
Zkotno,
Chocianowicka 189,
Chocianowicka, kide
Witolda Gombrowicza 24, E6d6
Kolumny 615B, wsda
mckowa 27A, zmdn
Ks. Jana Diugosza 4, FFd3
Witolda Gombrowicza 8, 72d5
Witolda Gombrowicza 10, 08d4
Miechowska, awd
Miechowska 13, skd

Figure 5. An example of data negligence in the PESEL register (e.g., missing letters, different replacement for polish letters).

The field inventory was intended to provide data that could not be obtained using remote sensing. The purpose of the inventory was to calculate the actual height (thickness) of the greenery involved in the photosynthesis process. The research included trees that were located directly at street junctions. In this case, the height of the bottom of the tree crowns was measured. The location of these trees was deliberately selected so that the height of the bottom of the crown was, on average, as high as possible (e.g., we pruned tree crowns at intersections to improve visibility and safety [62]). This procedure was employed to guarantee that the final results obtained with this method would be no worse than the real ones (assuming that tree crowns are pruned everywhere) and at the same time to provide a common basis for comparative calculations between cities or different parts of one city.

3. Indices

To determine the amount of greenery resources available in the place of residence, we developed three indicators: the Greenness Index (GI), Greenery Deficiency Index (GDI) and Greenery Participation Index (GPI). Below, we present the basic assumptions relating to the construction of these indicators. The starting point for their determination is the Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, which is commonly used in remote sensing [24,63]:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (1)$$

NIR—near-infrared band;

RED—red band.

The NDVI value for individual land cover forms depends on their spectral properties, i.e., their ability to reflect, absorb, and transmit incoming electromagnetic radiation [64]. In the case of vegetation, a simple model of the relationship between radiation and the vegetation layer is presented in Figure 6 below: the incoming light flux Φ is initially divided into three fluxes, Φ_{Ri} , Φ_{Ai} , and Φ_{Ti} , ($i = 1$). The mutual relations of these streams depend on the properties of the green layer. It should be noted that their normalized values, $\varphi_{ri} = \Phi_{Ri} / (\Phi_{Ri} + \Phi_{Ai} + \Phi_{Ti})$, $\varphi_{ai} = \Phi_{Ai} / (\Phi_{Ri} + \Phi_{Ai} + \Phi_{Ti})$, and $\varphi_{ti} = \Phi_{Ti} / (\Phi_{Ri} + \Phi_{Ai} + \Phi_{Ti})$, satisfy the condition $\varphi_{ri} + \varphi_{ai} + \varphi_{ti} = 1$.

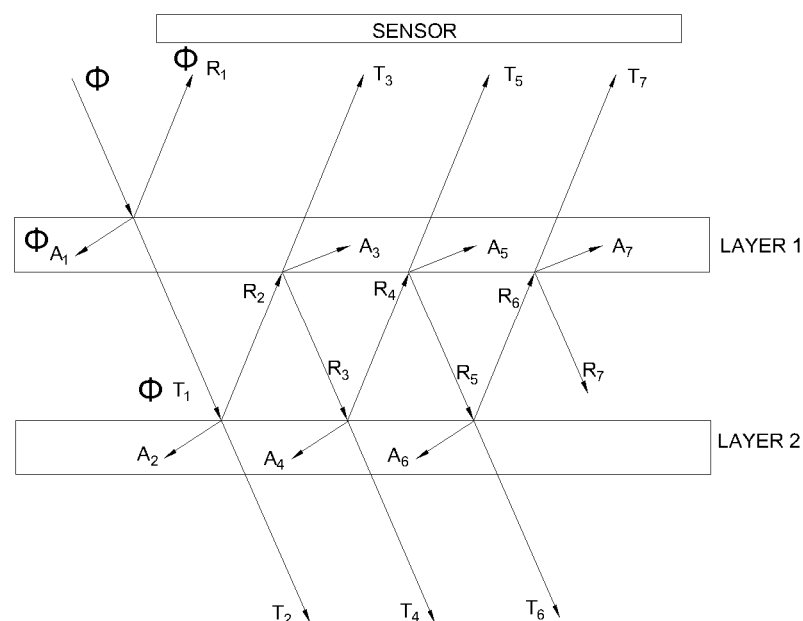


Figure 6. Reflection, transmission, and absorption of radiation by the vegetation layer. For better drawing readability, the symbols of light fluxes were changed, i.e., $\Phi_{Ri} = R_i$, $\Phi_{Ai} = A_i$, and $\Phi_{Ti} = T_i$. Refraction angles are not taken into account.

Any increase in the thickness of the vegetation layer may be considered as the addition of subsequent layers (layer 2 in Figure 5). This is known because basic research has shown that vegetation has a multi-layered structure, which is expressed by the well-known LAI index used in remote sensing [65]:

$$LAI = \frac{FA}{TA} \quad (2)$$

FA—total foliage area;

TA—the projection area of the tree crown on the horizontal plane (terrain).

The LAI index reaches a value of up to 19, with a typical average range of 6 to 8 for forests and from 2 to 4 for cereal crops [32].

Increasing the thickness of the plant layer, i.e., the number of layers, will cause the course of radiation fluxes to change: the transmitted flux Φ_{T1} is now the flux incident on the second layer of vegetation and can be divided into the fluxes of radiation that is reflected (Φ_{R2}), absorbed (Φ_{A2}), or penetrates further (Φ_{T2}). Let us also note that the radiation reflected from the lower layer (Φ_{R2} flux) now encounters the upper layer, where it is again divided into reflected (Φ_{R3}), absorbed (Φ_{A3}), and transmitted (Φ_{T3}) radiation streams. This process takes place many times between both layers, as a result of which a sensor placed above the vegetation can register the resulting sum of radiation from several streams: $\Phi_{R1} + \Phi_{T3} + \Phi_{T5} + \Phi_{T7} + \dots$

If we assume that the vegetation block is composed of a larger number of layers, then the presented model becomes somewhat complicated, the streams considered here become fractional parts of other streams, and a significant part of the radiation remains ‘trapped’ in the vegetation layer. For example, assuming constant values $\varphi_r = 0.5$, $\varphi_a = 0.25$, and $\varphi_t = 0.25$, according to our simple model, we obtain the following values of fluxes using the sensor for the model presented in Figure 6:

$$\Phi_{R1} = 0.5\Phi$$

$$\Phi_{T3} = (0.25 \times 0.5 \times 0.25) \Phi = 0.0313 \Phi$$

$$\Phi_{T5} = (0.25 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.25) \Phi = 0.0078 \Phi$$

$$\Phi_{T7} = (0.25 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.25) \Phi = 0.0020 \Phi$$

Therefore, the reflected radiation Φ_{R1} reaches the sensor, while the remaining fluxes constitute a small part of the received radiation. It is easy to see that the total radiation flux $\Phi_{R1} + \Phi_{T3} + \Phi_{T5} + \Phi_{T7} + \dots$ reaching the sensor is not directly proportional to the number of layers. Moreover, the proportions of reflected, absorbed, and transmitted radiation vary depending on the wavelength of light.

It may also be interesting to note that in the case of herbaceous plants their surface areas may be twice or at most three times higher than the surface areas of the soil they occupy. For shrubs, the LAI coefficient is already 5 to 7; for trees, it can reach a value of 10 and more [66].

The presented model may provide a partial explanation of the phenomenon of saturation of the NDVI, which means that the NDVI calculated on the basis of satellite images increases slightly or even does not increase at all when an appropriate green layer thickness is achieved [67–69].

3.1. Greenness Index

The purpose of our proposed Greenness Index is to express the amount of greenery resources in the basic fields analyzed. When constructing it, we gave special importance to the NDVI saturation point (NDVIsat). We assumed that up to this point, the indicator of the amount of greenery is the NDVI value itself, and that the measure of the amount of greenery is the thickness of the vegetation layer.

The mathematical notation of the Greenness Index is as follows:

$$GI_i = \frac{NDVI_i}{2NDVIsat}, \text{ for } h_i < h_{sat} \quad (3)$$

$$GI_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(h_i - h_b) - (h_{sat} - h_b)}{(h_{max} - h_b) - (h_{sat} - h_b)} \right), \text{ for } h_i \geq h_{sat} \quad (4)$$

h_i —height of vegetation in the i -th basic field;

h_b —average height of the crown base;

h_{sat} —value for the saturation point;

h_{max} —height of the highest greenery (trees) in the given area (in the city);

$NDVI_i$ —NDVI value in the i -th basic field;

$NDVI_{sat}$ —NDVI value for the saturation point.

