

Use of Remote Sensing and GIS to Diagnose and Assess the Current Situation of *Acacia Raddiana* Stands / Case of the Maider BV (Morocco)

Otman TAMRI¹, Saïd CHAKIRI², Allal LABRIKI³, Mohammed Amine ZERDEB⁴

^{1,2,4} Department of Geology, College of Geosciences, University of Ibn Tofail, Kenitra, Morocco
otman.tamri5@gmail.com, chakiri@uit.ac.ma, zerdeb.amine1@gmail.com

³ Department of Geology, College of Geosciences and Applications, University of Sciences Ben M'Sik, Casablanca, Morocco
labriki.allal@gmail.com

Abstract: The Maider region in southeastern Morocco is a hyper-arid zone where annual rainfall rarely exceeds 120 mm. Its sparse natural vegetation is dominated by *Acacia raddiana*, a keystone species vital for local ecological stability. This study aims to assess the current status and spatial dynamics of *Acacia* stands using high-resolution Landsat 9 imagery and GIS tools, to inform conservation strategies against ongoing degradation.

Results reveal that *Acacia* covers approximately 370,287 hectares, representing 31% of the lower Maider basin. Sparse annual vegetation, mainly xerophytic *Chenopodiaceae*, is located along the slopes of the Saghro and Ougnate ranges, whereas much of the terrain is bare soil. Commune-level analysis highlights significant qualitative vegetation decline in the southeastern basin, confirmed by high-resolution imagery. However, long-term NDVI GIMMS/AVHRR data were limited in detecting these localized changes due to their coarse spatial resolution and sensitivity to ephemeral vegetation.

This study's originality lies in the integration of recent Landsat 9 data with a 25-year NDVI time series to monitor the dynamics of *Acacia raddiana* in a degraded arid environment. The combined use of density-based vegetation classification and spatial analysis at the administrative level offers novel insights into vegetation loss and contributes to practical land restoration planning.

Keywords: *Acacia Raddiana*, GIS, Landsat Images, Maider Basin, Remote sensing

1 Introduction

Acacia raddiana populations still persist in the Maider sub-basin of southeastern Morocco, despite intense anthropogenic pressure and recurrent droughts over the last decades (Benabid 2000). These trees are found either in scattered patches or with relatively stable canopy cover, depending on local conditions. Their resilience to both human-induced stress and

harsh climatic variability makes *Acacia raddiana* an essential species for the preservation of arid and pre-Saharan ecosystems (Boudhar et al. 2004, Le Houérou 2006). The ecological importance of this species is also increasingly acknowledged in the context of climate change adaptation and sustainable land management in North African drylands (FAO 2015, Benchekroun et al. 2019).

This study was conducted in partnership with the DDZO (Oasis Zones Development Department) as part of

Uporaba daljinskog istraživanja i GIS-a za dijagnosticiranje i ocjenu trenutnog stanja sastojina vrste *Acacia raddiana*: Slučaj sliva Maider (Maroko)

Otman TAMRI¹, Saïd CHAKIRI², Allal LABRIKI³, Mohammed Amine ZERDEB⁴

^{1,2,4} Odsjek za geologiju, Fakultet geoznanosti, Sveučilište Ibn Tofaïl, Kenitra, Maroko
otman.tamri5@gmail.com, chakiri@uit.ac.ma, zerdeb.amine1@gmail.com

³ Odsjek za geologiju, Fakultet geoznanosti i primjena, Sveučilište znanosti Ben M'Sik, Casablanca, Maroko
labriki.allal@gmail.com

Sažetak: Regija Maider na jugoistoku Maroka je hiperaridna zona u kojoj godišnje oborine rijetko premašuju 120 mm. Njezinom rijetkom prirodnom vegetacijom dominira *Acacia raddiana*, ključna vrsta od vitalnog značaja za lokalnu ekološku stabilnost. Cilj ovog istraživanja je procjena trenutnog stanja i prostorne dinamike sastojina akacije upotrebom visokorezolucijskih snimaka Landsat 9 i GIS-a, kako bi se informirale strategije zaštite od daljnje degradacije. Rezultati pokazuju da akacija prekriva približno 370 287 hektara, što je 31% donjega dijela sliva Maider. Rijetka jednogodišnja vegetacija, uglavnom kserofitne Chenopodiaceae, nalazi se uzduž padina planinskih lanaca Saghro i Oug-nate, dok je većina terena gola zemlja. Analiza na razini općina ističe značajan kvalitativni pad vegetacije u jugoistočnom dijelu sliva, što potvrđuju visokorezolucijske snimke. Međutim, dugoročni NDVI podaci iz serije GIM-MS/AVHRR bili su ograničeni u detekciji lokaliziranih promjena zbog grube prostorne rezolucije i osjetljivosti na pri-vremenu vegetaciju.

Originalnost ovog istraživanja leži u integraciji najnovijih podataka Landsat 9 s 25-godišnjim vremenskim nizom NDVI-ja za praćenje dinamike *Acacia raddiana* u degradiranom suhom okruženju. Kombinirana primjena klasifikacije vegetacije temeljena na gustoći i prostornoj analizi na administrativnoj razini pruža nove uvide u gubitak vegetacije i doprinosi praktičnom planiranju obnove zemljišta.

Ključne riječi: *Acacia raddiana*, GIS, Landsat snimke, sliv Maider, daljinsko istraživanje

1. Uvod

Populacije *Acacia raddiana* i dalje postoje u podslivu Maider na jugoistoku Maroka unatoč intenzivnom antropogenom pritisku i učestalim sušama tijekom posljednjih desetljeća (Benabid 2000). Stabla se nalaze ili u raspršenim manjim područjima ili s relativno stabilnim pokrovom krošnje, ovisno o lokalnim uvjetima. Njihova otpornost na intervencije ljudi i oštru klimatsku varijabilnost čini

Acacia raddiana ključnom vrstom za očuvanje suhih i predsaharskih ekosustava (Boudhar et al. 2004, Le Hou-ouérou 2006). Ekološki značaj te vrste sve se više prepoznaje u kontekstu prilagodbe na klimatske promjene i održivog upravljanja zemljištem u sušnim područjima Sjeverne Afrike (FAO 2015, Benchekroun et al. 2019).

Ovo istraživanje provedeno je u suradnji s DDZO-om (Odjel za razvoj oaznih zona) u sklopu projekta PACC-ZO (Prilagodba klimatskim promjenama u oaznim zonama).

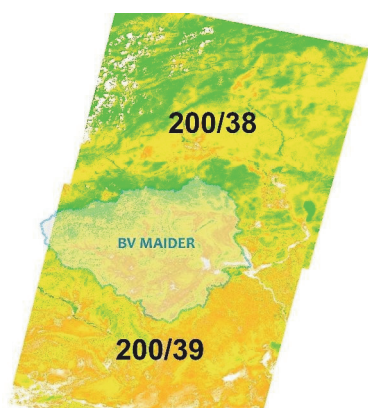


Fig. 2 Catchment area in LandSat 9 scenes.

Slika 12. Slivno područje unutar scena Landsata 9.

the PACC-ZO project (Adaptation to Climate Change in Oasis Zones). Its main objective is to map the current spatial distribution of *Acacia raddiana* in the Maider basin and analyze its dynamics using recent Landsat 9 OLI/TIRS C2 Level-1 imagery. In addition to mapping vegetation density (categorized into high, medium, and low), we conducted a spatial breakdown of *Acacia* coverage per commune to support land-use planning.

The classification of vegetation cover was carried out using a supervised maximum likelihood algorithm, selected for its simplicity and effectiveness in semi-arid environments (Jensen 2007). While this method performed well in distinguishing vegetation types, future work could benefit from testing machine learning classifiers such as Random Forests or Support Vector Machines (SVM), which have shown higher accuracy in similar arid land studies (Pelletier et al. 2016, Belgiu and Drăguț 2016).

To complement recent satellite observations and validate spatial trends, a 25-year NDVI time series from GIMMS/AVHRR was analyzed. Although limited by spatial resolution, this dataset helped establish long-term vegetation dynamics in the basin.

The originality of this work lies in its integration of multi-temporal and multi-resolution satellite data for assessing vegetation in a highly degraded environment. The final objective is to provide decision-makers with up-to-date thematic maps and indicators that can guide restoration efforts and prioritize conservation zones.

