

TEHNICI DE TELEDETECȚIE PENTRU MONITORIZAREA ZONELOR URBANE ȘI PERIURBANE FOLOSIND DATE SATELITARE OPTICE ȘI RADAR

Conducători științifici:

Prof. univ. dr. ing. Constantin Moldoveanu

Prof. univ. dr. Iuliana Armaș

=REZUMAT=

Student doctorand:
Ing. Mihaela Gheorghe

Cuprinsul rezumatului

Introducere.....	1
<u>1 STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE RADAR ȘI ELECTRO-OPTICE</u>	5
1.1. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR	5
1.1.1 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE	5
1.1.2 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR	6
1.1.3 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN UTILIZÂND FUZIUNI DE DATE ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR	6
1.1.4 STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR LA NIVEL NAȚIONAL	7
1.2. MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR	7
1.2.1. STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN LA NIVEL INTERNAȚIONAL	7
1.2.2. STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN UTILIZÂND IMAGINI RADAR LA NIVEL NAȚIONAL	8
<u>2. PLATFORME SATELITARE</u>	10
2.1. PLATFORME SATELITARE CU SENZORI PASIVI	10
2.2. PLATFORME SATELITARE CU SENZORI DE PRELUARE ACTIV	12
<u>3. PREZENTAREA ZONEI DE STUDIU</u>	14
<u>4. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE ELECTRO-OPTICE</u>	15
4.1. STUDIU DE CAZ: DETECTAREA SCHIMBĂRILOR LA NIVELUL ORAȘULUI BUCUREȘTI UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE ELECTRO-OPTICE	15
4.1.1. SETURI DE DATE UTILIZATE	15
4.1.2. CLASIFICAREA ACOPERIRII TERENURILOR	15
4.1.3. ANALIZA IMAGINILOR DIFERENȚĂ OBTINUTE PENTRU DETECTAREA SCHIMBĂRILOR	19
<u>5. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR</u>	22
5.1. STUDIU DE CAZ: CLASIFICAREA IMAGINILOR SENTINEL-1A PENTRU ZONA DE STUDIU BUCUREȘTI	22
5.1.1. CLASIFICAREA IMAGINILOR SENTINEL-1A GRD ȘI SLC	23
5.1.2. VALIDAREA REZULTATELOR CLASIFICĂRILOR	24
<u>6. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND FUZIUNI DE DATE ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR</u>	25
6.1. STUDIU DE CAZ: FUZIUNI DE DATE PENTRU CLASIFICAREA IMAGINILOR RADAR ȘI ELECTRO-OPTICE	25

6.1.1.PRELUCRAREA IMAGINILOR ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR ÎN VEDEREA FUZIONĂRII	25
6.1.2.VALIDAREA CLASIFICĂRII IMAGINII OBȚINUTE PRIN FUZIUNI DE DATE	26
7. UTILIZAREA METODELOR INTERFEROMETRICE PENTRU MONITORIZAREA DEPLASĂRIILOR	27
7.1. STUDIU DE CAZ: ÎNTOCMIREA HĂRȚILOR DE DEFORMAȚII ÎN ORAȘUL BUCUREȘTI	27
7.1.2.ETAPELE PRELUCRĂRII PRIN TEHNICA ȚINTELOR PERSISTENTE (PS)	27
7.1.3.PRELUCRAREA DATELOR CONFORM TEHNICII SBAS	28
7.2.3.PREZENTAREA REZULTATELOR ÎN URMA PRELUCRĂRIILOR PS ȘI SBAS PENTRU ORAȘUL BUCUREȘTI	29
8. ANALIZA TENDINTELOR DE DEPLASARE A SUPRAFETEI TERESTRE ÎN BUCUREȘTI	34
8.1. ANALIZA ZONELOR MLĂȘTINOASE	34
8.2. ANALIZA PARCURILOR INDUSTRIALE	35
8.3. ANALIZA MIȘCĂRIILOR CLĂDIRILOR UTILIZÂND REZULTATE PS DIN DATE TSX	39
8.4. ANALIZA SERIILOR CRONOLOGICE PENTRU IDENTIFICAREA FENOMENULUI DE SUBSIDENȚĂ CAUZAT DE CONSTRUCȚIA MAGISTRALII M5 DE METROU	44
8.4.1.PREZENTAREA EVENIMENTELOR	44
8.4.2.ANALIZA SUBSIDENȚELOR DE-A LUNGUL TRONSOANELOR DE METROU	45
8.4.3.VALIDAREA DEPLASĂRIILOR DETERMINATE ÎN ZONA STAȚIEI DE METROULUI EROILOR	47
9. CONCLUZII GENERALE ALE CERCETĂRIILOR EFECTUATE, CONTRIBUTII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE VIITOR	49
9.1. CONCLUZII GENERALE	49
9.2. CONTRIBUȚII PERSONALE	51
9.3. PERSPECTIVE PRIVIND APROFUNDAREA ȘI EXTINDEREA CERCETĂRIILOR	52
10. LISTA LUCRĂRIILOR PUBLICATE	53
Bibliografie selectivă	54