Due to the fact that the h_b values in the above formula decrease, Formula (4) may be simplified to the following form:

$$GI_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h_i - h_{sat}}{h_{max} - h_{sat}} \right), \text{ for } h_i \geq h_{sat} \quad (5)$$

Thanks to this structure, the Greenness Index can reach a value of $0 \leq GI \leq 1$, with $GI = 0.5$ at the saturation point. The importance of individual components of Equation (4) depends on the height of the greenery. For areas with low greenery height values, the value of the NDVI is crucial, but as the green height increases, the average green height in terms of the Vegetation Height Model [70] becomes more and more important, while NDVI becomes less important (in accordance with the description of the problem of saturating the NDVI value).

As a result of limiting the flow of light energy to the zones under the tree crowns, resulting from the screening properties of the layer of the assimilation apparatus contained mainly in the crown layer, a zone without active greenery is formed under the trees (Figure 7). This does not participate in the regulation of light fluxes (apart from their reflection) from a few branches and trunks and thus does not significantly affect the NDVI value. It turns out that the height of vegetation above the NDVI saturation point does not indicate the actual height of assimilating greenery, and so only the length of the tree crown should be taken into account.

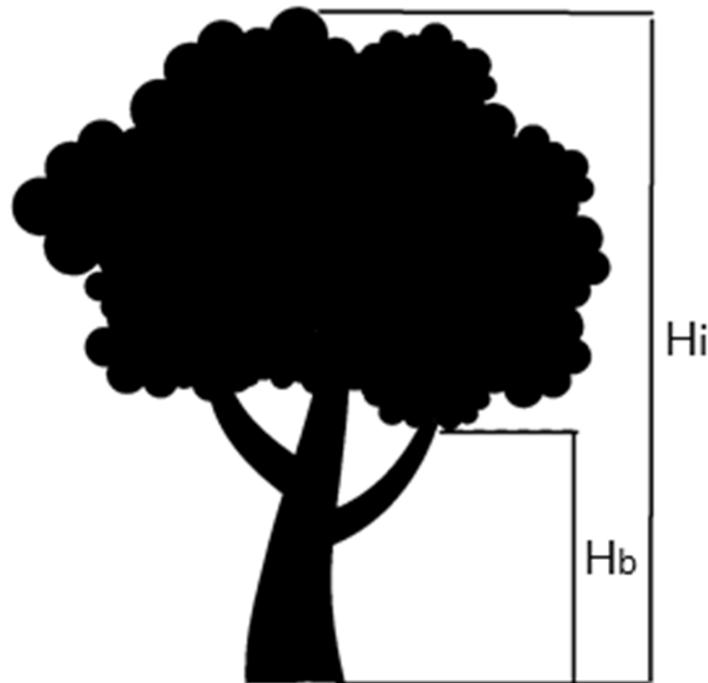


Figure 7. Measures describing the components of the GI formula.

The phenomenon of tree branches dying due to a lack of adequate light is well known to occur in tree communities forming stands in forest areas [71]. Unfortunately, we did not have the appropriate dimensions for urban conditions, and so we proposed a certain simplification, assuming that the height of the crown base is the height to which urban trees are de-branched in order to ensure visibility and passage for pedestrian and mechanized traffic. Thus, the value of the green height h_i determined from the VHM should be reduced by the average height of the crown base h_b .

We determined the value of h_b on the basis of the measurement of 237 trees located in the area of 69 street intersections. These intersections were selected from all 1418 road intersections of main, local, and collector roads in Lodz. Overall, 336 of them had exactly 4 outlets. In the next step, 20% of the places where the field inventory was carried out were randomly selected. On streets leading to intersections, at least one tree closest to the intersection was selected. It should also be noted that the value of 0 was used for negative NDVI values. In such cases, we did not take this value into consideration since it would be reduced when calculated in the formula. In our study, the value of h_b was set to 2.9 m and the average value of H_i (the height of a tree) was set to 11.7 m.

3.2. Greenery Deficiency Index

The Greenness Index GI can be easily transformed into a value we call the Greenery Deficiency Index or GDI (5). Its purpose is to express the size of the greenery deficiency in the analyzed i -th basic field, and thus signal the need to supplement it:

$$GDI_i = 1 - GI_i \quad (6)$$

GI_i —the value of the Greenness Index in a i -th field.

In the form proposed in (6), the GDI indicator meets the condition $1 \geq GDI_i \geq 0$, with a value of 1 in areas without greenery and 0 where there is fully developed vegetation. The GDI_i index therefore expresses the postulate (expectation) that, in a given i -th area, the 'amount' of greenery corresponds to the location of the h_{max} point (Figure 8), which may be considered optimal so that, at least theoretically, it may also be associated with $NDVI_{max}$, i.e., the highest values of vegetation height and NDVI in the study area. In this approach, $GDI_i = 0$ would correspond to the areas of urban parks or forests, but it is difficult to expect these areas to be inhabited, as dense buildings exclude the existence of richly developed vegetation. Therefore, for inhabited areas, a different limiting, empirically determined optimal value of the GI_{opt} index may be adopted. To determine it, NDVI measurements should be performed in areas where the process of shaping the buildings and the accompanying greenery has been completed, and so it can be assumed that the observed condition is an expression of a certain permanent balance and, additionally, can be accepted by the local community. Bielecki and Będkowski [72] showed that certain characteristic areas of the city of Lodz have specific, non-normal distributions of NDVI values and suggest that the most typical values for them should not be average values, but modal ones, as these are the most frequently occurring values. Assuming GI_{opt} in a model generated by incorporating the modal value of NDVI in inhabited areas instead of $NDVI_{sat}$, the quotient GI_i/GI_{opt} should be introduced into Equation (6) instead of GI_i , so that it takes the following form:

$$GDI_i = 1 - \frac{GI_i}{GI_{opt}} \quad (7)$$

where $1 \geq GDI_i \geq 0$.

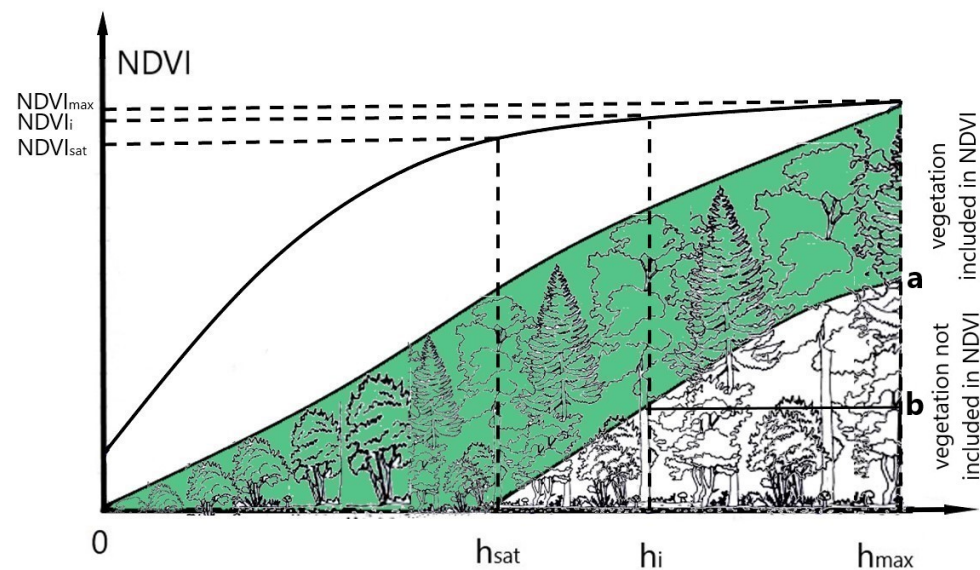


Figure 8. Interrelationships of the NDVI and the height of vegetation: after exceeding the saturation point (h_{sat} , $NDVI_{sat}$), the NDVI indicator does not increase in proportion to the increase in the height of the vegetation layer; line *a* indicates the limit of dying of the tree branches due to the lack of light energy; line *b* indicates the height to which the trees are stripped of their branches in urban settings to ensure visibility and communication.

The GDI is directly proportional to the size of the greenery deficit in a given area, but the nature of this relationship, due to the assumptions made (Formula (5)), is not linear. However, GDI has an ordering nature, i.e., it ranks the regions (basic fields) according to the increasing size of the greenery deficit.

3.3. Greenery Participation Index

For the determination of the distribution of places with a shortage of greenery, assessed using the GDI, to be complete, i.e., to correspond to real needs, it is also necessary to take into account parameters characterizing the population distribution. We proposed the establishment of a Greenery Participation Index (GPI) for this purpose. The division of green areas in cities should be determined on the basis of population size, population density, and the usability of urban districts [73].

To calculate GPI (9), two auxiliary indices were used—the Greenery Deficiency Index GDI (6) and (7) and the Local Population Index LPI (8):

$$LPI_i = \frac{P_i}{P_{max}} \quad (8)$$

P_i is the number of inhabitants in a given field.

P_{max} is the highest value of the number of inhabitants in one basic field.