Despite prior studies on dryland vegetation, little has been done specifically on *Acacia raddiana* in the

Moroccan pre-Sahara (Moukrim et al. 2012, El Afia et al. 2020). This research addresses that gap by providing detailed spatial insights and proposing an adaptable monitoring framework for arid zone ecosystems.

2 Data Used and Working Methodology

2.1 Choice of satellite imagery

To map the vegetation cover of the study area and analyze its dynamics, we used Landsat 9 OLI/TIRS C2 Level-1 satellite imagery, which provides a spatial resolution of 30 m (with a panchromatic band at 15 m). The satellite captures wavelengths from the visible to the thermal infrared, with each spectral band having specific characteristics suited for land cover analysis (Lillesand et al. 2015).

Two Landsat scenes cover nearly the entire study area. These are identified by orbit (path) and row numbers: Path 200, Rows 38 and 39. 1:100,000 scale topographic maps and the administrative map of the region were used to perform geometric correction and extract the area of interest (Maider watershed, Fig. 1).

2.2 Landsat scenes used and pre-processing

The Landsat 9 scenes used in this study were carefully selected based on ecological and phenological considerations. The April 2024 scene was chosen because it corresponds to the peak vegetative development phase of *Acacia raddiana*, a perennial species whose activity strongly depends on seasonal rainfall. In the Maider basin's hyper-arid climate, this phase typically occurs between February and April, when moisture availability supports maximum leaf development and photosynthetic activity (Le Houérou 2006, Boudhar et al. 2004). This period provides optimal conditions for distinguishing perennial woody vegetation such as *Acacia raddiana* from ephemeral herbaceous cover (Féret et al. 2012).

Selecting imagery during this window enhances classification accuracy by minimizing spectral confusion between permanent vegetation and short-lived annual species that rapidly emerge and wither after precipitation (Abdelmoumen et al. 2018). Therefore, the April acquisition allowed for a more reliable mapping of *Acacia* stands based on their phenological distinctiveness and spatial persistence.

The preprocessing steps included:

- Creating a composite image from the nine spectral bands
- Georeferencing the image to UTM projection
- Extracting the region of interest (ROI) based on administrative and physical boundaries (Fig. 2).

Glavni cilj bio je kartirati trenutačnu prostornu distribuciju Acacie raddiane u slivu Maider i analizirati njezinu dinamiku upotrebom najnovijih snimaka Landsat 9 OLI/TIRS C2 Level-1. Uz kartiranje gustoće vegetacije (kategorizirane kao visoka, srednja i niska), provedena je prostorna analiza pokrova akacije po općinama radi podrške prostornom planiranju.

Klasifikacija vegetacijskog pokrova provedena je nadziranom metodom maksimalne vjerojatnosti, odabranom zbog jednostavnosti i učinkovitosti u polusušnim područjima (Jensen 2007). Iako je ta metoda dobro razlikovala tipove vegetacije, buduća istraživanja mogla bi imati koristi od testiranja strojnog učenja, poput Random Forest ili Support Vector Machines (SVM), koje su pokazale veću točnost u sličnim proučavanjima suhih područja (Pelletier et al. 2016, Belgiu i Drăguț 2016).

Kako bi se dopunila najnovija satelitska opažanja i potvrdili prostorni trendovi, analiziran je 25-godišnji vremenski niz NDVI-ja iz baze podataka GIMMS/AVHRR. Iako ograničen prostornom rezolucijom, taj skup podataka pomogao je uspostaviti dugoročne dinamike vegetacije u slivu.

Originalnost ovog rada leži u integraciji višetemperalnih i višerezolucijskih satelitskih podataka za procjenu vegetacije u izrazito degradiranom okolišu. Krajnji je cilj bio pružiti donositeljima odluka aktualne tematske karte i pokazatelje koji mogu usmjeriti napore obnove i odrediti prioritete zona zaštite.

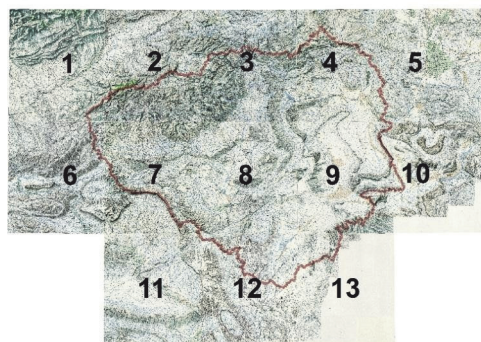
Unatoč prethodnim istraživanjima o vegetaciji suhih područja, malo je istraživanja usmjereno specifično na Acaciu raddianu u marokanskom pedsaharskom području (Moukrim et al. 2012, El Afia et al. 2020). Ovo istraživanje popunjava tu prazninu detaljnim prostornim uvidima i predlaže prilagodljiv okvir za praćenje ekosustava aridnih zona.

2. Korišteni podaci i radna metodologija

2.1. Odabir satelitskih snimaka

Za kartiranje vegetacijskog pokrova istraživanog područja i analizu njegove dinamike korištene su satelitske snimke Landsat 9 OLI/TIRS C2 Level-1, koje nude prostornu rezoluciju od 30 m (s pankromatskim pojašom od 15 m). Satelit bilježi valne duljine od vidljivog do toplinskog infracrvenog spektra, pri čemu svaki spektralni pojas ima specifične karakteristike prikladne za analizu pokrova zemljišta (Lillesand et al. 2015).

Dvije scene Landsata pokrivaju gotovo cijelo istraživano područje. One su identificirane prema orbiti (putanji) i redovima: putanja 200, redovi 38 i 39. Topografske karte mjerila 1:100 000 i administrativna karta regije korištene su za geometrijsku korekciju i izdvajanje područja interesa (sliv Maidera, slika 1).



Slika 1. Mozaik topografskih karata mjerila 1:100 000 za sliv Maider
Sjeverozapadni vrh: X = 430000 m, Y = 480000 m
Sjeveroistočni vrh: X = 580000 m, Y = 480000 m
Jugoistočni vrh: X = 580000 m, Y = 380000 m
Jugozapadni vrh: X = 430000 m, Y = 380000 m.

Fig. 1 Mosaic of 1/100K topographic maps of BV Maider
Northwest corner: X = 430 000 m, Y = 480 000 m
Northeast corner: X = 580 000 m, Y = 480 000 m
Southeast corner: X = 580 000 m, Y = 380 000 m
Southwest corner: X = 430 000 m, Y = 380 000 m.

2.2. Korištene scene Landsata i predobrada podataka

Scene Landsata 9 korištene u ovom istraživanju pažljivo su odabrane na temelju ekoloških i fenoloških kriterija. Snimka iz travnja 2024. odabrana je jer odgovara vrhuncu vegetativnog razvoja vrste Acacia raddiana, višegodišnje biljke čija je aktivnost snažno uvjetovana sezonskim oborinama. U hiperaridnoj klimi sliva Maider, ta se faza obično javlja između veljače i travnja, kada dostupna vlaga omogućuje maksimalan razvoj lišća i fotosintetsku aktivnost (Le Houérou 2006, Boudhar et al. 2004). To razdoblje pruža optimalne uvjete za razlikovanje višegodišnje drvenaste vegetacije poput Acacia raddiana od kratkotrajne zeljaste vegetacije (Féret et al. 2012).

Odabir snimki unutar tog vremenskog okvira poboljšava točnost klasifikacije minimiziranjem spektralne zabune između trajne vegetacije i kratkotrajnog godišnjeg bilja koje brzo niče i vene nakon oborina (Abdelmoumen et al. 2018). Stoga je snimanje u travnju omogućilo pouzdanije kartiranje sastojina akacije na temelju njihovih fenoloških osobitosti i prostorne postojanosti.

Koraci predobrade uključivali su:

- Stvaranje kompozitne slike iz devet spektralnih kanala
- Georeferenciranje slike u UTM projekciju
- Izdvajanje područja interesa (ROI) na temelju administrativnih i fizičkih granica (slika 2).



Fig. 3 Layout of study communities in the Maider BV. Source: Oasis Zones Development Department.

Slika 3. Položaj istraživanih zajednica u slivu Maider. Izvor: Odeljenje za razvoj oaza.