Cuprinsul lucrării

Introducere.....	1
<u>1 STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE RADAR ȘI ELECTRO-OPTICE</u>	<u>5</u>
1.1. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR	5
1.1.1 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE	6
1.1.2 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR	10
1.1.3 STADIUL ACTUAL LA NIVEL INTERNAȚIONAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN UTILIZÂND FUZIUNI DE DATE ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR	15
1.1.4 STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN PRIN DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR LA NIVEL NAȚIONAL	18
1.2. MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR	21
1.2.1. STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN LA NIVEL INTERNAȚIONAL	21
1.2.2. CAMPANII DE VALIDARE ALE MĂSURĂTORILOR PSI	25
1.2.3. STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII DEPLASĂRILOR ÎN MEDIUL URBAN UTILIZÂND IMAGINI RADAR LA NIVEL NAȚIONAL	29
<u>2. SCURT ISTORIC AL TELEDETECTIEI</u>	<u>32</u>
2.1. PLATFORME SATELITARE	35
2.1.1.PLATFORME SATELITARE CU SENZORI PASIVI	35
2.1.2.PLATFORME SATELITARE CU SENZORI DE PRELUARE ACTIVI	43
<u>3. PREZENTAREA ZONEI DE STUDIU</u>	<u>51</u>
<u>4. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE ELECTRO-OPTICE</u>	<u>54</u>
4.1. ASPECTE TEORETICE PRIVIND DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE. ELEMENTE DE INTERPRETARE A IMAGINILOR DE TELEDETECTIE	54
4.2. FLUXUL DE LUCRU PENTRU DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI ELECTRO-OPTICE	65
4.2.1.CALIBRAREA ȘI CORECȚIILE RADIOMETRICE	65
4.2.2. CLASIFICĂRI SUPERVIZATE ALE IMAGINILOR ELECTRO-OPTICE	68
4.3. STUDIU DE CAZ: DETECTAREA SCHIMBĂRILOR LA NIVELUL ORAȘULUI BUCUREȘTI UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE ELECTRO-OPTICE	76
4.3.1.SETURI DE DATE UTILIZATE	76
4.3.2.CLASIFICAREA ACOPERIRII TERENURILOR	76
4.3.3. ANALIZA IMAGINILOR DIFERENȚĂ OBTINUTE PENTRU DETECTAREA SCHIMBĂRILOR	84
<u>5. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR</u>	<u>90</u>
5.1. ASPECTE TEORETICE PRIVIND DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR	90
5.1.1.PRINCIPIILE RADARULUI CU ANTENĂ SINTETICĂ	90

5.1.2.	CARACTERISTICILE IMAGINILOR RADAR CU APERTURĂ SINTETICĂ (SAR)	92
5.1.3.	DEPENDENȚA IMAGINILOR DE PROPRIETĂȚILE SUPRAFEȚELOR	96
5.2.	FLUXUL DE LUCRU PENTRU DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI SAR	101
5.2.1.	CALIBRAREA IMAGINILOR SAR	101
5.2.2.	FILTRAREA IMAGINILOR SAR	102
5.2.3.	CORECȚIA GEOMETRICĂ A DATELOR SAR	105
5.2.4.	CLASIFICAREA SUPERVIZATĂ A IMAGINILOR SAR UTILIZÂND ALGORITMUL RANDOM FOREST	106
5.2.5.	CLASIFICAREA IMAGINILOR SAR UTILIZÂND INFORMAȚII POLARIMETRICE: DESCOMPUNEREA IMAGINILOR	108
5.3.	STUDIU DE CAZ: CLASIFICAREA IMAGINILOR SENTINEL-1A PENTRU ZONA DE STUDIU BUCUREȘTI	110
5.3.1.	PREGĂTIREA IMAGINILOR PENTRU PRELUCRARE	111
5.3.2.	CALIBRAREA ȘI FILTRAREA DATELOR	112
5.3.3.	CORECȚIA GEOMETRICĂ A DATELOR SAR	112
5.3.4.	CLASIFICAREA IMAGINILOR SENTINEL-1A GRD ȘI SLC	114
5.3.5.	VALIDAREA REZULTATELOR CLASIFICĂRILOR	117
6.	DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND FUZIUNI DE DATE ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR	119
6.1.	ASPECTE TEORETICE PRIVIND FUZIUNILE DE DATE PENTRU CLASIFICAREA TERENURILOR	119
6.2.	STUDIU DE CAZ: FUZIUNI DE DATE PENTRU CLASIFICAREA IMAGINILOR RADAR ȘI ELECTRO-OPTICE	121
6.2.1.	PRELUCRAREA IMAGINILOR ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR ÎN VEDEREA FUZIONĂRII	121
6.2.2.	VALIDAREA CLASIFICĂRII IMAGINII OBTINUTE PRIN FUZIUNI DE DATE	122
7.	UTILIZAREA METODELOR INTERFEROMETRICE PENTRU MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR	124
7.1.	ASPECTE TEORETICE PRIVIND TEHNICILE DE MONITORIZARE A DEPLASĂRILOR ÎN MEDIILE URBANE ȘI PERIURBANE	124
7.1.1.	PRINCIPIILE INTERFEROMETRIEI CU IMAGINI RADAR	124
7.1.2.	SURSE DE ERORI ÎN FORMAREA INTERFEROGRAMELOR	128
7.1.3.	PRINCIPIILE INTERFEROMETRIEI MULTITEMPORALE	133
7.2.	STUDIU DE CAZ: ÎNTOCMIREA HĂRȚILOR DE DEFORMAȚII ÎN ORAȘUL BUCUREȘTI	142
7.2.1.	PRELUCRAREA PRELIMINARĂ A DATELOR PENTRU APLICAREA TEHNICILOR INTERFEROMETRICE MULTITEMPORALE	143
7.2.2.	ETAPELE PRELUCRĂRII PRIN TEHNICA ȚINTELOR PERSISTENTE (PS)	146
7.2.3.	PRELUCRAREA DATELOR CONFORM TEHNICII SBAS	167
7.2.4.	PREZENTAREA REZULTATELOR ÎN URMA PRELUCRĂRILOR PS ȘI SBAS PENTRU ORAȘUL BUCUREȘTI	178
8.	ANALIZA TENDINTELOR DE DEPLASARE A SUPRAFEȚEI TERESTRE ÎN BUCUREȘTI	183
8.1.	ANALIZA ZONELOR MLĂȘTINOASE	184
8.2.	ANALIZA PARCURILOR INDUSTRIALE	185
8.2.1.	DINAMICĂ NORMALĂ (AȘTEPTATĂ)	187
8.2.2.	TENDINȚĂ DE RIDICARE CONTINUĂ	188
8.2.3.	TENDINȚĂ DE SUBSIDENȚĂ CONTINUĂ CU DINAMICĂ EXCEPȚIONALĂ	189
8.3.	ANALIZA MIȘCĂRILOR CLĂDIRILOR UTILIZÂND REZULTATE PS DIN DATE TSX	192