In this approach, LPI_i becomes a weight, i.e., an indicator determining the rank of the i -th basic field, because we assume that the urgency of expanding greenery is also directly proportional to the number of inhabitants. It is worth noting that, as in the case of calculating the GDI (6) and (7) another value can be used instead of P_{max} as the optimal reference level for population density (P_{opt}). However, additional studies are necessary to determine this. It is possible that this number would be set at different levels depending on the nature of the current development, but it would always express the best (optimal) condition in a given area, i.e., one corresponding to the desired (or socially accepted) population density.

Ultimately, the GPI should therefore be calculated as follows:

$$GPI_i = GDI_i \times LPI_i \quad (9)$$

The calculated indicator takes into account both the vegetation already existing in a given field, its adjacent basic fields, and the number of inhabitants in a specific field. This indicator is, again, of an ordering nature, i.e., it ranks basic fields (30 m × 30 m), determining the order regarding the places which experience the lowest quality of life in terms of the participation of residents in the surrounding greenery. The lower the value, the better the situation.

The presented concept of determining indicators with which to calculate the Greenery Participation Index (GPI) must also take into account corrections resulting from the heterogeneity of urban space. In the simplest terms, these consist of three forms of coverage: vegetation, impervious, and soil + water. This is described using the VIS Model [74]. However, we believe that in the conditions of the Central European temperate climate, i.e., with relatively abundant precipitation, it is difficult to expect that areas of soil not covered with vegetation will be significant in terms of size in cities. Rather, as we observe, these are transitional states—any exposed surface becomes green very quickly, first with herbaceous vegetation, and then with shrubs and trees. This is a process of natural succession and is so intense that owners of temporarily unused plots must clean them regularly to prevent the excessive development of shrubs and woody vegetation. This is mainly dictated by legal concerns, because the removal of large trees, if they exceed certain size limits, involves significant costs in environmental fees. So, in our cities, apart from vegetation, we basically only find impervious surfaces and water, the latter of which, as they are uninhabited, are excluded from our considerations.

In urban conditions, any image pixel or base field is most often a mixture of the above-mentioned land cover forms. The NDVI determined for them is related by a linear function to the fractional cover of vegetation f and its specific NDVI, which we will now denote as $NDVI_V$, and the specific $NDVI_I$ value for impervious areas, i.e., built-up areas—roofs of buildings, sidewalks, communication areas [75–77]:

$$NDVI = f \times NDVI_V + (1 - f) \times NDVI_I \quad (10)$$

An NDVI value close to zero is appropriate for impervious land cover ($NDVI_I \approx 0$), while high positive values denote various types of vegetation cover. In the literature for our conditions, different threshold values are assumed between $NDVI_I$ and $NDVI_V$, from 0.1 to 0.3 or even 0.6, depending on the type of remote sensing data used, the image properties, and the season [78]. If, for example, $NDVI_V = 0.8$, $NDVI_I = 0.1$ and vegetation fractional cover $f = 0.5$, then the resulting value of $NDVI = 0.45$ will be recorded in a basic field. We obtain the same value for a basic field in which $NDVI_V = 0.45$ and $f = 1$. Therefore, the lack of vegetation in part of such a basic field may result in a given region being classified, based on its total NDVI, as an area with a significant greenery deficit, while in fact there may be no greenery in the built-up part, while the remaining part of the area may be covered with sufficiently well-developed vegetation.

In order to avoid false classification, the value of the NDVI calculated using Formula (1) in a given basic field should be corrected, taking into account the surface share of vegetation f and the $NDVI_I$ of the part of the area not covered with vegetation. For this purpose, we transform Formula (10) accordingly:

$$NDVI_{cor} = \frac{1}{f}(NDVI - NDVI_I) + NDVI_I \quad (11)$$

$NDVI_{cor}$ —corrected index value;

$NDVI$ —index value calculated using Formula (1);

$NDVI_I$ —index value for the impervious area;

f —surface share of the area covered with vegetation.

Because it can mostly be assumed that $NDVI_I = 0$, we obtain the following:

$$NDVI_{cor} = \frac{1}{f} NDVI + NDVI_I \quad (12)$$

In practice, determining fractional cover f may prove difficult because it requires the processing of data on land cover with infrastructural elements, such as buildings, streets, sidewalks, concrete squares, etc., coming from geometric databases, e.g., BDOT. One solution may be to use classified LiDAR laser scanning point clouds for this purpose. Both solutions, however, are computationally very complex.

The assumptions and dependencies discussed above are presented schematically in Figure 7.

4. Results (Lodz Case Study) and Discussion

4.1. Spatial Data Arrangement

The city of Lodz was chosen as the study area because the authors of this work focus their research on this city. The fact that the authors live in Lodz, and thus know the research area very well and had the opportunity to empirically verify all results, was not without significance.

All basic spatial indicators were calculated based on defined basic fields in the shape of a square of 30×30 m, consistent with the pixel arrangement of the satellite image. It was decided that this size would be appropriate for calculations for cities with large areas over 100 km^2 . Within the city limits of Lodz, 325,691 basic fields were designated. This is a demanding number for a personal computer to process, especially considering the fact that one of the stages involved the development of LiDAR data, which can also be resource-intensive [79]. This is the main reason why the size of the basic field should not be too small and why the data should not be more detailed. Then, the vegetation deficiency index was calculated based on 90×90 m squares in order to show the situation in the pixel itself but also in the adjacent basic fields, giving an average value for them.

Utilizing the Landsat 8 satellite scene with a resolution of 30 m and bands 4 (red range, known as RED) and 5 (near infrared, known as NIR) were used to calculate the NDVI in pixels corresponding to the resolution of the original image, i.e., $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$.

4.2. NDVI Values and Saturation Point

The NDVI vegetation index was the basis for calculating the indices. Since the entire image of the city of Lodz was covered by one satellite scene, neither solar nor atmospheric correction of the images was performed. The index values ranged from -0.18 to 0.63 .

To determine the relationship between NDVI and vegetation height in our study area, basic fields of $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ were designated. Out of 325,691, we only selected those basic fields that were covered with greenery completely, based on LiDAR data, as we wanted to focus solely on the thickness of the vegetation layer [40,80]. Then, the average height of greenery was determined by using an LAS to Raster function built into the ESRI ArcMap application [81]. The next task was to create a chart showing the dependence of the NDVI on the height of greenery.

The phenomenon of NDVI 'saturation' in our data is clearly visible in Figure 9, which shows the moving average plot of NDVI values versus vegetation height. A threshold was determined on the graph for which the value of the function $f(x)$ increases rapidly and the amplitude of the NDVI value becomes smaller and smaller. This value was clearly visible and was adopted arbitrarily and this was how we determined the location of the saturation point ($h_{\text{sat}} = 1.2 \text{ m}$; $NDVI_{\text{sat}} = 0.3$).

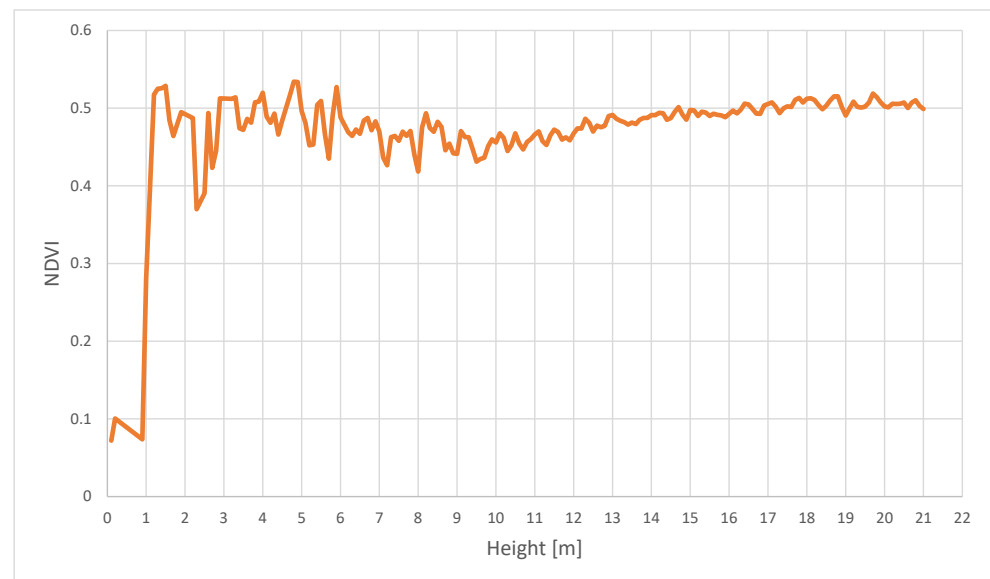


Figure 9. NDVI values in relation to the average height of greenery in the basic fields, where greenery covered the fields 100%.

4.3. Greenness Index Values

By calculating the Greenness Index, a map was obtained of the degree of vegetation development in individual places in Lodz, which can be interpreted as the amount of greenery in a given location. The spatial distribution of this indicator is presented in Figure 10. The average value of the greenness indicator for Lodz is 0.58.

