



Universitatea Tehnică a Moldovei

**ANALIZA SPAȚIALĂ A DINAMICII UTILIZĂRII
TERENURILOR ÎN MUNICIPIUL CHIȘINĂU PE
BAZA DATELOR DE TELEDETECȚIE**

Student:

Cătăraș Nichita

Coordonator:

Vlasenco Ana

**conferențiar universitar,
doctor în științe tehnice**

Chișinău, 2026

ADNOTARE

la teza de licență cu tema „ANALIZA SPAȚIALĂ A DINAMICII UTILIZĂRII TERENURILOR ÎN MUNICIPIUL CHIȘINĂU PE BAZA DATELOR DE TELEDETECȚIE”, autor Cătărașu Nichita

Prezenta teză de licență are ca obiectiv elaborarea și aplicarea unui flux metodologic complet și reproductibil pentru analiza spațio-temporală a utilizării și acoperirii terenurilor în municipiul Chișinău, utilizând date satelitare gratuite din misiunile Sentinel-2 și Sentinel-1, în vederea cuantificării expansiunii urbane în perioada 2017-2025 și estimării tendințelor de dezvoltare până în 2030.

Cuvintele cheie a acestei lucrări sunt: teledeteecție, LULC, Random Forest, Sentinel-1/2, expansiune urbană, municipiul Chișinău.

Teza de licență este structurată în partea introductivă și trei capitole, cuprinzând 124 pagini, 12 tabele, 17 figuri, 6 anexe și 38 surse bibliografice.

Partea introductivă evidențiază scopul lucrării, obiectivele generale și specifice, ipotezele de cercetare, metodologia aplicată, precum și relevanța și actualitatea temei în contextul dezvoltării urbane accelerate din municipiul Chișinău.

Primul capitol prezintă conceptele fundamentale privind utilizarea și acoperirea terenurilor, principiile teledeteecției multispectrale și radar, algoritmul Random Forest, sistemele de coordonate și proiecțiile cartografice, precum și cadrul legislativ și normativ din Republica Moldova.

Capitolul al doilea descrie în detaliu cele opt etape ale fluxului de procesare: obținerea datelor din Google Earth Engine, preprocesarea și calculul a 48 de caracteristici per pixel, colectarea datelor de antrenament, clasificarea Random Forest, corecțiile post-clasificare, constrângerea monotonă temporală, validarea acurateții și analiza rezultatelor.

Capitolul al treilea constituie partea aplicativă a lucrării și prezintă rezultatele clasificării LULC pentru cele trei momente temporale analizate, analiza expansiunii urbane la nivelul celor 17 unități administrative, limitările metodologiei, prognozele pentru 2030 și aplicația web interactivă pentru vizualizarea rezultatelor.

Lucrarea este însoțită de 6 anexe care includ hărțile de clasificare LULC, statisticile per unitate administrativă, graficele dinamicii și prognozei pentru 2030, precum și codul sursă Python complet pentru asigurarea reproductibilității metodologiei.

În concluzie, lucrarea contribuie la dezvoltarea unui flux metodologic complet și reproductibil pentru monitorizarea spațio-temporală a utilizării terenurilor, demonstrând că resursele de teledeteecție gratuite, combinate cu algoritmi de învățare automată, pot furniza rezultate de înaltă acuratețe pentru fundamentarea deciziilor de planificare urbană și teritorială în municipiul Chișinău și, prin extensie, în întreaga Republică Moldova.

ABSTRACT

to the license thesis with the theme

„SPATIAL ANALYSIS OF LAND USE DYNAMICS IN CHIȘINĂU MUNICIPALITY BASED ON REMOTE SENSING DATA”, author Cătărașu Nichita

This bachelor's thesis aims to develop and apply a complete and reproducible methodological workflow for the spatio-temporal analysis of land use and land cover in Chișinău municipality, using free satellite data from the Sentinel-2 and Sentinel-1 missions, in order to quantify urban expansion during the period 2017–2025 and estimate development trends up to 2030.

The keywords of this thesis are: remote sensing, LULC, Random Forest, Sentinel-1/2, urban expansion, Chișinău municipality.