8.4. ANALIZA SERIILOR CRONOLOGICE PENTRU IDENTIFICAREA FENOMENULUI DE SUBSIDENȚĂ CAUZAT DE CONSTRUCȚIA MAGISTRALUI M5 DE METROU	199
8.4.1. PREZENTAREA EVENIMENTELOR	199
8.4.2. ANALIZA TRONSONULUI EROILOR-ACADEMIA MILITARĂ PENTRU PERIOADA 2011-2017	201
8.4.3. ANALIZA TRONSONULUI ACADEMIA MILITARĂ-DRUMUL TABEREI, PENTRU PERIOADA 2011-2017	201
8.4.4. ANALIZA TRONSONULUI DRUMUL TABEREI-RÂUL DOAMNEI, PENTRU PERIOADA 2011-2017	202
8.4.5. ANALIZA ZONEI BD-EROILOR-BD. EROII SANITARI PENTRU PERIOADA 2011-2017	203
8.4.6. VALIDAREA DEPLASĂRIILOR DETERMINATE ÎN ZONA STAȚIEI DE METROULUI EROILOR	205
 9. CONCLUZII GENERALE ALE CERCETĂRIILOR EFECTUATE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE VIITOR	 208
 9.1. CONCLUZII GENERALE	 208
9.2. CONTRIBUȚII PERSONALE	211
9.3. PERSPECTIVE PRIVIND APROFUNDAREA ȘI EXTINDEREA CERCETĂRIILOR	212
 Bibliografie	 213
Listă de abrevieri	222

Introducere

În ultimele sute de ani, în funcție de regiune, un procent important din populația planetei a trecut printr-un proces de urbanizare, atrăgând o serie de consecințe și efecte dăunătoare asupra mediului înconjurător, cauzate de schimbările survenite în distribuția populației. Procentul de populație care trăiește în mediul urban a crescut de la 5% în 1900 la aproape 50% în prezent, cel mai mare procent de populație urbană regăsindu-se în țările aflate în curs de dezvoltare. Pentru intervalul de timp 1990-2050 se preconizează o dublare a populației urbane, ceea ce reprezintă o rată de creștere de 4 ori mai mare în comparație cu cea din zonele rurale. La mijlocul secolului 21, aproape două treimi din populația lumii va locui în orașe. Potrivit studiilor din 2003 ale Comitetului pentru Cooperare Internațională în Cercetare Națională în Demografie, 90% din populația urbană estimată va proveni din țările aflate în curs de dezvoltare.

Creșterea rapidă a urbanizării mondiale, în special în orașele mari, problemele asociate fenomenului (pierderea de terenuri agricole, insuficiența infrastructurii, extinderea necontrolată a orașelor) și informațiile necesare pentru planificări (întinderea și distribuția terenurilor cu tipuri de utilizare diferită, caracteristicile locuințelor, tendințele de creștere a populației sau disponibilitatea resurselor) nu pot fi analizate fără o legătură sistematică între tehnologii noi de culegere a datelor și observații in-situ. Metodele tradiționale de preluare a datelor demografice, recensăminte și hărți pe bază de eșantioane sunt nepractice și nesatisfăcătoare pentru aplicațiile actuale de management urban. Teledetecția – ca tehnică de observare a suprafeței Pământului de pe platforme aeriene sau satelitare - și Sistemele Informatice Geografice (SIG) pot contribui la rezolvarea acestor probleme prin generarea mai facilă de informații spațiale actualizate.