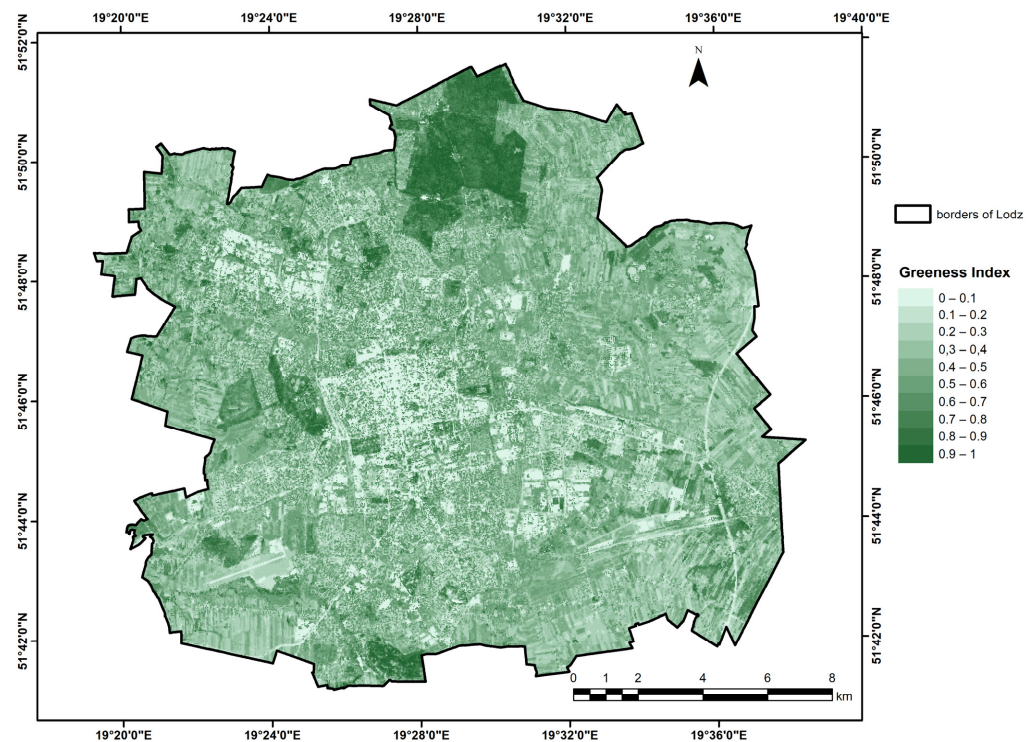


Figure 10. The spatial distribution of Greenness Index values in Lodz.

Based on the designated formula, it was determined which areas of Lodz could be classified as green. This was achieved by determining the average value of the Greenness Index for official green areas according to data from ŁOG. This was equal to 0.68 (corresponding to 0.67% of all basic fields). Then, those basic fields were selected for the entire city of Lodz, in which the Greenness Index value was at least 0.68. As a result, it was found that the designated green areas in Lodz covered an area of 32.20 km², which constituted 10.99% of the total surface area of Lodz (Figure 11).

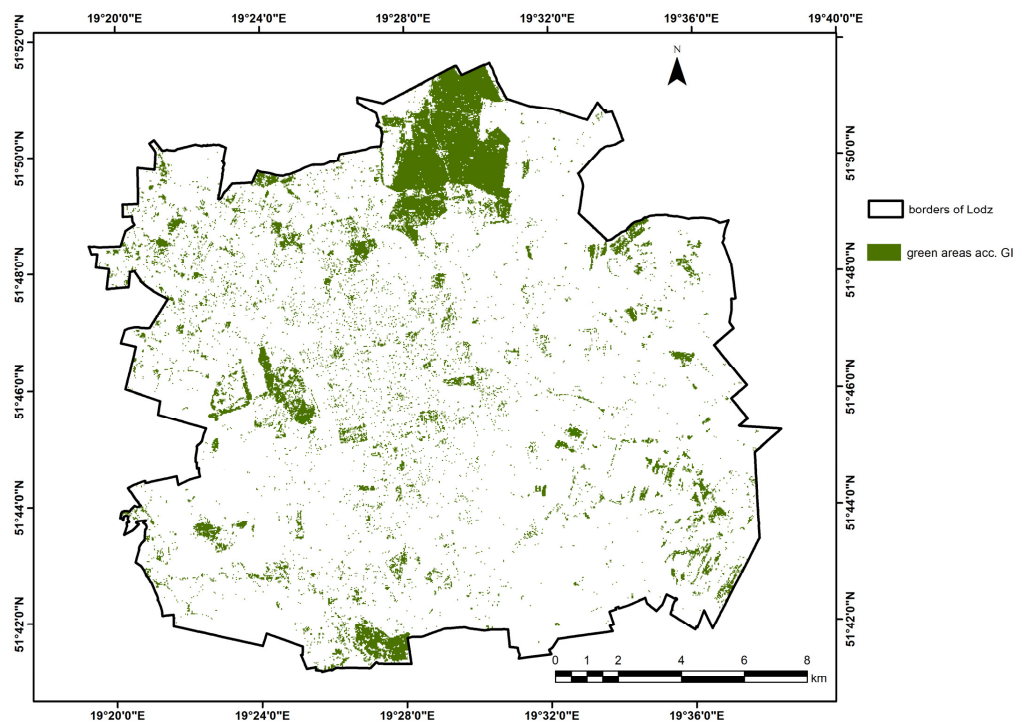


Figure 11. Designated green areas when using the Greenness Index method.

4.4. Greenery Participation Index Distribution in Lodz

The next goal was to designate green areas in the place of residence. The immediate vicinity of the place of residence was designated as a basic field of 30 m × 30 m along with the adjacent fields (Figure 12).

It is recommended that parks not be located more than 500 m from residential buildings (or to locate buildings at such distance from parks), which means a 10–15 min walk [82]. A study of the availability of green areas in large German cities with more than 100,000 inhabitants confirmed that almost 93% of the German population has access to green areas within a radius of 500 m from their home [83]. However, the quality of life of the city's inhabitants is mostly determined by the size and condition of green areas in their places of residence. It was assumed that the immediate surrounding means a space contained within a radius of approximately 50 m, which is approximately equivalent to a square of 90 m × 90 m.

After the analysis, based on the Local Population Index (Figure 13), it turned out that approximately 157,000 inhabitants of Lodz had greenery in their place of residence, with a Greenness Index of 0.771 or more. This constitutes 24.1% of the total population (Figure 14).

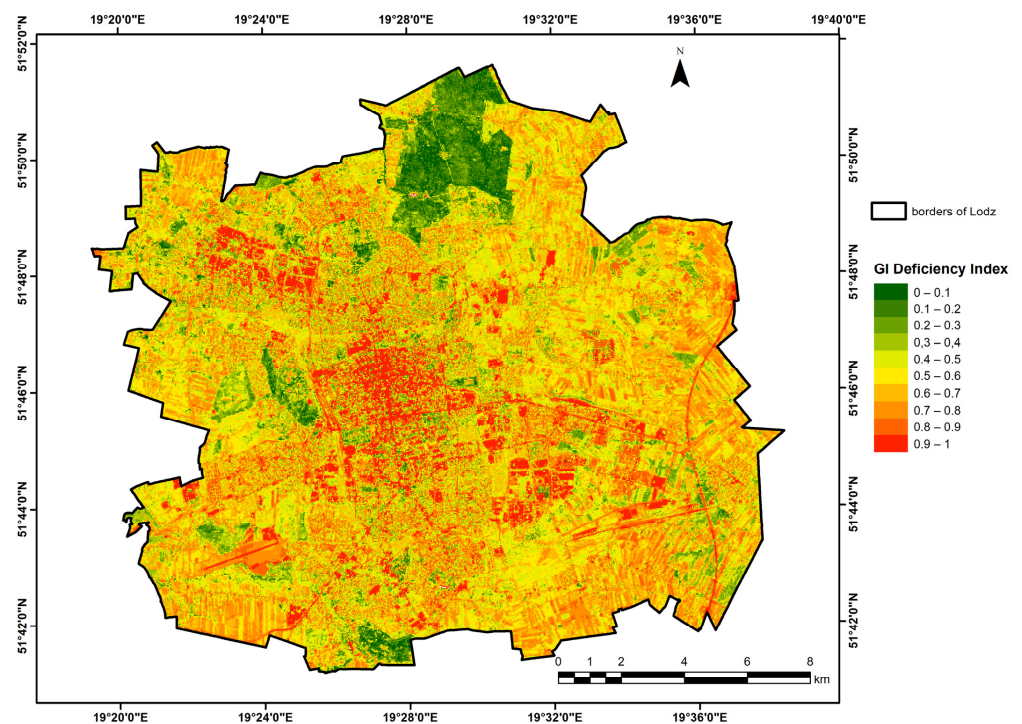


Figure 12. The spatial distribution of the Greenery Deficiency Index in Lodz.