2.3 Methods for analyzing and classifying land use and vegetation

Land cover analysis at the watershed level was conducted using a 2024 Landsat 9 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 scene. The selected image exhibited minimal cloud cover at the time of acquisition, and its spectral quality was adequate for vegetation analysis in arid environments. Although Level-1 data are not fully atmospherically corrected, their geometric and radiometric consistency makes them suitable for land cover classification, particularly when working with cloud-free scenes in low-humidity regions like southeastern Morocco (USGS 2021). Pixel classification was carried out in several stages:

1. Grouping spectral bands into a composite image
2. Extracting the Region of Interest (ROI)
3. Analyzing variance and correlation between spectral bands to select the most discriminative features (He et al. 2014)
4. Performing a supervised classification using the Maximum Likelihood Classification (MLC) method (Jensen 2007)
5. Evaluating classification accuracy through confusion matrices and the Kappa index.

The MLC method was chosen for its reliability in areas with low vegetation diversity and limited ground reference data, such as arid regions. Although advanced machine

learning algorithms like Random Forest, Support Vector Machines (SVM), or XGBoost can offer better performance in some cases, the MLC approach yielded satisfactory results in our tests. It also offered practical advantages in terms of computational efficiency and interpretability. Future work may explore these advanced classifiers to further improve mapping accuracy and generalizability.

2.4 Evaluation of occupancy by administrative unit

Given the nature of the area essentially occupied by acacia, it is important to evaluate the acreage of acacia according to the three levels of density (good, medium and low) and to translate this evolution in terms of acreage occupied by intervention zone in relation to the administrative division (territorial communes). The size of the areas in the various communes will enable us to identify the priority zones for intervention in the development of acacia products (Awad and Elhadi 2019, Taghbalt and El Atfi 2021).

To enable a better comparison of results, we have chosen to present the results (maps and importance) for 7 territorial communities that dominate the area of interest, based on the study's terms of reference, in addition to the rural commune of Aït Boudaoud, which is of particular interest for the study of acacia in the area: Msissi, Alnif, Sidi Ali, Taghbalt, Tazarine, Nkob, Aït Ouallal, Aït Boudaoud (Fig. 3).

2.3. Metode analize i klasifikacije korištenja zemljišta i vegetacije

Analiza pokrova zemljišta na razini sliva provedena je korištenjem snimke Landsat 9 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 iz 2024. godine. Odabrana snimka imala je minimalnu naoblaku u trenutku snimanja, a njezina spektralna kvaliteta bila je primjerena za analizu vegetacije u aridnim područjima. Iako podaci razine 1 nisu u potpunosti atmosferski korigirani, njihova geometrijska i radiometrijska konzistentnost činila ih je pogodnima za klasifikaciju pokrova zemljišta, osobito kada se radi o snimkama bez oblaka u područjima niske vlažnosti, poput jugoistočnog Maroka (USGS 2021). Klasifikacija piksela provedena je u nekoliko faza:

1. Grupiranje spektralnih kanala u kompozitnu sliku
2. Izdvajanje područja interesa (ROI)
3. Analiza varijance i korelacije između spektralnih kanala radi odabira najdiskriminantnijih značajki (He et al. 2014)
4. Provođenje nadzirane klasifikacije metodom maksimalne vjerojatnosti (Maximum Likelihood Classification – MLC, Jensen 2007)
5. Evaluacija točnosti klasifikacije putem matrice zabune (confusion matrix) i Kappa indeksa.

Metoda maksimalne vjerojatnosti (MLC) odabrana je zbog svoje pouzdanosti u područjima s niskom raznolikošću vegetacije i ograničenim referentnim podacima s terena, kao što su aridne regije. Iako napredni algoritmi strojnog učenja poput Random Forest, Support Vector Machines (SVM) ili XGBoost u nekim slučajevima mogu pružiti bolje performanse, pristup MLC dao je zadovoljavajuće rezultate u našim testovima. Također nudi praktične prednosti u smislu računalne učinkovitosti i interpretabilnosti. Buduća istraživanja mogla bi istražiti napredne klasifikatore kako bi se dodatno poboljšala točnost kartiranja i opća primjenjivost.

2.4. Procjena zauzetosti površine prema upravnim jedinicama

S obzirom na prirodu područja koje je uglavnom prekriveno akacijom, važno je procijeniti površinu zauzetu akacijom prema trima razinama gustoće (dobra, srednja i niska) te prikazati taj razvoj u smislu površina zauzetih po zonama intervencije u odnosu na upravnu podjelu (teritorijalne općine). Veličina područja u različitim općinama omogućit će nam identifikiranje prioritarnih zona za intervenciju u razvoju akacijinih proizvoda (Awad i Elhadi 2019, Taghbalt i El Atfi 2021).

Kako bismo omogućili bolju usporedbu rezultata, odlučili smo prikazati rezultate (karte i važnost) za sedam teritorijalnih zajednica koje dominiraju područjem interesa, temeljem uvjeta istraživanja, uz dodatak ruralne

općine Ait Boudaoud, koja je od posebnog interesa za proučavanje akacije na tom području: Msissi, Alnif, Sidi Ali, Taghbalt, Tazarine, Nkob, Ait Ouallal i Ait Boudaoud.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Analiza korištenja zemljišta

Svaka klasa dodijeljena je određenoj vrsti vegetacije na temelju terenskih podataka GPS-a. Terenska istraživanja pomoću GPS-a provedena su za prikupljanje točaka provjere na terenu, koje su zatim preklapljene na klasificiranu sliku Landsata radi verifikacije i identificirane na temelju spektralnih signatura i terenskih opažanja. Područja koja su pogrešno klasificirana identificirana su usporedbom rezultata klasifikacije s neovisnim točkama provjere prikupljenim tijekom terenske kampanje u travnju 2024. Te točke nisu korištene za obuku modela. Na temelju matrice zabune (confusion matrix), pogrešno klasificirana područja su ispravljena ažuriranjem skupa podataka za obuku i ponovnim izvođenjem klasifikacije kako bi se poboljšala ukupna točnost i koeficijent Kappa.

Rezultati su pokazali da *Acacia raddiana* ima tri razine gustoće i vitalnosti ovisno o nadmorskoj visini i nagibu terena. *Acacia* je gušća i vitalnija prema zapadu i nizinskim područjima, dok je rjeđa i slabije vitalna na većim nadmorskim visinama i grebenima. Tri razine gustoće koje su razlikovane su: gusta, srednje gusta i rijetka. Ostali identificirani likovi su šume, šuma i tamne stijene, izbočine stijena te degradirane gole površine tla.

Rezultati pokazuju da *Acacia* (različitih gustoća) u 2024. zauzima oko 370 287 hektara sliva, dok gole površine tla i kserofilne *Chenopodiaceae* ili degradirana tla zauzimaju oko 532 828 hektara, odnosno 45% ukupne površine (slika 4).

Analiza površina zauzeća svake klase omogućila nam je kvantificiranje površine akacije prema trima razinama gustoće. Rezultati pokazuju da akacija zauzima ukupnu površinu od 301 600 ha, što je oko 34,7 % ukupne površine osam lokalnih samouprava uključenih u istraživanje. Akacija srednje gustoće čini 44 % površine akacije u zoni, dok ostatak uglavnom zauzimaju gole površine i stijenske izbočine. Tablica 1 prikazuje detaljne rezultate uporabe zemljišta po općinama.

3.2. Sinteza analize na razini općina

Na razini općina, raspodjela i gustoća staništa *Acacie raddiane* značajno varira unutar sliva Maider, pod utjecajem topografije, mikroklimе i dinamike degradacije zemljišta.

Sjeverne i središnje općine, poput Msissija, Tazarinea i Alnifa, pokazuju relativno velike površine prekrivene akacijom. Općina Msissi obuhvaća 94 588 hektara, od čega je gotovo polovica klasificirana kao akacija

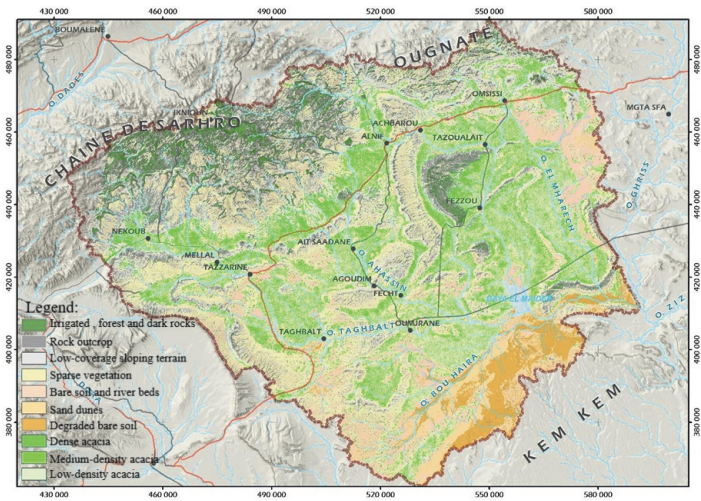


Fig. 4 Land use map of the Maider BV.
Slika 4. Karta uporabe zemljišta sliva Maider.

the classification results with independent ground truth points collected during the April 2024 field campaign. These validation points were not used for training. Based on the confusion matrix, misclassified areas were corrected by updating the training dataset and re-running the classification to improve overall accuracy and Kappa coefficient. The results showed that *Acacia raddiana* presents three levels of density/vigor depending on altitude and slope. *Acacia* is denser and more vigorous towards the west and the lowlands, while it is less vigorous and dense at higher altitudes and on ridges. The three levels of density distinguished are: dense, medium-dense and low-density *Acacia raddiana*. Other facies identified include forests, forest and dark rocks, rock outcrops, and degraded bare soils.