În comparație cu alte tehnici folosite de experți în teledetecție și geografii, teledetecția zonelor urbane, în special cea satelitară, este mai recentă. În trecut erau utilizați cu precădere senzori aflați pe platforme aeriene, dar în prezent senzorii aflați pe platforme satelitare sunt mai populari, în special datorită îmbunătățirilor tehnice care au permis preluarea de imagini cu rezoluție înaltă de la altitudini mari. Fotografiile aeriene au fost preluate pentru o perioadă lungă de timp, în timp ce teledetecția satelitară s-a dezvoltat după lansarea primului satelit de observare a Pământului, Landsat, în 1972. După 1972, îmbunătățirile tehnice din domeniu au condus la apariția următoarelor generații de sateliți pentru observarea Pământului. Cea de-a doua generație este reprezentată de sateliții Landsat ulteriori, SPOT și ERS, iar a treia generație prezintă sateliți cu rezoluție spațială înaltă, precum IKONOS-2, Quickbird-2, etc. Teledetecția satelitară avantajează în special aplicațiile pe regiuni întinse, care anterior se bazau pe imagini preluate cu senzorii aflați pe platforme aeriene. În ultima perioadă, datorită atingerii unei rezoluții spațiale comparabile cu cea a senzorilor aerieni, teledetecția satelitară a început să fie folosită din ce în ce mai des și în monitorizarea mediului urban. În prezent aceasta este complementară cu teledetecția aeriană.

Cerințele mari de rezoluție provin din compoziția mediului urban, în care intră multe obiecte mici alcătuite din materiale diferite, reprezentate prin pixeli neomogeni în imaginile satelitare de observare a Pământului. Aplicațiile de teledetecție în zonele urbane impun anumite rezoluții geometrice (pentru separarea spațială a obiectelor), rezoluții radiometrice și spectrale (pentru distingerea tematică a obiectelor) și rezoluții temporale (pentru urmărirea schimbărilor, actualizarea bazelor de date, etc.). Scopurile diferite ale aplicațiilor în medii urbane impun de asemenea scări diferite: cel mai mare nivel de detaliu este reprezentat de clădiri individuale și căi de transport, și necesită utilizarea de scări mari (1:1000-1:5000). Aplicațiile care urmăresc întreg orașul necesită nivele medii de detaliu, asigurate de scări de 1:10000. Aplicațiile la cel mai scăzut nivel de detaliu se axează pe observarea regiunilor, aglomerațiilor urbane și a zonelor limitrofe, și nu necesită detalii la scări mai mari de 1:50000.

Chiar dacă senzorii multispectrali răspund multor cerințe ale aplicațiilor de monitorizare a mediului urban, trebuie avută în vedere și componenta tridimensională a orașelor, care, deși substanțială, nu poate fi surprinsă în imaginile satelitare multispectrale.

Obiectivul acestei teze de doctorat este de a explora diferitele modalități puse la dispoziție de senzorii actuali de teledetecție pentru monitorizarea mediilor urbane în timp, și de a adopta metodologii de prelucrare a datelor care conduc la rezultate cu precizie mare necesare în aplicații specifice. Lucrarea propune aplicarea tehnicilor de teledetecție electro-optică și radar pentru monitorizarea zonelor urbane prin metode exhaustive, care oferă posibilitatea de a observa caracteristicile zonelor urmărite din două puncte de vedere:

- *detectarea schimbărilor* - modificarea zonelor urbane și limitrofe din punct de vedere al tipului de acoperire a terenului, care indică ritmul de dezvoltare al orașelor;
- *monitorizarea deplasărilor* - deplasările caracteristice suprafeței terestre și ale clădirilor din mediul urban.

În observarea mediului urban se impune, prin urmare, atât utilizarea senzorilor electro-optici, precum și a celor SAR (Synthetic Aperture Radar). Pe lângă informațiile tematice pe care imaginile multispectrale le pot oferi despre mediile urbane, imaginile SAR exploatează proprietățile dielectrice ale obiectelor în domeniul microundelor. Astfel se pot distinge rețele de comunicații, clădiri individuale și spații verzi prin analiza texturii obiectelor pe acestea sau pe imagini reprezentând fuziuni de date între imagini SAR și imagini multispectrale. De asemenea, în studiile de detectare a schimbărilor, se poate utiliza coerența a două imagini SAR pentru a identifica arealele care au suferit schimbări.

Informațiile 3D despre mediul construit se pot obține prin tehnici interferometrice de exploatare a imaginilor SAR prin care sunt alcătuite modele digitale ale terenului sau ale suprafețelor. În plus interferometria diferențială SAR (DInSAR) permite o monitorizare a dinamicii suprafeței terestre din mediul urban.

Lucrarea este alcătuită din patru mari părți care corespund rapoartelor de cercetare întocmite pentru realizarea studiilor. Prima parte a tezei, care cuprinde capitolele 1, 2 și 3, se referă la *monitorizarea mediilor urbane utilizând imagini satelitare radar și electro-optice*. **Primul capitol, Stadiul actual al monitorizării mediului urban utilizând imagini satelitare electro-optice și radar, oferă o imagine de ansamblu asupra conceptelor de monitorizare a schimbărilor și monitorizare a deplasărilor și prezintă stadiul actual al tehnicilor de teledetecție care utilizează senzori activi și pasivi la nivel internațional și național pentru monitorizarea zonelor construite.** Tot în prima parte a lucrării, în capitolul 2, **Scurt istoric al teledetecției**, sunt prezentate principalele tipuri de platforme satelitare cu senzori pasivi și activi ale căror imagini sunt utilizate în acest studiu. În capitolul 3, **Prezentarea zonei de studiu**, este descrisă zona de studiu pentru toate aplicațiile care au fost efectuate în timpul cercetărilor experimentale, București.