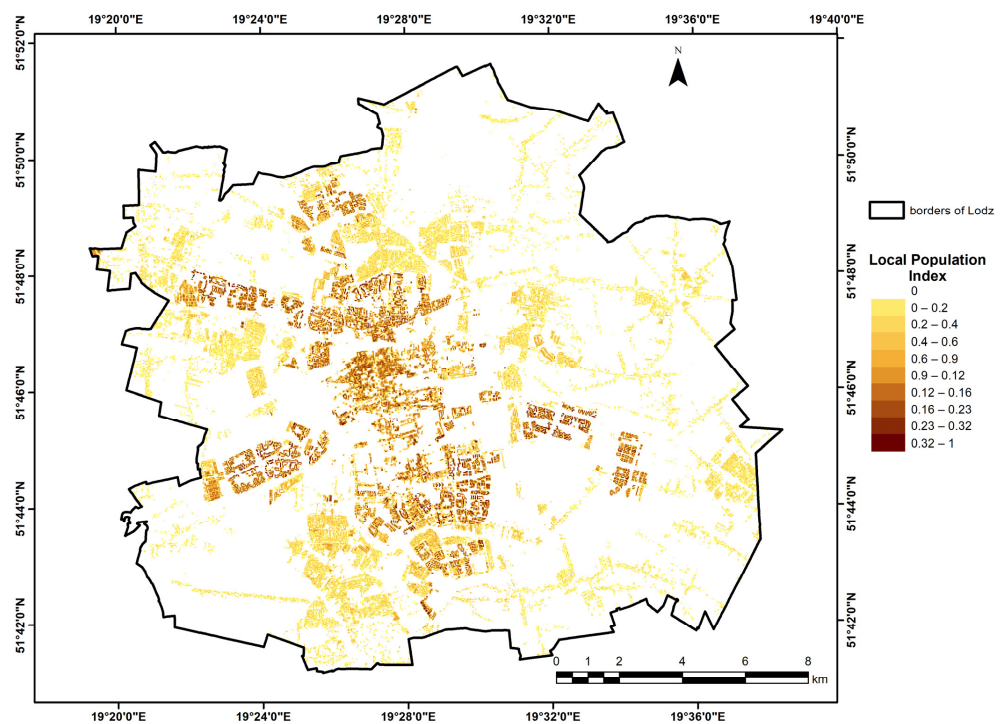


Figure 13. Local Population Index (LPI) in pixels: 30 m × 30 m.

As a result, the Greenery Participation Index for replenishing greenery in a given place was also calculated for each basic field. The spatial distribution of the GPI is presented in Figure 15.

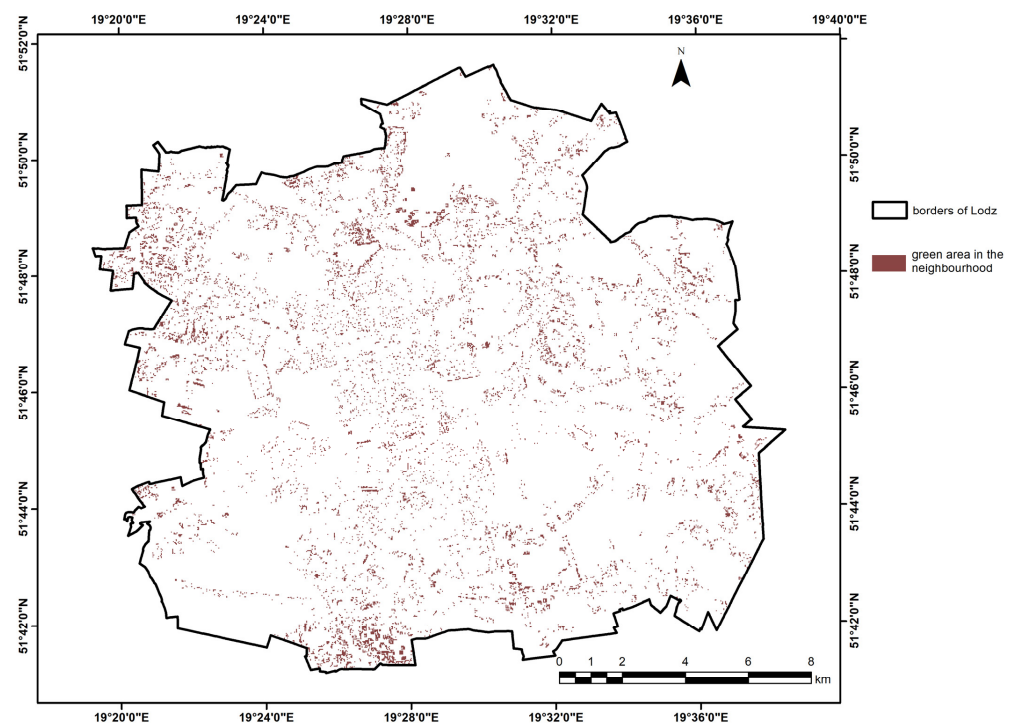


Figure 14. The inhabited pixels 30 m × 30 m adjacent to a pixel with a GI > 0.68.

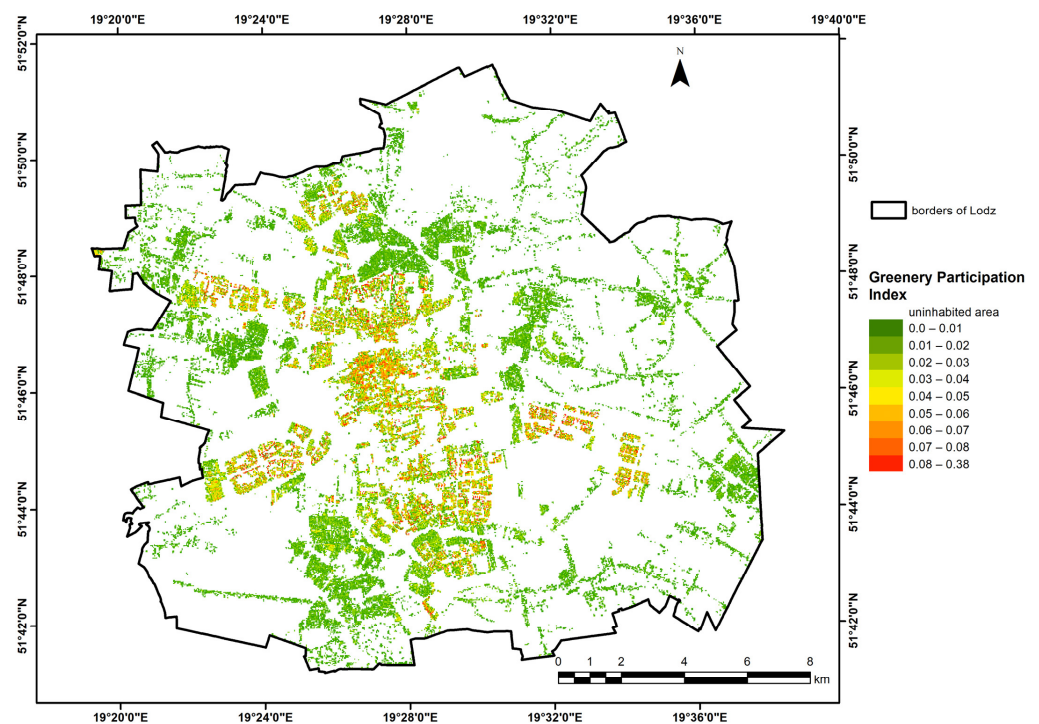


Figure 15. The Greenery Participation Index (GPI) in Lodz.

The GPI values in Lodz range from 0 to 0.38. A value of zero in most cases means an uninhabited area. However, it is possible to achieve the maximum value of the Greenness Index for a given city in a residential area—in such a case, the GPI value will also tend to the lowest possible value, i.e., to 0. At the opposite extreme, the maximum values, i.e., above 0.30, indicate areas with a high concentration of population and at the same time little greenery.

For better readability, the entire methodology is presented graphically in Figure 16, which shows the source data, the overall workflow, and the final indicators.