The results show that in 2024, *Acacia* (various densities) occupies 370,287 ha of the watershed, while bare soil and xerophilous *Chenopodiaceae* or degraded soils cover around 532,828 ha, or 45% of the total area surface (Fig. 4).

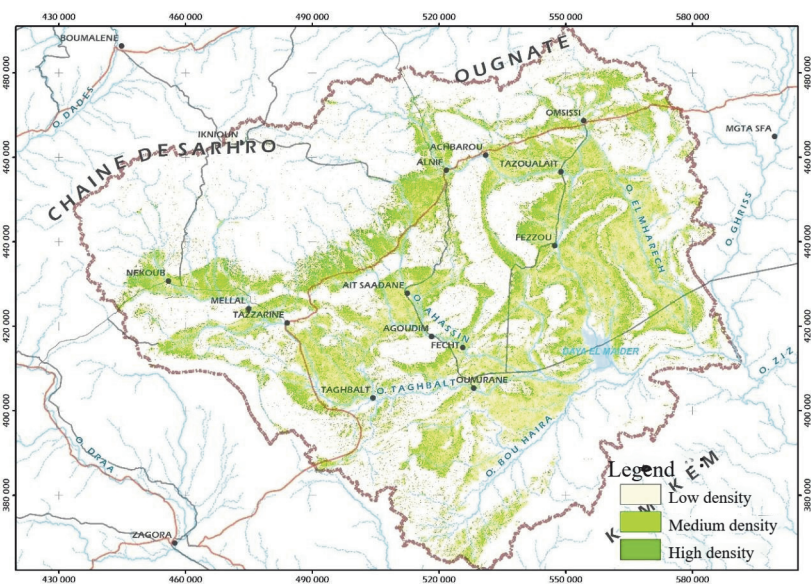


Fig. 5 Extent of *Acacia* in the Maider BV.
Slika 5. Prostor pod akacijom u slivu Maider.

3 Results and Discussion

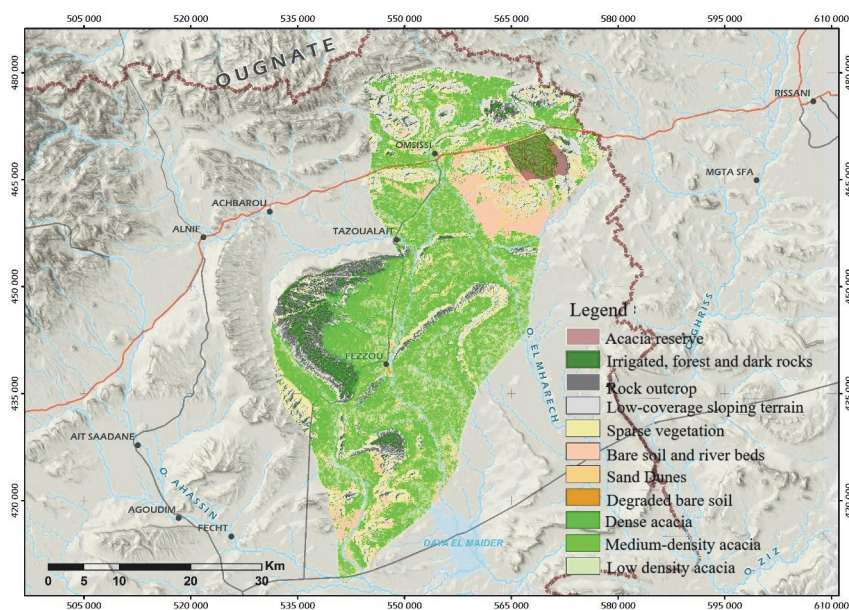
3.1 Land use analysis

Each class was assigned to a vegetation type on the basis of GPS field data. GPS field surveys were conducted to collect ground truth points, which were overlaid on the classified Landsat image for verification, were identified based on spectral signatures and field observations. Misclassified areas were identified by comparing

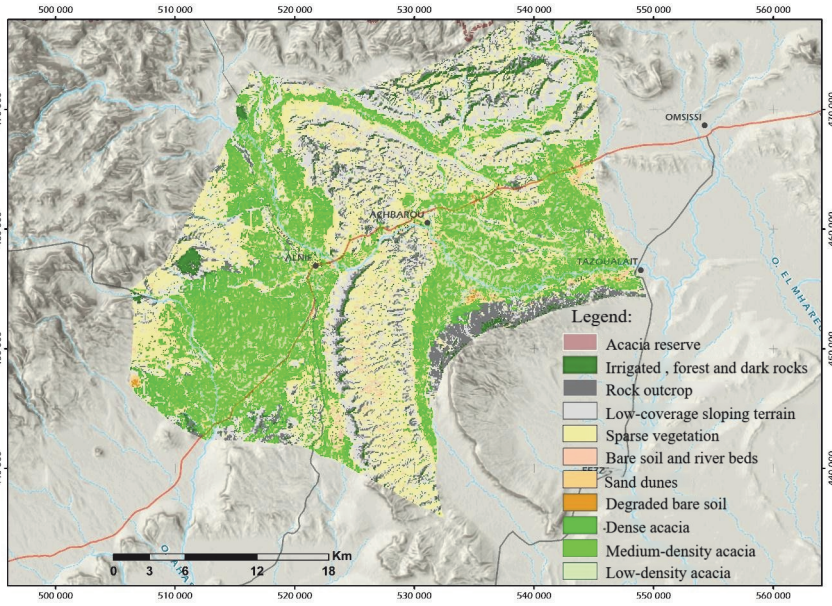
Analysis of the area occupied by each class enabled us to quantify the *Acacia* area according to the three density levels. The results show that *Acacia* occupies a total area of 301,600 ha, around 34.7% of the total area of the 8 local authorities involved in the study. Medium-density *Acacia* accounts for 44% of the *Acacia* area in the zone, while the remainder is mainly occupied by bare land and rocky outcrops (Fig. 5). Table 1 groups the detailed land use results by commune.

Tablica 1. Uporaba zemljišta po općinama.
Table 1 Importance of land uses by municipality.