The bachelor's thesis is structured into an introductory part and three chapters, comprising 124 pages, 12 tables, 17 figures, 6 annexes and 38 bibliographic sources.

The introductory part highlights the aim of the thesis, the general and specific objectives, the research hypotheses, the methodology applied, as well as the relevance and topicality of the subject in the context of accelerated urban development in Chișinău municipality.

The first chapter presents the fundamental concepts of land use and land cover, the principles of multispectral and radar remote sensing, the Random Forest algorithm, coordinate systems and cartographic projections, as well as the legislative and normative framework of the Republic of Moldova.

The second chapter describes in detail the eight stages of the processing workflow: data acquisition from Google Earth Engine, preprocessing and calculation of 48 features per pixel, training data collection, Random Forest classification, post-classification corrections, temporal monotonic constraint, accuracy validation and results analysis.

The third chapter constitutes the applied part of the thesis and presents the LULC classification results for the three analyzed time points, the analysis of urban expansion across the 17 administrative units, methodology limitations, predictions for 2030 and the interactive web application for results visualization.

The thesis is accompanied by 6 annexes including the LULC classification maps, statistics per administrative unit, dynamics and 2030 forecast charts, as well as the complete Python source code to ensure methodological reproducibility.

In conclusion, the thesis contributes to the development of a complete and reproducible methodological workflow for spatio-temporal land use monitoring, demonstrating that free remote sensing resources, combined with machine learning algorithms, can deliver high-accuracy results to support urban and territorial planning decisions in Chișinău municipality and, by extension, throughout the Republic of Moldova.

CUPRINS

INTRODUCERE.....	11
1 ANALIZA SPAȚIALĂ A UTILIZĂRII TERENURILOR PRIN TELEDETECȚIE.....	13
1.2 Teledeteția satelitară, principii și date utilizate	14
1.3 Clasificarea supervizată și algoritmul Random Forest.....	15
1.4 Sisteme de coordonate și proiecții cartografice.....	16
1.5 Sisteme informaționale geografice și analiza spațio-temporală.....	17
1.6 Stadiul cercetărilor în domeniu	17
1.7 Cadrul legislativ și normativ privind utilizarea terenurilor în Republica Moldova	18
1.8 Actualitatea și importanța temei.....	19
1.9 Concluzii	20
2 METODOLOGIA DE PROCESARE A DATELOR SATELITARE SENTINEL PENTRU CLASIFICAREA LULC	21
2.1 Etapele de procesare a datelor satelitare	21
2.2 Platforma satelitară Sentinel-2 MSI (caracteristici tehnice).....	24
2.3 Datele radar Sentinel-1 SAR (caracteristici și rol)	25
2.4 Indicii spectrali utilizați în clasificarea LULC	25
2.5 Algoritmul Random Forest	28
2.6 Validarea acurateții clasificării	30
2.7 Modelul de regresie liniară pentru predicția expansiunii urbane.....	31
2.8 Infrastructura software utilizată	33
2.9 Concluzii	34
3 ANALIZA SPAȚIALĂ A DINAMICII UTILIZĂRII TERENURILOR ÎN MUNICIPIUL CHIȘINĂU PE BAZA DATELOR DE TELEDETECȚIE / STUDIU DE CAZ	35
3.1 Caracterizarea zonei de studiu	35
3.2 Date satelitare utilizate	36
3.3 Schema metodologică de clasificare.....	36
3.4 Validarea acurateții clasificării	40
3.5 Analiza importanței caracteristicilor (Feature Importance)	42
3.6 Rezultatele clasificării și analiza multitemporală.....	43
3.7 Limitări ale metodologiei și surse de eroare	48
3.8 Modelarea predictivă a expansiunii urbane pentru 2030	50
3.9 Aplicația web interactivă pentru vizualizarea rezultatelor	53
3.10 Discuții și interpretare în context regional	54
CONCLUZII	55

					UTM 0731.2 004 ME			
<i>Mod.</i>	<i>Coala</i>	<i>Nr. doc.</i>	<i>Semnăt.</i>	<i>Data</i>				
<i>Elaborat</i>	<i>Cătărașu N.</i>				Analiza spațială a dinamicii utilizării terenurilor în municipiul Chișinău pe baza datelor de teledeteție	<i>Faza</i>	<i>Coala</i>	<i>Coli</i>
<i>Coordonator</i>	<i>Vlasenco A.</i>					L	9	124
<i>Consultant</i>	-					UTM FCGC		
<i>Verificat</i>	<i>Ovdii M.</i>					IGC-2203		
<i>Aprobat</i>	<i>Taranenco A.</i>							