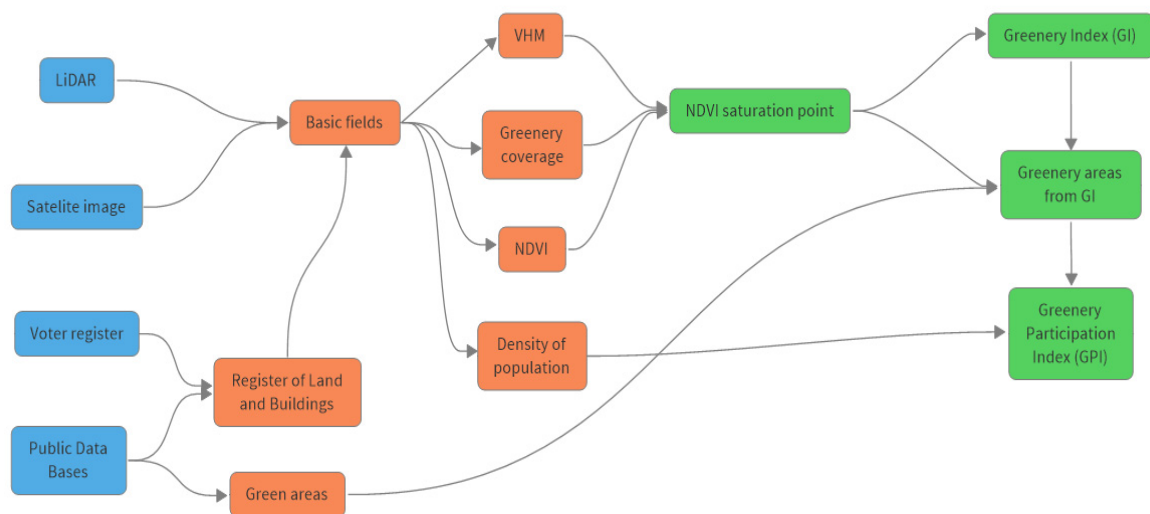


Figure 16. Workflow and data flow between source data and output indicators.

5. Conclusions

The presented results (Figure 17) show that the actual amount of greenery does not differ significantly from that presented in official reports. The area of 30.77 km², determined according to public data (Figure 18), is almost the same as that of green areas designated based on the Greenness Index (32.20 km²).

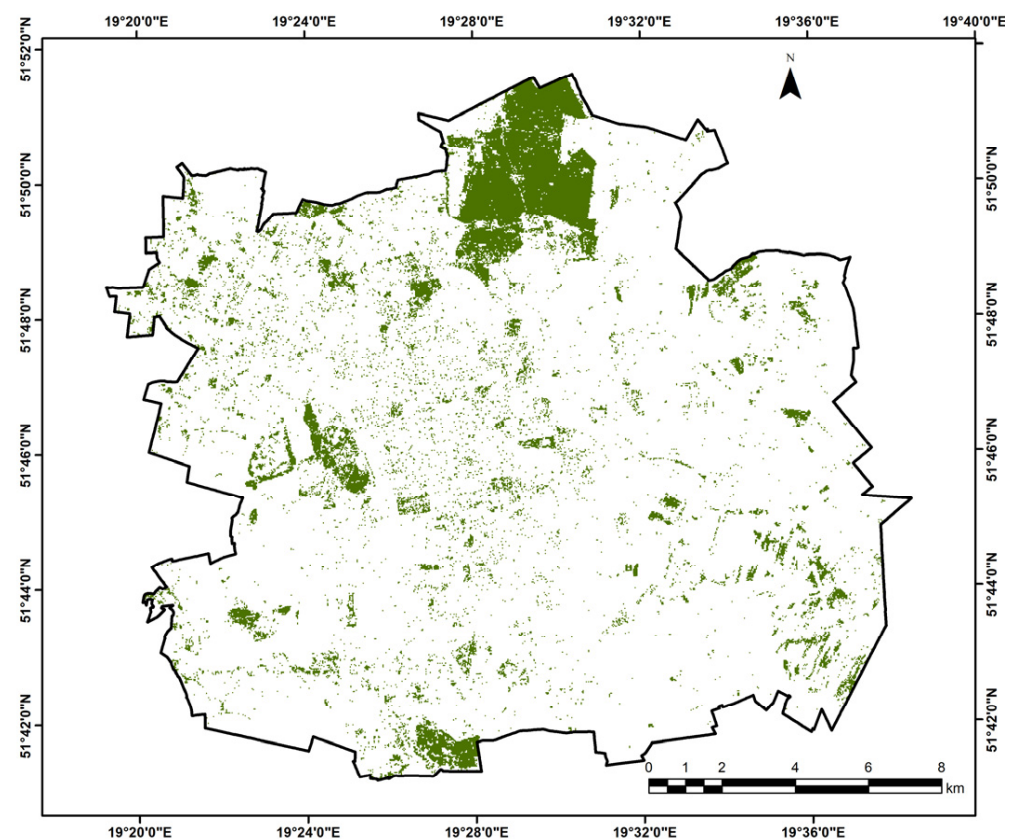


Figure 17. Designated green areas as determined using the Greenness Index method.

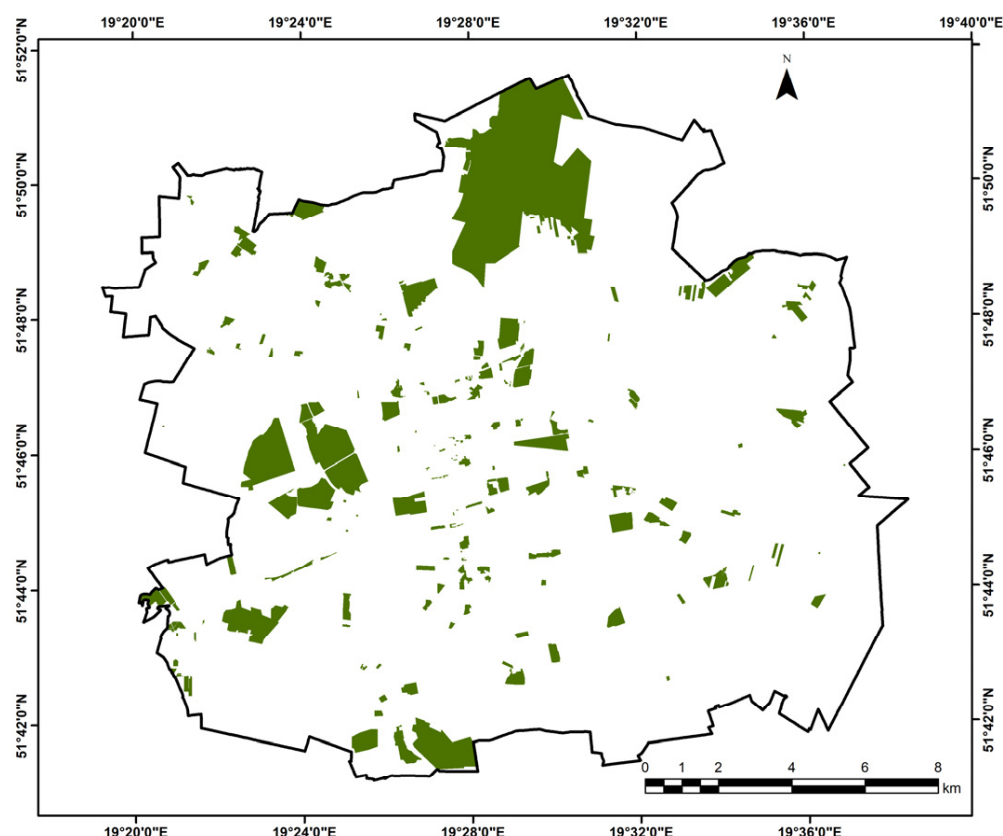


Figure 18. The arrangement of green areas in Lodz according to EGIB.

The uneven distribution of green areas throughout the city is very visible. Taking into account the distribution of inhabitants, the rule is that the more people there are in a given area, the less vegetation there is.

This has direct consequences on the distribution of the Greenery Participation Index values in Lodz, with the highest values being recorded in the city center, where there is dense residential development, while green areas constitute only a small part of the city. It is also suggested to use the method described for planning purposes, especially those relating to the development of green areas in the city. The results clearly show that there are still many places in Lodz that require additional investment in urban greenery.

The proposed indicators combine satellite data with demographic data, allowing us to obtain additional information resulting from various sources.

Instead of relying on data that are not entirely clearly defined, a uniform method should be used, which allows for the definition of land cover in a more realistic and objective way and enables an indisputable comparison of the quality of life in different parts of the city, as well as among different cities.

The results obtained by using individual indicators, although they constitute a method for organizing individual places in terms of vegetation abundance, are not free from flaws. First of all, the method is based on simplified data. The resolution of 30×30 m presents general values. For particularly important areas, satellite or even aerial data should be used. Additionally, the automatic classification of the LiDAR point cloud may cause certain errors. The independent classification of smaller parts of the city would affect the certainty of the reliability of these data.

The great advantage of the method is that it uses only free and publicly available input data. This method does not require specialized knowledge, needing only the basics of GIS. However, one should initially become used to the process of obtaining data and attaching them. Moreover, the method does not require specialized equipment or large computing

units. The average computer used for managing spatial data in city halls and offices has sufficient processing power. This method is also independent of the legal status, functions, and accessibility of a given area. It can help with decision-making processes regarding spatial changes in a city.