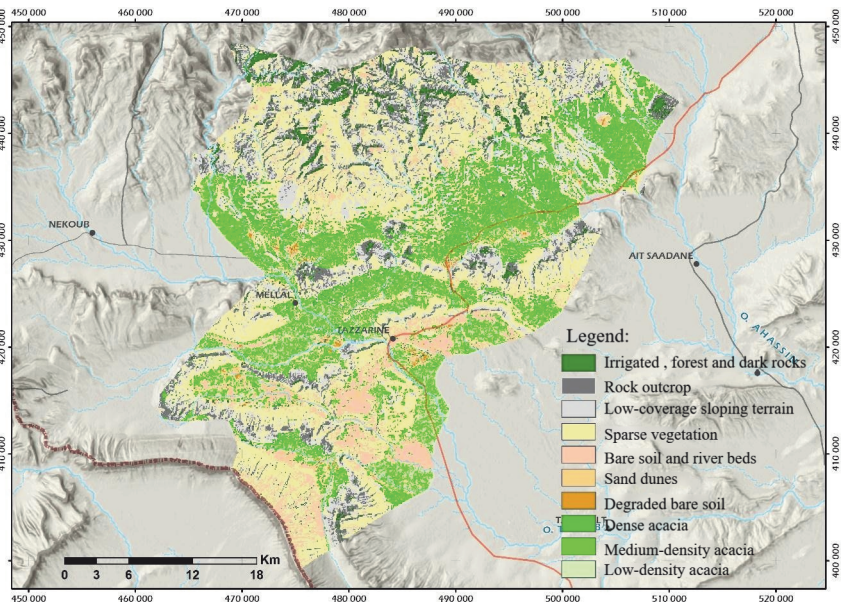
Zauzeće / Occupation	Ait Ouallal / Ait Ouallal	Nkob / Nkob	Taghbalt / Taghbalt	Tazarin / Tazarine	Sidi Ali / Sidi Ali	Alnif / Alnif	Msissi / Msissi	A. Boudaoud / A. Boudaoud	Ukupno / Total
Dense Acacia	5.594,33	1.197,41	6.078,77	16.337,02	11.897,21	13.198,16	20.745,04	4.013,07	79.061,022
Medium Acacia	7.559,45	1.797,97	7.669,65	15.847,41	31.117,93	17.822,88	43.438,93	7.475,88	132.730,09
Density									
Low Acacia	2.414,05	956,30	4.354,76	5.878,34	33.077,13	7.614,18	30.404,22	5.110,64	89.809,63
Density									
Ukupna Acacia / Total Acacia	15.567,84	3.951,68	18.103,19	38.062,77	76.092,27	38.635,22	94.588,18	16.599,59	301.600,74
Irrigated, forest and dark r.	3.647,71	8.475,08	206,35	3.843,70	1.199,63	2.775,72	5.481,18	323,20	25.952,56
Rock outcrop	11.349,16	12.805,43	1.424,47	11.729,32	5.636,49	9.117,79	13.144,17	1.538,37	66.745,20
Low-coverage sloping terrain	16.036,75	9.402,53	5.524,07	23.788,49	9.056,40	23.036,32	21.753,12	3.715,01	112.312,70
Sparse vegetation	16.246,79	7.124,57	22.684,27	40.808,91	23.968,22	26.506,52	20.106,77	14.136,70	171.582,77
Bare soil and river beds	1.838,65	1.076,12	13.451,84	11.485,25	41.972,30	3.104,84	15.715,76	4.942,75	93.587,507
Sand dunes	83,57	26,63	3.044,93	1.167,83	38.873,38	352,79	1.238,09	745,52	45.532,73
Degraded bare soil	44,38	7,40	680,43	380,15	49.377,91	123,51	124,99	133,13	50.871,92
Ukupno / Total	64.814,85	42.869,43	65.119,56	131.266,43	246.176,60	103.652,72	172.152,25	42.134,27	868.186,12



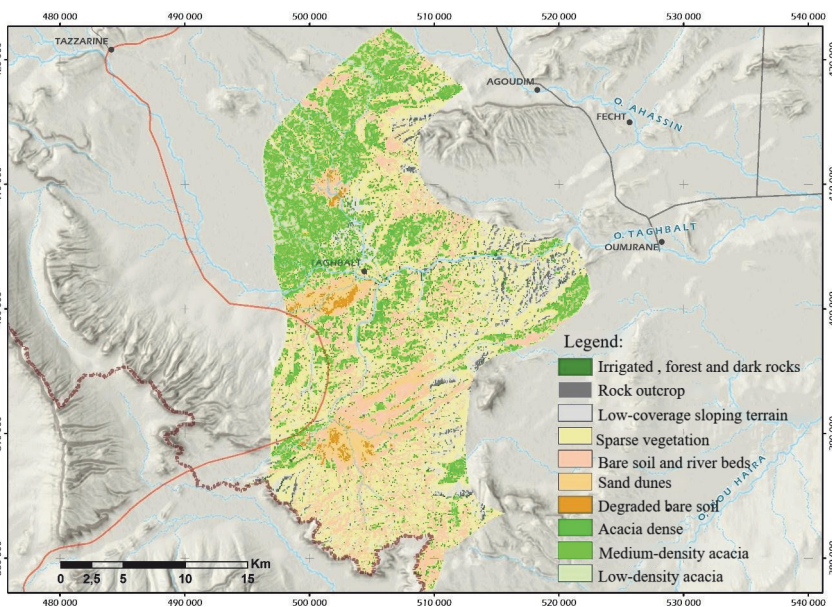
Slika 6. Karta uporabe zemljišta općine Msissi.
Fig. 6 Land use map of the Msissi commune.



Slika 8. Karta uporabe zemljišta općine Alnif.
Fig. 8 Land use map of the commune of Alnif.



Slika 9. Karta uporabe zemljišta općine Tazarine.
Fig. 9 Land use map of the Tazarine commune.



Slika 10. Karta uporabe zemljišta općine Taghbalt.
Fig. 10 Land use map of the Taghbalt commune.

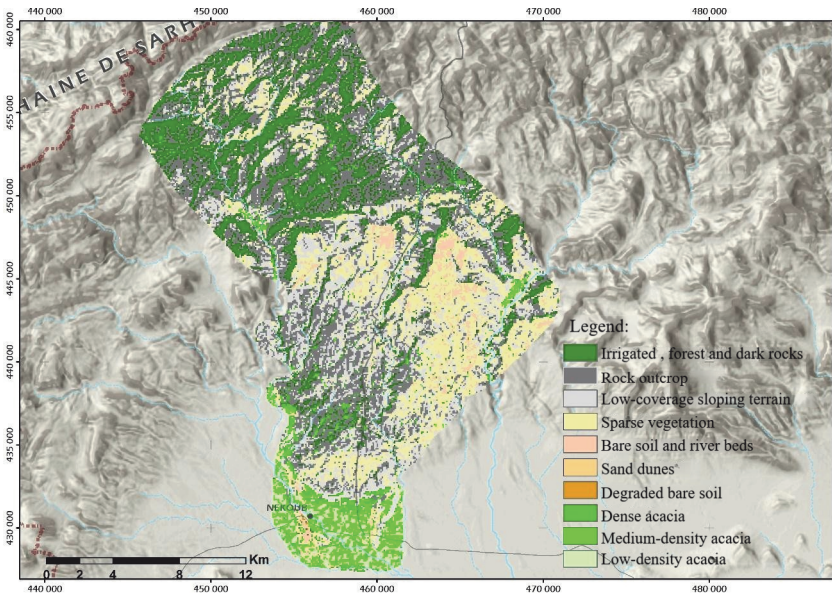


Fig. 11 Land use map of the Nkob commune.
Slika 11. Karta uporabe zemljišta općine Nkob.

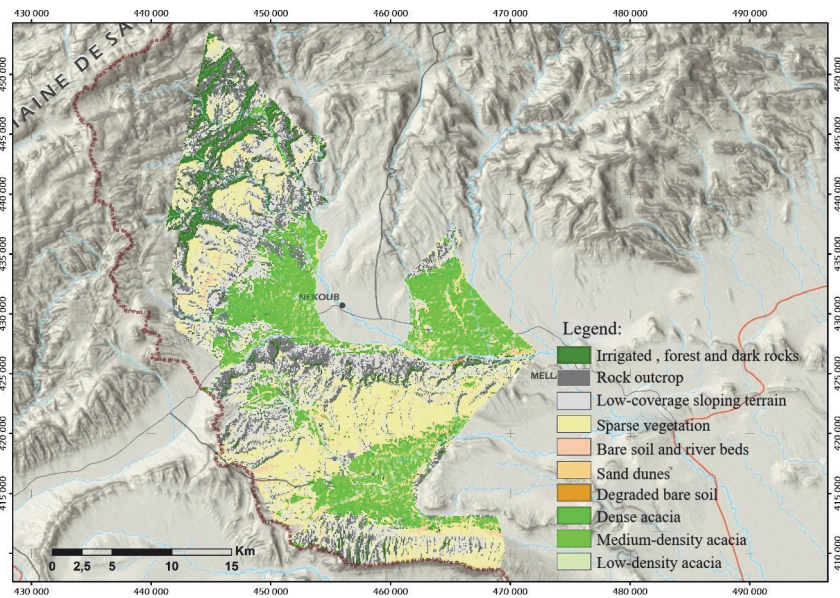


Fig. 12 Land use map of the Aït Ouallal commune.
Slika 12. Karta uporabe zemljišta općine Aït Ouallal.