Partea a doua a lucrării tratează *detectarea schimbărilor utilizând imagini satelitare electro-optice și radar* în mediile urbane din punct de vedere al tipurilor de acoperire a terenurilor. Această parte este alcătuită din capitolele 4, 5 și 6.

Atunci când este analizată evoluția orașelor în timp, se observă în special evoluția și răspândirea tipului de acoperire corespunzător construcțiilor. Prin observarea răspândirii acestui tip de acoperire se trag concluzii și se formulează predicții cu privire la gradul de urbanizare al zonei de studiu și rapiditatea dezvoltării. Aceste informații au fost corelate cu date demografice.

Capitolul 4, **Detectarea schimbărilor utilizând imagini satelitare electro-optice**, prezintă aspecte teoretice privind detectarea schimbărilor utilizând imagini electro-optice, metodologia propusă pentru detectarea schimbărilor și studiul de caz privind clasificarea acoperirii terenurilor în zona de studiu, București. Datorită continuității oferite de imaginile electro-optice Landsat și Sentinel pentru București (1984-prezent), a fost posibilă realizarea unei corelații între datele demografice colectate de-a lungul timpului și datele de teledetecție avute la dispoziție. Pentru detectarea schimbărilor utilizând imagini satelitare electro-optice au fost prelucrate imagini preluate de sateliții Landsat 4, Landsat 5 și Landsat 7 începând din anul 1984 până în 2010, și imagini preluate de satelitul Sentinel-2A lansat în anul 2015. Imaginile Landsat au fost clasificate prin trei metode statistice de clasificare supervizată:

metoda verosimilității maxime, utilizarea arborilor decizionali și metoda de utilizare a vectorilor suport. Pentru îndeplinirea obiectivului de a îmbunătăți precizia clasificării mediului urban, a fost evaluată capacitatea imaginilor radar de a separa zona construită de celelalte tipuri de acoperire, precum vegetație, soluri sau apă.

Capitolul 5, ***Detectarea schimbărilor utilizând imagini radar***, respectă aceeași structură precum capitolul 4, prezentând aspecte teoretice cu privire la modalitatea clasificare a imaginilor radar, fluxul de lucru sau metodologia utilizată pentru clasificare și studiul de caz constând în clasificarea imaginilor Sentinel-1A pentru detectarea zonei construite din București și localitățile limitrofe. Imaginile radar utilizate provin de la satelitul Sentinel-1A al Agenției Spațiale Europene. Pentru clasificarea imaginilor radar s-au aplicat două procedee diferite, și anume metoda Random Forest, care a luat în considerare amplitudinea diferită a semnalului corespunzătoare categoriilor de acoperire a terenului și metoda descompunerii imaginii pe baza polarizării duble.

Pentru prelucrarea imaginilor satelitare au fost utilizate programele SNAP (Sentinel Application Platform) oferit de Agenția Spațială Europeană gratuit și Envi 5.2 al companiei Harris Geospatial. Programele utilizate au o funcționalitate extinsă, permițând utilizatorului să aplice prelucrări apriorice precum și o gamă diversificată de tipuri de clasificare atât imaginilor multispectrale cât și celor radar.

Capitolul 6, ***Detectarea schimbărilor utilizând fuziuni de date electro-optice și radar***, vine cu o propunere de fuziune a datelor electro-optice și radar pentru obținerea de precizii mai mari de detectare a schimbărilor prin utilizarea informației provenite din surse multiple. Sunt propuse diferite tipuri de clasificări ale terenurilor atât pentru imaginile electro-optice și radar cât și pentru combinația rezultată din fuziunea acestora. Validarea rezultatelor și evaluarea preciziei acestora este efectuată la finalul fiecărui capitol.

Rezultatele prelucrărilor obținute în cadrul acestui studiu ajută la alcătuirea unei baze de date extinse care conține o evoluție în timp a dezvoltării orașului începând din 1984 până în 2017. Precizia rezultatelor obținute din imagini multispectrale pentru detectarea schimbărilor este îmbunătățită prin utilizarea de informații adiționale, precum caracteristici geometrice și dielectrice provenite din imaginile radar. Evoluția zonei construite până în 2013 este corelată cu datele demografice pentru a trage concluzii cu privire la impactul planificării urbane asupra fluctuației populației

A patra parte a tezei, alcătuită din capitolele 7 și 8, descrie procedeele aplicate pentru *monitorizarea dinamicii scoarței terestre din mediul urban și analiza rezultatelor obținute*.

Capitolul 7, ***Utilizarea metodelor interferometrice pentru monitorizarea deplasărilor***, prezintă aspecte teoretice privind monitorizarea deplasărilor, principiile interferometriei radar și studiul de caz pentru întocmirea hărților de deformare a suprafeței la nivelul orașului București. Acest capitol se *bazează* în întregime pe tehnica de interferometrie satelitară radar aplicată prin diferite metode pentru a detecta deplasările suferite în timp de suprafața terestră la nivelul Bucureștiului. Sunt aplicate metode de interferometrie diferențială multitemporală pentru prelucrarea imaginilor SAR, iar rezultatele sunt utilizate pentru diferite analize menite să exploreze aspecte cu privire la dinamica suprafeței terestre în București. Monitorizarea 3D aduce informații în plus despre zona de studiu, orașul București, mai ales prin aplicațiile sale ulterioare, pentru interpretări de geomorfologie și hazard.