BIBLIOGRAFIE	57
ANEXE	60
Anexa 1. Hărțile de clasificare LULC ale municipiului Chișinău (2017, 2020, 2025).....	61
Anexa 2. Hărțile de clasificare LULC per unitate administrativă (2017, 2020, 2025)	64
Anexa 3. Statistici privind utilizarea terenurilor per unitate administrativă, Municipiul Chișinău, 2017–2025	81
Anexa 4. Grafice privind dinamica LULC (2017–2025) per unitate administrativă	82
Anexa 5. Grafice privind regresia liniară și prognoza pentru 2030 per unitate administrativă	91
Anexa 6. Cod sursă Python — Metodologie de clasificare și prognoză LULC.....	100

INTRODUCERE

Transformarea continuă a peisajului urbanistic din marile centre populate reprezintă una dintre cele mai mari provocări actuale ale planificării teritoriale, cu efecte directe asupra mediului și a calității vieții. Municipiul Chișinău, capitala Republicii Moldova, concentrează aproximativ 30% din populația țării și înregistrează în ultimii ani o extindere urbană accelerată, cu consecințe vizibile asupra terenurilor agricole și forestiere din zonele periurbane.

Prezenta lucrare abordează această problemă prin metode moderne de teledetecție satelitară și clasificare automată. Folosind datele gratuite din programul european Copernicus: misiunile Sentinel-2 și Sentinel-1 au fost produse hărți de utilizare și acoperire a terenurilor (LULC) cu o rezoluție de 10 metri pentru perioada 2017–2025.

Motivația principală vine dintr-o lipsă concretă: în Republica Moldova nu există un produs cartografic LULC actualizat la această rezoluție pentru municipiul Chișinău. Planificarea urbană se bazează în continuare pe date cadastrale incomplete sau neactualizate periodic, ceea ce îngreunează luarea unor decizii informate privind dezvoltarea teritoriului. Datele Copernicus, accesibile gratuit, oferă posibilitatea remedierii acestei situații la costuri minime, reaplicabil de orice instituție publică din țară.

Lucrarea aduce contribuții atât la nivel practic, cât și metodologic. Din punct de vedere aplicativ, este o analiză LULC realizată la rezoluție de 10 metri pentru teritoriul municipiului Chișinău, acoperind 17 unități administrativ-teritoriale pe parcursul a opt ani. Din perspectivă metodologică, abordarea propusă integrează date optice multispectrale Sentinel-2 și date radar Sentinel-1 într-un set comun de 48 de caracteristici per pixel, care a stat la baza antrenării algoritmului Random Forest. Rezultatele clasificării au fost ulterior corectate folosind date vectoriale oficiale disponibile pe platforma geodata.gov.md.

Scopul central este elaborarea unui flux metodologic complet și reproductibil pentru cuantificarea expansiunii urbane și estimarea tendințelor până în 2030.

Obiectivele urmărite sunt:

- Clasificarea LULC pentru 2017, 2020 și 2025;
- Validarea prin indicatori statistici recunoscuți;
- Analiza dinamicii per unitate administrativă;
- Modelarea predictivă;
- Dezvoltarea unei aplicații web pentru vizualizarea rezultatelor.

Lucrarea este organizată în trei capitole interdependente, fiecare construindu-se pe rezultatele celui anterior.

					<i>UTM 0731.2 – 004 ME</i>	<i>Coala</i>
						11
<i>Mod.</i>	<i>Coala</i>	<i>Nr. doc.</i>	<i>Semnătura</i>	<i>Data</i>		

Capitolul 1 stabilește cadrul teoretic și legislativ al lucrării, prezentând conceptele fundamentale de utilizare și acoperire a terenurilor, principiile teledetecției multispectrale și radar, algoritmul Random Forest și cadrul normativ din Republica Moldova privind datele geospațiale.