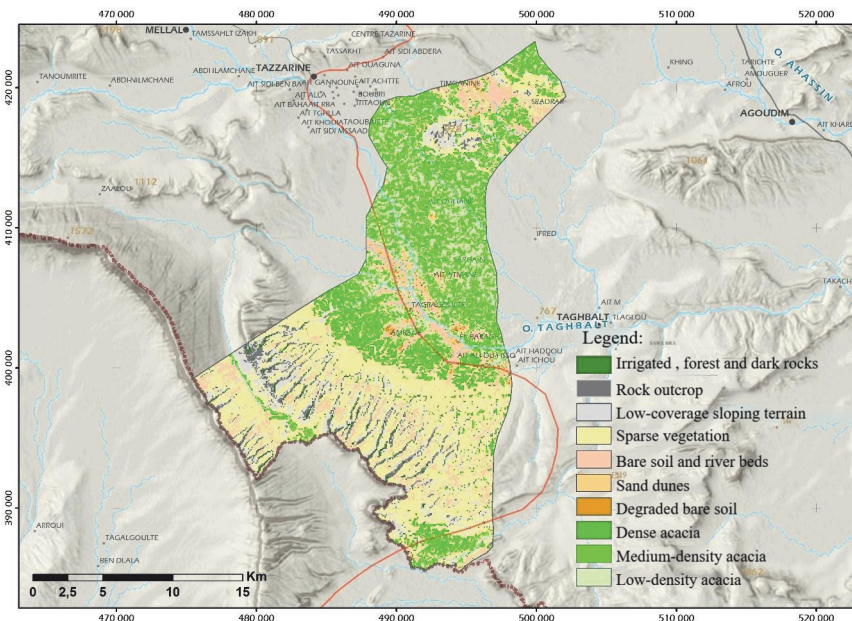
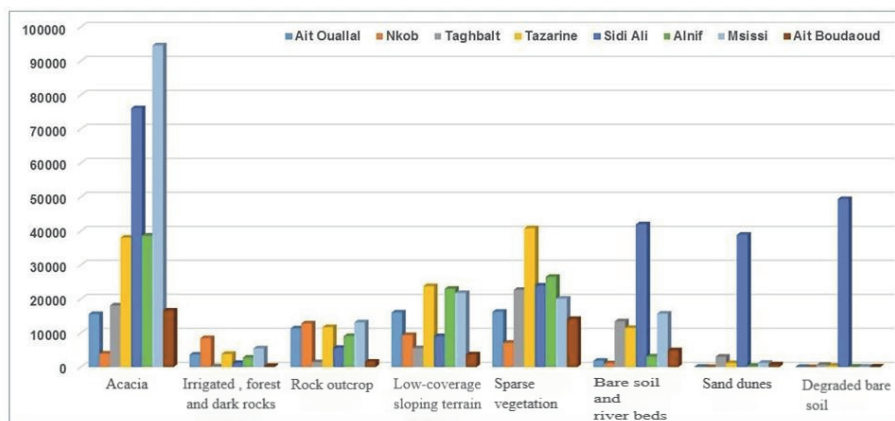
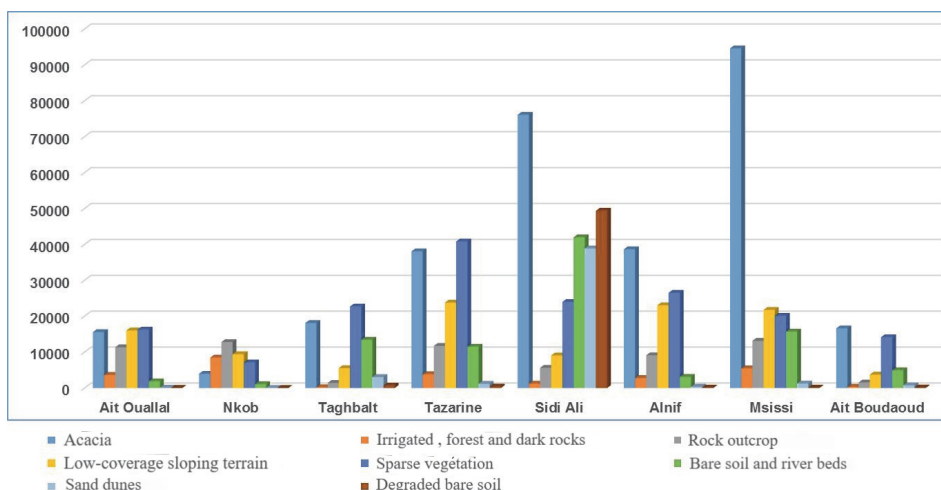


Fig. 13 Land use map of the Aït Boudaoud commune.
Slika 13. Karta uporabe zemljišta općine Aït Boudaoud.



Slika 14. Raspodjela površina po općinama.
 Fig. 14 Distribution of surface area by commune.



Slika 15. Raspodjela površina prema tipu uporabe zemljišta.
 Fig. 15 Breakdown of surface area by type of occupation.

srednje gustoće. Tazarine slijedi s više od 38 000 hektara akacije, uključujući i najveći udio visokog stupnja gustoće (43 %), što odražava postupno poboljšanje uvjeta vegetacije prema zapadu. Alnif, smješten na južnim padinama planinskog lanca Ougnate, također pokazuje znatnu prisutnost akacije (oko 38 600 ha), koncentriranu u dolinskim dionicama i uz rubove uvala.

Suprotno tome, južne i jugoistočne općine, posebice Sidi Ali, Nkob i Ait Ouallal, karakterizirane su izraženijom degradacijom okoliša. Sidi Ali, iako još uvijek ima značajnih 76 092 hektara akacije (31 % svoje površine), pati od opsežnog zasipavanja, mineralizacije tla i prodora dina, osobito u južnim dijelovima. Nkob, planinska općina, ima samo 3951 hektar akacije (9,2 % površine), uglavnom nizvodno od

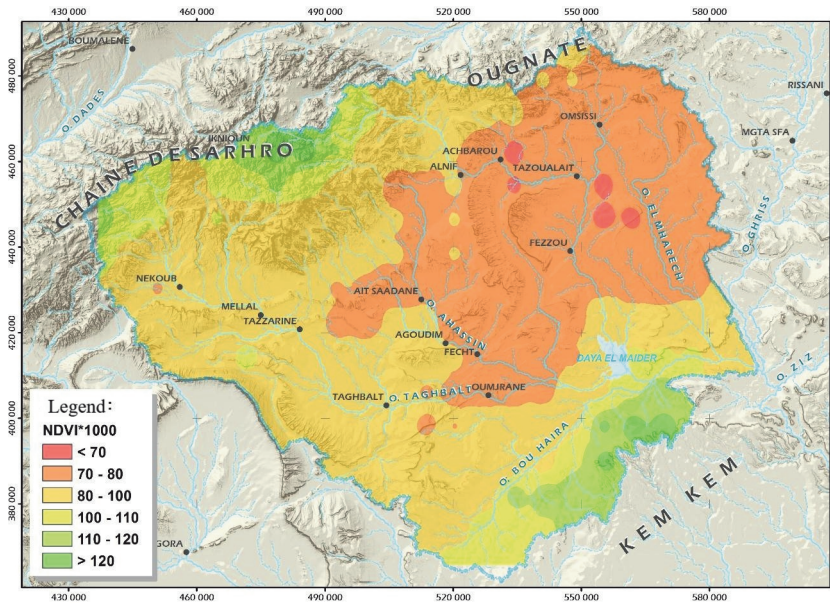


Fig. 16 Average NDVI map of Maider BV.
Slika 16. Karta prosječnih NDVI vrijednosti sliva Maider.