În capitolul 8, ***Analiza tendințelor de deplasare a suprafeței terestre în București***, sunt analizate și interpretate rezultatele obținute în capitolul precedent. Rezultatele sunt analizate din punct de vedere geomorfologic, sunt evaluate în vederea aplicațiilor de inginerie civilă precum monitorizarea construcțiilor precum și pentru identificarea unor hazarde care pot apărea în mediul urban. Măsurătorile analizate sunt validate utilizând măsurători GNSS (Global Navigation Satellite System).

Pentru aplicațiile de monitorizare 3D a mediului urban s-au utilizat imagini SLC (single-looked complex) provenite de la senzori istorici (ERS 1/2, Envisat) și senzori actuali (TerraSAR-X, Sentinel-1A). Imaginile TerraSAR-X și Sentinel-1A au fost prelucrate utilizând SARscape 5.2 de la SARMAP.

Imaginile istorice ERS 1/2 și Envisat au fost prelucrate de către dr. Marius Necșoiu înainte de inițierea studiului curent. Imaginile TerraSAR-X și Sentinel-1 au fost prelucrate prin metode de interferometrie diferențială multitemporală, Permanent Scatterer și Small BAseline Subset. Acestea au întregit baza de date necesară reconstituirii tendințelor de deplasare care au caracterizat suprafața terestră a orașului București în ultimii 25 de ani (1992-2017). Rezultatele obținute au fost îmbunătățite prin manipularea fluxului de lucru al software-ului SARscape. Baza de date alcătuită a fost utilizată în diferite aplicații, precum geomorfologice, hazard și studiu al comportamentului clădirilor, pentru a înțelege mai bine utilitatea precum și limitările tehnicilor de interferometrie în cazul zonei de studiu.

Capitolul 9 al tezei prezintă concluziile cu privire la studiul efectuat, contribuții originale și propuneri privind continuarea cercetărilor demarate în timpul anilor de doctorat.

Capitolul 10 redă lista lucrărilor publicate de-a lungul studiilor de doctorat, care sunt în legătură directă cu subiectul studiat.

1. STADIUL ACTUAL AL MONITORIZĂRII MEDIULUI URBAN UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE RADAR ȘI ELECTRO-OPTICE

1.1. Detectarea schimbărilor

Acoperirea terenului descrie obiectele naturale sau antropice aflate pe suprafața Pământului. Acoperirea poate fi naturală, ca apa, pădurea sau terenurile acoperite de vegetație, sau un rezultat al influențelor antropice, precum zonele construite sau agricole. Studiarea acoperirii terenurilor în timp poate oferi detalii despre evoluția unei regiuni. Unele studii pun accent pe schimbări care au loc în zone naturale [1], pe când altele se concentrează pe dezvoltarea zonelor urbane și influența lor asupra mediului înconjurător, atât cultivat cât și natural [2]–[4]. Schimbările în distribuția spațială a unui oraș de-a lungul unei perioade de timp pot caracteriza stadiile prin care a trecut un oraș pentru a ajunge la forma și compoziția actuală [5], [6].

Din punct de vedere al teledetecției, detectarea schimbărilor este procesul prin care se identifică seturile de pixeli care diferă semnificativ între două imagini consecutive care surprind aceeași scenă, dar la momente diferite de timp.

1.1.1. Stadiul actual la nivel internațional al monitorizării mediului urban prin detectarea schimbărilor utilizând imagini electro-optice

Cel mai utilizat algoritm de clasificare folosit în studii de detectare a schimbărilor din imagini spectrale de rezoluție medie este cel al verosimilității maxime [9]. Considerată în trecut una dintre metodele cu cea mai mare precizie [10], acest tip de clasificare a fost de asemenea aplicat și pentru studiul schimbărilor în zonele urbane. Pentru a putea aborda complexitatea mediului urban, au fost adoptate tipuri mai noi de algoritmi de clasificare, precum cele ce constau în învățare automată. Aceste abordări sunt bazate pe arbori decizionali (AD) [12] sau vectori de suport (VS) [13]. Aceste două metode oferă avantaje în comparație cu metoda verosimilității maxime. Ambele sunt non-parametrice și s-au dovedit superioare în discriminarea obiectelor din imaginile satelitare [12].