Capitolul 2 descrie în detaliu arhitectura fluxului de procesare a datelor satelitare Sentinel, structurat în opt etape successive, de la descărcarea imaginilor în Google Earth Engine până la validarea acurateții clasificărilor prin matrice de confuzie și coeficientul Kappa.

Capitolul 3 reprezintă studiul de caz propriu-zis pentru municipiul Chișinău, incluzând rezultatele clasificării LULC pentru 2017, 2020 și 2025, analiza detaliată a expansiunii urbane la nivelul celor 17 unități administrative, predicțiile pentru 2030 și o aplicație web interactivă pentru vizualizarea rezultatelor.

Lucrarea recunoaște și câteva limitări inerente abordării adoptate. Numărul redus de momente temporale analizate, trei ani pe o perioadă de opt ani limitează puterea modelului predictiv. Rezoluția de 10 metri subestimează sistematic elementele construite mici, precum garduri sau clădiri izolate sub 100 m². O eroare sistematică de clasificare a fost identificată în zona Sîngera, cauzată de insuficiența datelor de antrenament reprezentative pentru acea localitate. Toate aceste aspecte sunt analizate critic și propuse ca direcții concrete de îmbunătățire pentru studii viitoare.

					<i>UTM 0731.2 - 004 ME</i>	<i>Coala</i>
<i>Mod.</i>	<i>Coala</i>	<i>Nr. doc.</i>	<i>Semnătura</i>	<i>Data</i>		12

BIBLIOGRAFIE

1. TURNER, B.L.; SKOLE, D.; SANDERSON, S.; FISCHER, G.; FRESCO, L.; LEEMANS, R. Land-Use and Land-Cover Change: Science/Research Plan. IGBP Report No. 35, HDP Report No. 7. Stockholm și Geneva: IGBP, 1995.
2. FOLEY, J.A.; DeFRIES, R.; ASNER, G.P. et al. Global consequences of land use. In: Science. 2005, vol. 309, nr. 5734, pp. 570–574.
3. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. CORINE Land Cover 2018 — Copernicus Land Monitoring Service. Copenhaga: EEA, 2019. Disponibil: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
4. LILLESAND, T.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 736 p.
5. ESA. Sentinel-2 User Handbook. Paris: European Space Agency, 2015. Disponibil: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
6. ESA. Sentinel-1 User Handbook. Paris: European Space Agency, 2013.
7. LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. In: International Journal of Remote Sensing. 2007, vol. 28, nr. 5, pp. 823–870.
8. BREIMAN, L. Random forests. In: Machine Learning. 2001, vol. 45, nr. 1, pp. 5–32.
9. BELGIU, M.; DRĂGUȚ, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016, vol. 114, pp. 24–31.
10. MAXWELL, A.E.; WARNER, T.A.; FANG, F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. In: International Journal of Remote Sensing. 2018, vol. 39, nr. 9, pp. 2784–2817.
11. VLASENCO, A. Contribuții cu privire la perfecționarea parametrilor de transformare a coordonatelor și modificarea proiecțiilor cartografice pentru teritoriul Republicii Moldova: tz. de doct. în științe tehnice. Chișinău, 2019. 204 p.
12. VLASENCO, A. Proiecții cartografice și transformări de datum în Republica Moldova. Monografie. 160 p. Editura "Globe Edit", 2024. ISBN 978-620-6-79753-1.
13. GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. In: Remote Sensing of Environment. 2017, vol. 202, pp. 18–27. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
14. MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A.; VINING, G.G. Introduction to Linear Regression

					<i>UTM 0731.2 - 004 ME</i>	Coala
						57
Mod.	Coala	Nr. doc.	Semnătura	Data		

Analysis. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2012. 645 p.