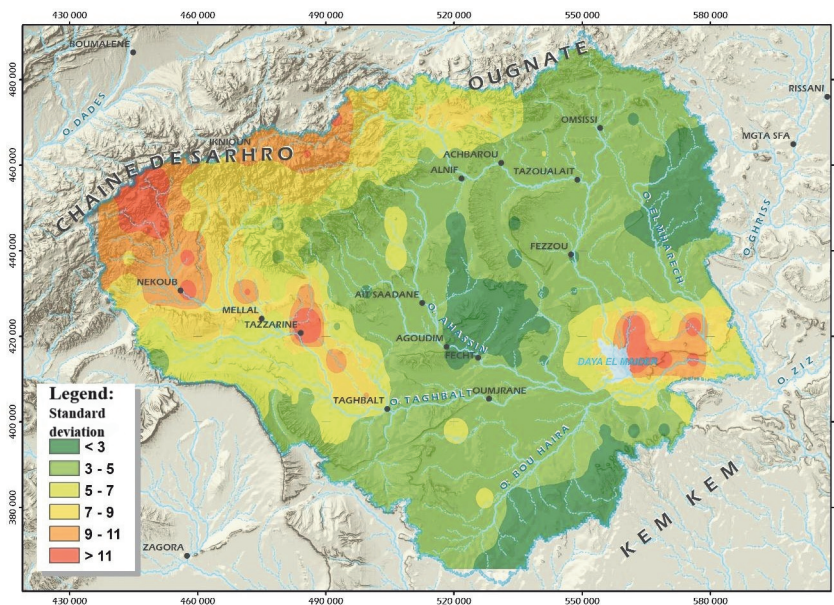


Fig. 17 NDVI standard deviation map of Maider BV.
Slika 17. Karta standardne devijacije NDVI-ja za sliv Maider (BV).

spatial resolution, present, in addition to their free availability, the longest spatialized NDVI data series available for global environmental monitoring (July 1981 to December 2015) (Tucker et al. 2005, Nicholson et al. 1990, Fensholt et al. 2004).

In this work, we used these data to monitor and study spatio-temporal NDVI variations in the Maider watershed by analyzing NDVI variations over several years. Maps of mean NDVI values per crop year were extracted from 15-day raw data (GIMMS/AVHRR SVM) to obtain 25 layers of

planinskog lanca Saghro. Aït Ouallal, najzapadnija općina, pokazuje sličnu rijetku pokrivenost (15 567 ha), s akacijskim staništima koja su uglavnom fragmentirana i niske gustoće.

Općine doline Taghbalt, osobito Taghbalt i Aït Boudaoud, ističu se najgušćim i najvigornijim akacijskim formacijama u regiji. Taghbalt je posebno zapažen visokom gustoćom pokrivenosti uzduž rijeke Oued Taghbalt, koja zauzima 27 % površine (više od 18 100 ha), dok Aït Boudaoud, premda najmanja općina, ima najveći relativni udio akacije od 40 % (16 600 ha), što ukazuje na povoljne lokalne uvjete.

Ova analiza ističe gradijent degradacije vegetacije, koji se pojačava prema jugoistoku, gdje su antropogeni pritisci i procesi desertifikacije najizraženiji. Prostorni obrasci izvedeni klasifikacijom pružaju ključne informacije za određivanje prioriteta intervencija na obnovi i ciljanje najugroženijih područja (slike 6-13).

Grafikoni (slike 14-15) sažimaju raspodjelu različitih oblika uporabe zemljišta u različitim općinama, kako je prikazano rezultatima našeg istraživanja.

3.3. Dinamika vegetacije Prostorno-vremenska analiza NDVI serije

NDVI GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) proizvodi dobiveni senzorom AVHRR (A Very High Resolution Radiometer), unatoč njihovoj niskoj prostornoj razlučivosti, predstavljaju – osim što su besplatno dostupni – najdužu prostorno strukturiranu seriju podataka NDVI-ja za globalni monitoring okoliša (od srpnja 1981. do prosinca 2015.) (Tucker et al. 2005, Nicholson et al. 1990, Fensholt et al. 2004).

U ovom istraživanju korišteni su ti podaci za praćenje i proučavanje prostorno-vremenskih varijacija indeksa NDVI na području sliva Maider, analizom promjena vrijednosti NDVI-ja tijekom više godina. Karte srednjih vrijednosti NDVI-ja po poljoprivrednoj godini izrađene su iz sirovih polumjesečnih podataka (GIMMS/AVHRR SVM), kako bi se dobilo 25 slojeva godišnjih podataka NDVI-ja za razdoblje od 1990. do 2015. godine.

Ti su slojevi poslužili za izračunavanje prostorno strukturiranih statističkih parametara: srednje vrijednosti, standardne devijacije, koeficijenta varijacije te minimalnih i maksimalnih vrijednosti tijekom 25 godina. Karta raspodjele srednjih vrijednosti za to razdoblje pokazuje da navodnjavana područja uz rijeke imaju najviše NDVI vrijednosti, što je posljedica stalne prisutnosti vegetacijskog pokrova tijekom cijele godine i kvalitete njegove biomase. NDVI vrijednosti su uvijek iznad 0,3.

Planinska područja (masiv Saghro) čine prijelaznu zonu po kvaliteti vegetacije, između navodnjavanih

područja i siromašno vegetiranih područja, koja se uglavnom nalaze na južnim i jugoistočnim visoravnima.

Prosječna NDVI vrijednost (pomnožena s 1000) za područje iznosi 87,81, uz standardnu devijaciju od 13,86 (prostornih varijacija), što daje prosječni koeficijent varijacije od 14,94 % (vidi sliku 16).

Analiza godišnje varijabilnosti NDVI-ja tijekom 25 poljoprivrednih sezona pokazuje, na temelju karata koeficijenta varijacije i standardne devijacije za sliv Maider (slika 17), da su područja s niskim relativnim varijacijama NDVI-ja uglavnom smještena u dolinskim zonama središnjeg dijela sliva. Te zone karakteriziraju niski koeficijenti varijacije (< 20%), što je uglavnom rezultat prisutnosti rijetke prirodne vegetacije slabije gustoće, osobito Acacie raddiane, čija je aktivnost relativno stabilna i slabo ovisna o klimatskim oscilacijama.

Nasuprot tome, planinska područja lanca Saghro i navodnjavane površine pokazuju značajne međugodišnje varijacije NDVI-ja, što se može objasniti visokom osjetljivošću tih područja na kvalitetu godišnje vegetacije i dostupnost vode. U tim zonama NDVI snažno varira ovisno o količini i raspodjeli oborina tijekom vegetacijske sezone te o uvjetima navodnjavanja, posebno u područjima intenzivne poljoprivredne proizvodnje (Boudhar et al. 2004).

Ova analiza omogućuje bolju identifikaciju ekološki stabilnijih zona nasuprot klimatski osjetljivim područjima, što je ključno za planiranje mjera upravljanja zemljištem i vegetacijom u kontekstu desertifikacije i klimatskih promjena.

Ekstremne minimalne i maksimalne NDVI vrijednosti pokazuju da oba parametra imaju isti prostorni raspored kao i srednja vrijednost. Koeficijenti korelacije piksel-piksel između sloja koji se odnosi na srednju NDVI vrijednost za 25 vegetacijskih sezona i maksimalnih i minimalnih vrijednosti su reda veličine 0,96 odnosno 0,97, što znači da su ekstremne vrijednosti usko povezane s prosječnim stanjem vegetacije te da NDVI prilično dobro zaдржава svoju prostornu strukturu tijekom vremena (vegetacijske sezone) u odnosu na stanje okoliša i klimatske uvjete.

Za bolju vizualizaciju trenutne kvalitete vegetacije u slivu Maider korišteni su podaci senzora MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) za 2024. godinu, dostupni za cijelu Afriku s prostornom rezolucijom od 250 m. Ti podaci su normalizirani za cijelu Afriku na skali od 1 do 10 000, što omogućuje bolje razlikovanje kvalitete vegetacije na kontinentalnoj razini (Didan i dr. 2015). Rezultati za sliv Maider pokazuju da se područja s najnižim NDVI vrijednostima nalaze u središnjem istočnom dijelu sliva, na odjeljku Oumjrane-Rissani, s NDVI vrijednostima ispod 900. Područja s najboljom kvalitetom vegetacije nalaze se u planinskim zonama (planinski lanac Saghro), u navodnjavanim nizinskim područjima i uz riječne obale.

annual NDVI data from 1990 to 2015. These 25 layers were used to calculate the spatialized statistical parameters: mean, standard deviation, coefficient of variation and minimum and maximum values for the 25 years. The map of the distribution of the mean value over the 25-year period shows that the irrigated areas bordering the zone's rivers have the highest values, due to the perennality of the vegetation cover throughout the year and the quality of its biomass. NDVI values are always above 0.3.

Mountain areas (Saghro chain) constitute intermediate zones in terms of vegetation quality between irrigated areas and areas with low vegetation cover located mainly on the southern and southeastern plateaus. The mean NDVI (value*1000) for the area is 87.81 with a standard deviation of 13.86 (spatial variability), giving a mean coefficient of variation of 14.94% (Fig. 16).