The method itself should be used in the process of spatial planning and management as well as in the implementation of activities aimed at nature protection.

Author Contributions: Conceptualization, A.B. and K.B.; methodology, A.B. and K.B.; software, A.B.; validation, A.B. and K.B.; formal analysis, A.B.; investigation, A.B. and K.B.; resources, A.B.; data curation, A.B.; writing—original draft preparation, A.B. and K.B.; writing—review and editing, A.B. and K.B.; visualization, A.B.; supervision, K.B.; project administration, K.B.; funding acquisition, K.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All data used in this study are publicly available online.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. Białobok, S. Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka. In *Ochrona Przyrodniczego Środowiska Człowieka*; Michajłow, W., Ed.; PWN: Warszawa, Poland, 1976; pp. 223–245.
2. Haber, Z.; Urbański, P. *Kształtowanie Terenów Zieleni z Elementami Ekologii*; Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego: Poznań, Poland, 2005.
3. Łukasiewicz, A.; Łukasiewicz, S. *Rola i Kształtowanie Zieleni Miejskiej: Skrypt dla Studentów Ochrony Środowiska*; Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza: Poznań, Poland, 2022.
4. Wu, W.; Wang, M.X.; Zhu, N.; Zhang, W.; Sun, H. Residential satisfaction about urban greenness: Heterogeneous effects across social and spatial gradients. *Urban For. Urban Green.* **2019**, *38*, 133–144. [\[CrossRef\]](#)
5. Wysocki, C. Miasto jako specyficzne środowisko życia roślinności. *Nauka Przyr. Technol.* **2008**, *2*, 1–10.
6. DeFries, R.S.; Rudel, T.; Uriarte, M.; Hansen, M. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nat. Geosci.* **2010**, *3*, 178–181. [\[CrossRef\]](#)
7. Konijnendijk, C.C. A decade of urban forestry in Europe. *For. Policy Econ.* **2003**, *5*, 173–186. [\[CrossRef\]](#)
8. Sdg, U. Sustainable development goals. In *The Energy Progress Report; Tracking SDG*; International Renewable Energy Agency: New York, NY, USA, 2019; Volume 7, pp. 805–814.
9. Konijnendijk, C.C. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *J. For. Res.* **2022**, *34*, 821–830. [\[CrossRef\]](#)
10. Farkas, J.Z.; Hoyk, E.; de Moraes, M.B.; Csomós, G. A systematic review of urban green space research over the last 30 years: A bibliometric analysis. *Heliyon* **2023**, *9*, e13406. [\[CrossRef\]](#)
11. Bielecki, A. Pluralizm Definicji Zieleni Miejskiej w Literaturze. Standardy, Aspekty Przyrodnicze i Techniczne. *Konwersatorium Wiedzy Mieście*, 2024; accepted, awaiting for the publication.
12. Ustawa 2004: Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody [Act 2004: Law of 16 April 2004 on the Protection of Nature] (c.t. Journal of Law of 20.10.2015 item 1651). Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20040920880> (accessed on 19 October 2024).
13. Taylor, L.; Hochuli, D.F. Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. *Landsc. Urban Plan.* **2017**, *158*, 25–38. [\[CrossRef\]](#)
14. Cudny, W. Model przemian miasta postsocjalistycznego—przykład Łodzi. *Stud. Miej.* **2011**, *4*, 153–159.
15. Archiciński, P.; Sikorski, P.; Sikorska, D.; Przybysz, A. Roślinność wieloletnich nieużytków miejskich—systematyka zbiorowisk, ich struktura i pełnione usługi ekosystemowe. Vegetation of perennial urban wastelands—syntaxonomy, structure and ecosystem services. *Przegląd Geogr.* **2021**, *93*, 341–363. [\[CrossRef\]](#)
16. Batała, E.; Thekla, T. Street tree health assessment system: A tool for study of urban greenery. *Int. J. Sustain. Dev. Plan.* **2009**, *4*, 345–356. [\[CrossRef\]](#)
17. Węzyk, P.; Bajorek-Zydroń, K.; Cisło-Lesicka, U. Monitoring teledetekcyjny zieleni miejskiej z pułapu BSP oraz satelitarnego. In *Drzewa w Zieleni Miejskiej*; Szwałko, P., Węzyk, P., Eds.; ProGea 4D sp. z o.o., Zarząd Zieleni Miejskiej w Krakowie: Kraków, Poland, 2021.
18. Zarzecki, M.; Pasierbiński, A. Zastosowanie GIS i teledetekcji w badaniach szaty roślinnej. *Wiadomości Bot.* **2009**, *53*, 53–56.

19. Niewiadomski, A. Struktura i znaczenie terenów zieleni w Łodzi na tle dużych ośrodków miejskich w Polsce. *Acta Univ. Lodz. Folia Geogr. Phys.* **2013**, *12*, 33–47. [CrossRef]
20. Central Statistical Office. Available online: www.stat.gov.pl (accessed on 9 January 2024).
21. Krzywnicka, I.; Jankowska, P. The accessibility of public urban green space. A case study of Białystok city. *Acta Sci. Pol. Adm. Locorum.* **2021**, *20*, 203–214. [CrossRef]
22. Będkowski, K.; Bielecki, A. Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. *Teledetekcja Sr.* **2017**, *57*, 5–14.
23. Rouse, J.W., Jr.; Haas, R.H.; Deering, D.W.; Schell, J.A.; Harlan, J.C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA Tech. Rep. Serv.* **1974**, E75-10354. Available online: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419> (accessed on 19 October 2024).
24. Bolkaner, M.K.; Asilsoy, B. Reinventing the Urban Neighborhood Green Index in the Context of Urban Ecology as a Conceptual Framework in Northern Nicosia, Cyprus. *Sustainability* **2023**, *15*, 13880. [CrossRef]
25. Jia, J.; Zlatanova, S.; Liu, H.; Aleksandrov, M.; Zhang, K. A design-support framework to assess urban green spaces for human wellbeing. *Sustain. Cities Soc.* **2023**, *98*, 104779. [CrossRef]
26. Jackson, R.D.; Huete, A.R. Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.* **1991**, *11*, 185–200. [CrossRef]
27. Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* **1979**, *8*, 127–150. [CrossRef]
28. Abutaleb, K.; Mudede, M.F.; Nkongolo, N.; Newete, S.W. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* **2021**, *24*, 343–351. [CrossRef]
29. Wang, T.; Skidmore, A.K.; Toxopeus, A.G.; Liu, X. Understory bamboo discrimination using a winter image. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2009**, *75*, 37–47. [CrossRef]
30. Lhermitte, S.; Verbesselt, J.; Verstraeten, W.W.; Coppin, P. A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2010**, *76*, 673–682. [CrossRef]
31. Olpenda, A.S.; Paringit, E.C. Utilizing spectral reflectance and vegetation indices of Bougainvillea spectabilis for monitoring particulate air pollution in Metro Manila. In Proceedings of the 32nd Asian Conference on Remote Sensing, Taipei, Taiwan, 3–7 October 2011.
32. Colombo, R.; Bellingeri, D.; Fasolini, D.; Marino, C.M. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sens. Environ.* **2003**, *86*, 120–131. [CrossRef]
33. Badgley, G.; Field, C.B.; Berry, J.A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Sci. Adv.* **2017**, *3*, 1–5. [CrossRef] [PubMed]
34. Wang, L.; Hunt, E.R., Jr.; Qu, J.J.; Hao, X.; Daughtry, C.S. Towards estimation of canopy foliar biomass with spectral reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 836–840. [CrossRef]
35. Jarocińska, A.; Zagajewski, B. Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja Sr.* **2008**, *40*, 100–124.
36. Skachkova, M.; Guryeva, O. Monitoring of the State of Saint Petersburg Green Spaces by Remote Sensing Data. *Ecol. Ind. Russ.* **2023**, *27*, 51–57. (In Russian) [CrossRef]
37. Worm, A.; Będkowski, K.; Bielecki, A. Wykorzystanie wskaźników powierzchniowych i objętościowych z wysokorozdzielczych danych teledetekcyjnych do oceny wypełnienia roślinnością kwartałów miejskich w centrum miasta Łodzi. *Teledetekcja Sr.* **2019**, *60*, 5–20.
38. Matasci, G.; Coops, N.C.; Williams, D.A.; Page, N. Mapping tree canopies in urban environments using airborne laser scanning (ALS): A Vancouver case study. *For. Ecosyst.* **2018**, *5*, 1–9. [CrossRef]
39. Wehr, A.; Lohr, U. Airborne laser scanning—An introduction and overview. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **1999**, *54*, 68–82. [CrossRef]
40. Wirth, H.; Schilbach, G.; Wirth, A. Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich. *Vermessungstechnik* **1987**, *33*, 56–59.
41. Borowiecki, I.; Michalik, A. Klasyfikacja chmury punktów lotniczego skaningu laserowego z zastosowaniem programów Tiltan Tlid, Terrascan VRMesh. *Infrastrukt. Ekol. Teren. Wiej.* **2012**, *1/III*, 219–230.
42. Kubalska, J.; Preuss, R. Wykorzystanie danych fotogrametrycznych do inwentaryzacji zieleni na terenach zurbanizowanych. *Arch. Fotogram. Kartogr. Teledetekcji* **2014**, *26*, 75–86.
43. Grigillo, D.; Kanjir, U. Urban object extraction from digital surface model and digital aerial images. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2012**, *1*, 215–220. [CrossRef]
44. Myeong, S.; Nowak, D.J.; Hopkins, P.F.; Brock, R.H. Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery. *Urban Ecosyst.* **2001**, *5*, 243–256. [CrossRef]
45. Krukowski, M.; Cebrykow, P.; Płusa, J. Klasyfikacja terenów zieleni w Lublinie na podstawie zdjęcia satelitarnego IKONOS 2. *Reg. Barometer. Anal. Progn.* **2016**, *14*, 35–44. [CrossRef]
46. Alekseev, D.K.; Primak, E.A.; Kanukhina, A.Y.; Vinogradov, F.V. Dynamics of green areas in Saint Petersburg and climate risks. *Adv. Curr. Nat. Sci.* **2024**, *8*, 6–11. [CrossRef]