15. KUEMMERLE, T.; HOSTERT, P.; RADELOFF, V.C. et al. Cross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians. In: Ecosystems. 2008, vol. 11, nr. 4, pp. 614–628.
16. CĂTĂRĂU, N.; ŞLEPAC, V.; VLASENCO, A. Creating an interactive GIS-based map for the Technical University of Moldova campus using QGIS and web technologies. In: ConsGeoCad, prima ediție, 2024: Simpozion științific cu participare națională și internațională, 21–23 noiembrie 2024. pp. 201–206. ISBN 978-9975-64-529-4 (Vol. I). Disponibil: https://consgeocad.utm.md/wp-content/uploads/2025/03/Conferinta-CGC_Vol_1.pdf
17. SPĂTARU, M.; VLASENCO, A.; NISTOR-LOPATENCO, L.; GRAMA, V. Updating the Statistical Register of Housing in the Republic of Moldova using open-source GIS technologies. In: Journal of Engineering Science (TUM). 2022, vol. XXIX, nr. 2, pp. 123–132. ISSN 2587-3474. Disponibil: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29\(2\).12](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29(2).12)
18. VLASENCO, A.; CHIRIAC, V. Cartografie matematică. Curs universitar. Chișinău: U.T.M., 2012. 256 p. ISBN 978-9975-45-206-9.
19. Republica Moldova. Codul Funciar nr. 828 din 25.12.1991. In: Monitorul Oficial al Republicii Moldova.
20. Republica Moldova. Legea cadastrului bunurilor imobile nr. 1543 din 25.02.1998. In: Monitorul Oficial al Republicii Moldova. 1998, nr. 44–46/318.
21. Republica Moldova. Legea privind fondul forestier nr. 887 din 21.06.1996. In: Monitorul Oficial al Republicii Moldova. 1997, nr. 4–5/36.
22. Republica Moldova. Legea geodeziei și cartografiei nr. 778 din 27.12.2001. In: Monitorul Oficial al Republicii Moldova. 2002, nr. 28–29/114.
23. ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: NASA SP-351, Third ERTS Symposium. Washington D.C.: NASA, 1973, vol. 1, pp. 309–317.
24. McFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: International Journal of Remote Sensing. 1996, vol. 17, nr. 7, pp. 1425–1432.
25. ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. In: International Journal of Remote Sensing. 2003, vol. 24, nr. 3, pp. 583–594.
26. XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. In: International Journal of Remote Sensing. 2006, vol. 27, nr. 14, pp. 3025–3033.

					<i>UTM 0731.2 - 004 ME</i>	<i>Coala</i>
<i>Mod.</i>	<i>Coala</i>	<i>Nr. doc.</i>	<i>Semnătura</i>	<i>Data</i>		58

27. HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. In: Remote Sensing of Environment. 2002, vol. 83, nr. 1–2, pp. 195–213.
28. RIKIMARU, A.; ROY, P.S.; MIYATAKE, S. Tropical forest cover density mapping. In: Tropical Ecology. 2002, vol. 43, nr. 1, pp. 39–47.
29. COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. In: Educational and Psychological Measurement. 1960, vol. 20, nr. 1, pp. 37–46.
30. PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. In: Journal of Machine Learning Research. 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.
31. VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T.E. et al. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. In: Nature Methods. 2020, vol. 17, pp. 261–272.
32. QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System [software]. Open Source Geospatial Foundation. Disponibil: <https://qgis.org>
33. AGAFONKIN, V. Leaflet: a JavaScript library for interactive maps [software]. 2024. Disponibil: <https://leafletjs.com>
34. AGENȚIA GEODEZIE CARTOGRAFIE ȘI CADASTRU A REPUBLICII MOLDOVA. Portalul geospațial național geodata.gov.md. Chișinău: ARFC. Disponibil: <https://geodata.gov.md>
35. ZANAGA, D.; VAN DE KERCHOVE, R.; DAEMS, D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. In: Zenodo. 2022. Disponibil: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>
36. PESARESI, M.; CORBANE, C.; JULEA, A.; FLORCZYK, A.J.; SYRRIS, V.; SOILLE, P. Assessment of the added-value of Sentinel-2 for detecting built-up areas. In: Remote Sensing. 2016, vol. 8, nr. 4, p. 299. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/rs8040299>
37. OUESLATI, W.; ALVANIDES, S.; GARROD, G. Determinants of urban sprawl in European cities. In: Urban Studies. 2015, vol. 52, nr. 9, pp. 1594–1614. Disponibil: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4540171/>
38. SETO, K.C.; FRAGKIAS, M.; GÜNERALP, B.; REILLY, M.K. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. In: PLoS ONE. 2011, vol. 6, nr. 8, e23777. Disponibil: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>