Analysis of the annual variability of NDVI for the 25 cropping seasons shows, by means of the coefficient of variation and standard deviation maps for the Maider BV (Fig. 17), that the areas characterized by low relative variations in NDVI are located mainly in the valley zones in the center of the BV. These zones are characterized by low coefficients of variation of less than 20%, which is essentially due to the dominance of sparse and low-density natural vegetation, mainly *Acacia raddiana*, with low dependence on climatic conditions.

Mountain areas in the Saghro chain and irrigated areas seem to have the greatest variations in NDVI from one year to the next, which can be explained by the quality of annual vegetation or irrigated agriculture in mountain and basin areas, highly conditioned by the quality of rainfall received during the crop year and the availability of water (Boudhar et al. 2004).

The extreme minimum and maximum NDVI values show that both parameters have the same spatial distribution as the mean. The pixel-to-pixel correlation coefficients between the layer relating to the mean NDVI of the 25 cropping seasons and the maximum and minimum values are of the order of 0.96 and 0.97 respectively, implying that the extreme values are closely linked to the mean state of the vegetation and that the NDVI retains its spatial structure fairly well over time (cropping season) in relation to the state of the environment and climatic conditions.

To better visualize current vegetation quality in the Maider BV, we used MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor data for the year 2024, available for the whole of Africa at 250 m spatial resolution. These data are normalized for the whole of Africa on a scale of 1 to 10,000, enabling vegetation quality to be better distinguished on a continental scale (Didan et al. 2015). The

results for the Maider BV show that the areas with the lowest NDVI values are located in the central-eastern part of the watershed on the Oumjrane-Rissani section, with NDVI values below 900. The areas with the best vegetation quality are located in mountainous zones (Saghro mountain range), in irrigated lowland areas and along riverbanks. This confirms the results obtained with GIMMS data but with better nuance at spatial level (Fig. 18).

4 Conclusion

The Maider region in southeastern Morocco represents a fragile arid ecosystem, where *Acacia raddiana* plays a key ecological role. Using recent Landsat 9 imagery and a 25-year NDVI time series, this study provides an updated assessment of *Acacia* cover and its spatial dynamics under increasing climatic and anthropogenic pressure.

Our results show that *Acacia raddiana* still covers approximately 370,287 hectares (31% of the basin), but with signs of qualitative degradation. In many areas, dense formations have transitioned into sparse and scattered stands, particularly in the southern part of the basin. This degradation follows a north-south gradient, with denser, more resilient stands now found in the northern communes of Nkob and Ait Ouallal. In contrast, areas with limited human activity, such as Taghbalt and southern Tazarine, show greater resilience, suggesting that anthropogenic pressure plays a more significant role than previously assumed.

Compared to earlier studies that focused mainly on vegetation indices or lower-resolution imagery (Tucker et al. 2005, Fensholt et al. 2004), our approach combines high-resolution Landsat 9 data with local-scale analysis at the commune level. This allowed us to detect finer-scale degradation patterns and better distinguish between vegetation types. Furthermore, the use of supervised classification based on density levels, rather than binary vegetation/non-vegetation thresholds, provides a more nuanced understanding of ecosystem condition an approach rarely applied in previous assessments of *Acacia*-dominated arid regions.

While long-term NDVI trends confirm a high sensitivity of vegetation to rainfall variability, the spatial resolution of legacy datasets such as GIMMS/AVHRR has limited their ability to detect localized shifts. Our integration of recent and historical data helps overcome this limitation and offers a replicable framework for vegetation monitoring in other dryland contexts.

Without the implementation of adaptive land-use strategies and ecological restoration, *Acacia* woodlands

in the Maider basin face a growing risk of functional collapse. The maps and indicators generated by this study can support local decision-makers in prioritizing conservation zones, planning restoration interventions, and anticipating future changes in land cover due to climate stress.

For cartography and geoinformatics, these new directions, the European Degree Label, can open new opportunities, in inter- and multidisciplinary university programmes, to provide students with the right knowledge for a wide range of courses. But we must be prepared for that.

References / Literatura

- Abdelmoumen S, Boudhar A, Hanich L, Ezaidi A (2018) Upotreba daljinskog istraživanja i GIS-a za praćenje degradacije zemljišta u suhim zonama: slučaj bazena Ouarzazate (Maroko). *Journal of Geography and Geology*, 10(1), 1–13.
- Awad M. A., Elhadi E. A. (2019) Prostorna distribucija i kartiranje vrsta Acacia koristeći tehnike daljinskog istraživanja. *Journal of Arid Environments*, 163, 25–35.
- Benabid A. (2000) Flora i ekosustavi Maroka, procjena i očuvanje bioraznolikosti. Ibis Press, Pariz, 359 str.
- Benchekroun F., Chikhi H., El Mourid M. (2019) Održivo upravljanje zemljištem u sušnim područjima Magreba: izazovi, ograničenja i perspektive. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7(1), 37–45.
- Belgiu M., Dragut L. (2016) Random Forest u daljinskom istraživanju: pregled primjena i budućih smjerova. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31.
- Boudhar A., Amri M., Mhouz A. (2004) Istraživanje vegetacije u jugoistočnom Maroku: slučaj sastojina Acacia raddiana. *Revue des sciences de l'environnement*, 45(2), 65–74.
- Didan K., Huete A. R., Glenn E. P. (2015) MOD13Q1 verzija 6.1 Terra Vegetation Indices 16 Day L3 Global 250 m SIN Grid. NASA LP DAAC.
- El Afia A., Bensalmia A., El Harti A., i dr. (2020) Karakterizacija drvenaste vegetacije u suhom okolišu: slučaj bazena Maïder (jugoistočni Maroko). *Revue Internationale de Géomatique*, 30(1), 67–86.
- FAO (2015) Globalne smjernice za obnovu degradiranih šuma i krajolika u suhim područjima: izgradnja otpornosti i koristi za životne uvjete. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rim.
- Fensholt R., Sandholt I., Rasmussen K. (2004) Praćenje dinamike vegetacije u Sahelu: potencijal NDVI i indeksa vegetacijskog pokrova za okolišno praćenje. *Geophysical Research Letters*, 31(11).
- Féret J. B., Asner G. P. (2012) Polunadzirane metode za identifikaciju pojedinačnih krošnji nizinskih tropskih vrsta korištenjem spektralne snimke i lidara. *Remote Sensing*, 4(8), 2457–2476.
- He Y., Gui H., Yang G. (2014) Optimalan odabir spektralnih pojaseva za klasifikaciju usjeva korištenjem hiperspektralnih podataka daljinskog istraživanja. *Remote Sensing*, 6(7), 6211–6231.
- Jensen J. R. (2007) Uvod u digitalnu obradu slika: perspektiva daljinskog istraživanja, 3. izdanje. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 526 str.
- Le Houérou H. N. (2006) Uloga vrsta Acacia u očuvanju suhih i polusušnih ekosustava u Africi i Bliskom Istoku. FAO, Rim.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. (2015) Daljinsko istraživanje i interpretacija slika, 7. izdanje. Wiley, Hoboken, New Jersey, 736 str.
- Moukrim A., Dakki M., Fekhaoui M., i dr. (2012) Floristička raznolikost i stanje degradacije stepe Acacia raddiana u jugoistočnom Maroku. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 2(3), 20–28.
- Nicholson S. E., Davenport M. L., Malo A. R. (1990) Usporedba odgovora vegetacije na oborine u Sahelu i Istočnoj Africi korištenjem indeksa normalizirane razlike vegetacije iz NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17(2), 209–241.
- Pelletier C., Valero S., Inglada J., Champion N., Dedieu G. (2016) Procjena otpornosti Random Forest algoritma za mapiranje pokrova tla pomoću vremenskih nizova satelitskih slika visoke rezolucije na velikim područjima. *Remote Sensing of Environment*, 187, 156–168.
- Taghbalt A., El Atfi A. (2021) Praćenje vegetacije u bazenu Maider: utjecaj suhoće i klimatskih varijacija. *Revue de géographie et de climatologie appliquée*, 30(2), 110–118.
- Tucker C. J., Pinzon J. E. (2005) Dugoročni zapis NDVI-a izveden iz AVHRR podataka za praćenje globalne dinamike vegetacije. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 287–300.
- USGS (U.S. Geological Survey) (2021) Korisnički priručnik za Landsat 9 (L9) podatke, verzija 1.0. U.S. Geological Survey, Sioux Falls, South Dakota, 174 str.