47. Strzeliński, P.; Wencel, A.; Zawila-Niedzwiecki, T.; Zasada, M.; Jagodziński, A.; Chirrek, M. Wybrane zdalne metody szacowania biomasy roślinnej w ekosystemach leśnych jako podstawa systemu raportowania bilansu węgla. *Roczniki Geomatyki Ann. Geomat.* **2007**, *5*, 7–16.
48. Stereńczak, K. Lotniczy skaning laserowy (LiDAR) w badaniach na rzecz ochrony przyrody. *Stud. Mater. Cent. Edukac. Przyr.-Leśnej* **2009**, *11*, 135–143.
49. Mu, X.; Yang, Y.; Xu, H.; Guo, Y.; Lai, Y.; McVicar, T.R.; Xie, D.; Yan, G. Improvement of NDVI mixture model for fractional vegetation cover estimation with consideration of shaded vegetation and soil components. *Remote Sens. Environ.* **2024**, *314*, 114409. [\[CrossRef\]](#)
50. Pouya, S.; Aghlmand, M. Evaluation of urban green space per capita with new remote sensing and geographic information system techniques and the importance of urban green space during the COVID-19 pandemic. *Environ. Monit. Assess.* **2022**, *194*, 633. [\[CrossRef\]](#)
51. Shekhar, S.; Kumar, S. Assessing the quality of urban environment through urban neighbourhood green index. In Proceedings of the ISPRS TC VIII International Symposium on “Operational Remote Sensing Applications: Opportunities, Progress and Challenges”, Hyderabad, India, 9 December 2014.
52. Yang, J.; Zhao, L.; McBride, J.; Gong, P. Can you see green? Assessing the visibility of urban forests in cities. *Landsc. Urban Plan.* **2009**, *91*, 97–104. [\[CrossRef\]](#)
53. da Costa Ribeiro, R.J.; Goulart, F.F.; Jacobson, T.K.B.; da Rocha, D.M.S.; Jaloretto, D.; Gonçalves, B.E.F.; Gerber, D. Beyond climate villains: Estimating carbon storage in urban parks using high-resolution imagery combined with field sampling. *preprint* **2024**. [\[CrossRef\]](#)
54. Lu, Y.; Ferranti, E.J.S.; Chapman, L.; Pfrang, C. Assessing urban greenery by harvesting street view data: A review. *Urban For. Urban Green.* **2023**, *83*, 127917. [\[CrossRef\]](#)
55. Ionova, M.N. Application of Remote Sensing of the Earth for Monitoring Green Spaces in the City of Yakutsk. *Vestn. Sev. Vostochnogo Fed. Univ. Im. M.K. Ammosova. Ser. Nauki Zemle* **2020**, *4*, 57–64. [\[CrossRef\]](#)
56. Liszewski, S. *Lodz: Monografia Miasta; Łódzkie Towarzystwo Naukowe*: Lodz, Poland, 2009.
57. Koter, M. *Geneza Układu Przestrzennego Łodzi Przemysłowej*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa, Poland, 1969.
58. Wycichowska, B. Przegląd działań w zakresie ochrony i kształtowania zieleni zabytkowej miasta Łodzi. *Probl. Ekol. Kraj.* **2008**, *22*, 65–78.
59. Durecka, I. *Parki Jako Element Struktury Przestrzennej Miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego*. Ph.D. Thesis, University of Lodz, Lodz, Poland, 2017.
60. Borsa, D.; Piot, B.; Munos, R.; Pietquin, O. Observational learning by reinforcement learning. *arXiv* **2017**, arXiv:1706.06617.
61. Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 3 stycznia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa w sprawie ewidencji gruntów i budynków (Dz.U. 2019 poz. 393). Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20190000393/O/D20190393.pdf> (accessed on 19 October 2024).
62. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz.U. 2022 poz. 1518). Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220001518/O/D20221518.pdf> (accessed on 19 October 2024).
63. Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F.; Huete, A.R. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sens. Rev.* **1995**, *13*, 95–120. [\[CrossRef\]](#)
64. Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *62*, 241–252. [\[CrossRef\]](#)
65. Curran, P.J. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci.* **1983**, *309*, 257–270.
66. Klosinska, T. Wykorzystanie roślin drzewiastych w remediacji terenów zurbanizowanych. *Sylvan* **2021**, *165*, 725–737.
67. Cunliffe, A.M.; Assmann, J.J.; Daskalova, G.N.; Kerby, J.T.; Myers-Smith, I.H. Aboveground biomass corresponds strongly with drone-derived canopy height but weakly with greenness (NDVI) in a shrub tundra landscape. *Environ. Res. Lett.* **2020**, *15*, 125004. [\[CrossRef\]](#)
68. Jiang, Z.; Huete, A.R. Linearization of NDVI Based on its Relationship with Vegetation Fraction. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2010**, *76*, 965–975. [\[CrossRef\]](#)
69. Terekhin, E.A. Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa* **2020**, *17*, 142–156. [\[CrossRef\]](#)
70. Nelson, R. Modelling forest canopy heights: The effects of canopy shape. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *60*, 327–334. [\[CrossRef\]](#)
71. Żybura, H. Długość koron drzew w drzewostanach sosnowych. *Sylvan* **1977**, *121*, 13–20.
72. Bielecki, A.; Będowski, K. The degree of greenery in Lodz city, Poland—Clearing up discrepancies between official statistics and satellite data. *Acta Sci. Pol. Adm. Locorum.* **2022**, *21*, 489–512. [\[CrossRef\]](#)
73. Dai, L.; Xu, Q.; Fan, X.; Chang, M.; Yang, Q.; Yang, F.; Ren, J. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment. *Gongchengdizhixuebao* **2017**, *25*, 1151–1164.
74. Gluch, R.M.; Ridd, M.K. The VIS model: Quantifying the urban environment. In *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010; pp. 85–116.

75. Gutman, G.; Ignatov, A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *Int. J. Remote Sens.* **1998**, *19*, 1533–1543. [[CrossRef](#)]
76. Jiang, Z.; Huete, A.R.; Chen, J.; Chen, Y.; Li, J.; Yan, G.; Zhang, X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *101*, 366–378. [[CrossRef](#)]
77. Gao, L.; Wang, X.; Johnson, B.A.; Tian, Q.; Wang, Y.; Verrelst, J.; Mu, X.; Gu, X. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2020**, *159*, 364–377. [[CrossRef](#)]
78. Adamiak, M.; Będkowski, K.; Bielecki, A. Generative adversarial approach to urban areas NDVI estimation: A case study of Lodz, Poland. *Quaest. Geogr.* **2023**, *42*, 87–106. [[CrossRef](#)]
79. Bielecki, A. Porównanie oprogramowania do przetwarzania danych LiDAR w zakresie generowania NMT i NMPT. *Teledetekcja Sr.* **2018**, *58*, 5–11.
80. Kressler, F.; Mucher, C.A.; Steinnocher, K.; Thunnissen, H.A.M. Evaluation of medium-resolution satellite images for land use monitoring using spectral mixture analysis. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **2000**, *33*, 709–716.
81. LAS to Raster Function. Available online: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/las-to-raster-function.htm> (accessed on 2 April 2024).
82. Czarnecki, W. *Planowanie Miast i Osiedli. Vol. 1.*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa, Poland, 1965.
83. Wüstemann, H.; Kalisch, D.; Kolbe, J. Access to urban green space and environmental inequalities in Germany. *Landsc. Urban Plan.* **2017**, *164*, 124–131. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.