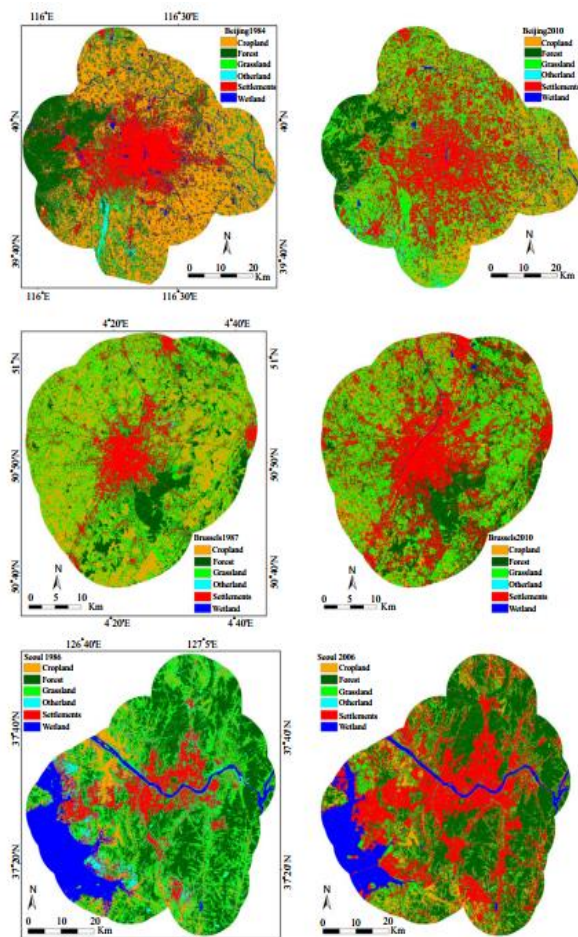


Figura 1.1. Hărți tematice, care prezintă schimbări temporale între imagini preluate la date diferite, deasupra orașelor Beijing, Bruxelles, Seul. Sursa: Referința [8]

1.1.2. Stadiul actual la nivel internațional al monitorizării mediului urban prin detectarea schimbărilor utilizând imagini radar

Gouinaud (1996) [15] au dezvoltat un algoritm care diferențiază zonele din imagini bazându-se pe tipul de histogramme care le caracterizează. Limitele histogramelor sunt impuse în funcție de analiza statistică a imaginii în vecinătatea pixelilor izolați și luminoși. Acest algoritm a fost aplicat de asemenea de către He și colab., (2006) [16], care rulează procedura iterativ și adaptează mărimea ferestrei pentru care aplică statistica astfel încât să îmbunătățească delimitarea zonelor urbane. O altă abordare prin care se extrag așezările urbane a fost propusă de Dell'Acqua și Gamba (2009) [17]. Dificultatea de a diferenția aceste două clase este descrisă de către Dekker (2003) [18], care a analizat diferite tipuri de textură pentru datele ERS. Principalul dezavantaj al metodelor ce folosesc schemele de clasificare bazate pe pixeli este că în primul pas decizional acestea neglijează contextul. De multe ori rezultatul unei astfel de metode este o zonă care prezintă speckle în locul zonelor urbane omogene dorite. Există și metode precum Markov Random Fields care iau în considerare contextul încă din prima etapă a algoritmului [19]. Un concept cu totul diferit este segmentarea regiunilor în cadrul unei etape anterioare prelucrării și clasificarea acestor segmente. Cea mai populară abordare a acestei metode este prin intermediul programului comercial eCognition care efectuează o segmentare la scări multiple și exploatează informații cu privire la geometria, textura și ierarhia obiectelor în vederea clasificării. Această metodă este aplicată preponderent pentru extragerea de zone urbane din date SAR aeropurtate cu rezoluție mare [20].

1.1.3. Stadiul actual la nivel internațional al monitorizării mediului urban utilizând fuziuni de date electro-optice și radar

În literatura științifică străină, combinarea diferitelor date pentru prelucrarea și analiza comună se numește *fuziune de date*. Acest termen reflectă faptul că imaginea combinată obținută integrează informații bazate atât pe datele electro-optice cât și radar și conține un volum de date care este mai mare decât cel obținut după combinarea simplă a câmpurilor de informații ale imaginilor analizate separat. Fuziunea datelor este definită cel mai adesea ca "grup de metode și abordări care utilizează date cu surse multiple, de natură diferită pentru a spori calitatea informațiilor conținute în date" [21]. Imaginile obținute în banda optică conțin informații despre energia solară reflectată de suprafața observată și despre compoziția chimică a stratului de suprafață. Imaginile obținute în banda cu microunde conțin date despre parametrii geometrici și fizici ai suprafeței (rugozitate, orientare, structură fizică și proprietăți dielectrice).

Câteva studii au explorat fuziunea datelor SAR și a datelor optice cu rezoluție înaltă pentru analiza zonelor urbane care au suferit daune precum prăbușirea clădirilor [23], detectarea și cartografierea daunelor în urma hazardelor din mediile urbane [24] și estimări ale structurii pădurilor [25]. Cu toate acestea, pentru cartografierea zonelor urbane s-au utilizat până în prezent în special fuziuni între date electro-optice și date SAR cu rezoluție medie. În primul rând, acest lucru s-ar putea datora faptului că zgomotul din datele SAR și rezoluția spațială inferioară datelor optice pot degrada calitatea rezultatelor. Fuziunea datelor a fost de asemenea aplicată în zone urbane. Solberg și colab., (1996) [26] au aplicat metoda MRF de fuziune a datelor ERS și Landsat TM pentru a identifica zonele urbane de apă, pădure și două clase agricole (teren arat și nearat). Clasificarea a fost îmbunătățită semnificativ prin fuziunea datelor. Haack și colab., (2002) [27] au utilizat date Radarsat-1 și Landsat TM pentru delimitarea zonelor urbane, ajungând la concluzia că cele mai bune rezultate pot fi obținute atunci când se ia în considerare textura obiectelor derivate din imaginile SAR.

1.1.4. Stadiul actual al monitorizării mediului urban prin detectarea schimbărilor utilizând imagini electro-optice și radar la nivel național

În urma căutării în baza de date *online* Scopus pentru identificarea studiilor anterioare de teledetecție aplicată pentru zona urbană a Bucureștiului au rezultat trei articole. Sandric, și colab. 2007 [7] au încercat să folosească un algoritm de segmentare pentru a clasifica imagini de rezoluție înaltă, precum CORONA (1966) și IKONOS (2002). Din cauza neconcordanței geometriei imaginilor, algoritmul propus nu a putut fi aplicat, așa că schimbările importante între cele două date au fost identificate prin interpretarea vizuală a imaginilor. Costăchioiu și Datcu (2010) [28] și Costăchioiu și colab., (2014) [29] au identificat zone ale Bucureștiului care au fost afectate de schimbări între 1984 și 2011 aplicând algoritmul VS. Costăchioiu și Datcu 2010 [28] au folosit același algoritm pentru a observa schimbările care au caracterizat evoluția indicilor spectrali de vegetație (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index) și de construcții (NDBI - Normalized Difference Building Index). Autorii au utilizat mai mult de 100 de imagini Landsat suprapuse, aplicând algoritmul VS pentru informația spectrală regăsită în benzile Landsat TM, mai puțin în infraroșu termal. Evoluția ariei construite a fost apoi comparată cu dinamica populației în București precum și în împrejurimile orașului.

1.2. Monitorizarea deplasărilor

Deformațiile suprafeței terenului pot fi declanșate de o serie de procese naturale sau antropice, precum cutremurele, activitățile vulcanice și alunecările de teren, mineritul sau extracția apei. Mărimea deplasărilor care produc deformații poate fi de ordinul milimetrelor sau centimetrelor pe an. Depinzând de tipul acestora, procesul de deformare poate avea o viteză mică și constantă în timp, sau poate fi brusc (cutremure). Este imposibil ca astfel de deformații să fie urmărite cu ajutorul senzorilor optici. Posibilitatea de a identifica și monitoriza deplasări de magnitudine mică a suprafețelor prin intermediul interferometriei a fost evaluată pentru prima dată acum aproape două decenii, de către [30]. Ideea de bază este separarea impactului pe care deplasarea îl are asupra diferenței de fază.

1.2.1. Stadiul actual al monitorizării deplasărilor în mediul urban la nivel internațional

Analiza deformațiilor ce apar la nivelul unei întregi zone metropolitane este una dintre cele mai importante aplicații a tehnicilor PSI și SBAS în mediul urban. Acest tip de analiză, care exploatează în totalitate avantajele tehnicilor interferometrice multitemporale, constând în acoperirea unor zone întinse, măsurarea fenomenelor de deplasare manifestate în trecut și costul scăzut, permit redarea în ansamblu a fenomenului de deformare care caracterizează o zonă de interes. Tehnica PSI este utilizată în prezent pentru a monitoriza fenomenele de subsidență sau ridicare în diferite zone urbane din lume. Exemple relevante în acest sens sunt date de Dixon și colab., (2006) [31] (Fig. 1.1), care prezintă o hartă de subsidență a New Orleans obținută cu ajutorul PSI. Această hartă arată zonele din oraș care prezintă subsidență rapidă cu trei ani înainte de Uraganul Katrina din 2005. Zerbini și colab., (2007) [32] descriu un studiu interesant al subsidenței naturale și antropice care afectează zona de sud-est a Câmpiei Po (Italia), care include și orașul Bologna. Autorul efectuează o analiză ce combină diferite tehnici de extragere a informațiilor cu privire la variabilitatea temporală a subsidenței: GNSS, gravitație și rezultate PSI. Alte aplicații de tehnici interferometrice multitemporale au fost descrise și de Lanari și colab., (2004), Hilley și colab., (2004), Herrera și colab., (2007), Crosetto și colab., (2008) și Vallone și colab., (2008) [33]–[37].

Tehnica Small Baseline Subset (SBAS) este una dintre cele mai importante și mai bine documentate metode de aplicare a principiilor PS [33], [38], [39]. Companii precum Gamma Remote Sensing și Altamira Information au descris modul de aplicare al metodei în articolele lui Werner și colab., (2003) [40] și respectiv Duro și colab., (2003) [41]. Hooper și colab., (2004) [42] a descris o procedură folosită în aplicațiile geofizice. Crossetto și colab., (2005) [43] au propus o metodă simplificată bazată pe funcții liniare pentru a determina deformările. Crossetto și colab., (2008) [36] și Crossetto și colab., (2010)

[44] au descris un model de procesare PSI care include un procedeu de rezolvare a ambiguităților de fază. Alte contribuții relevante mai recente au fost aduse de Kampes și Hanssen (2004) [42], care au adaptat metoda LAMBDA utilizată în GNSS în cazul PSI și de Van Leijen și Hanssen (2007) [45], care au descris utilizarea de modele de deformări adaptabile pentru PSI. Un exemplu în care obiectul de studiu a fost reprezentat de clădiri, dar de această dată prin aplicarea metode SBAS, este cel al lui Manunta și colab., (2008) [46], vizând construcții istorice din Roma (Italia).

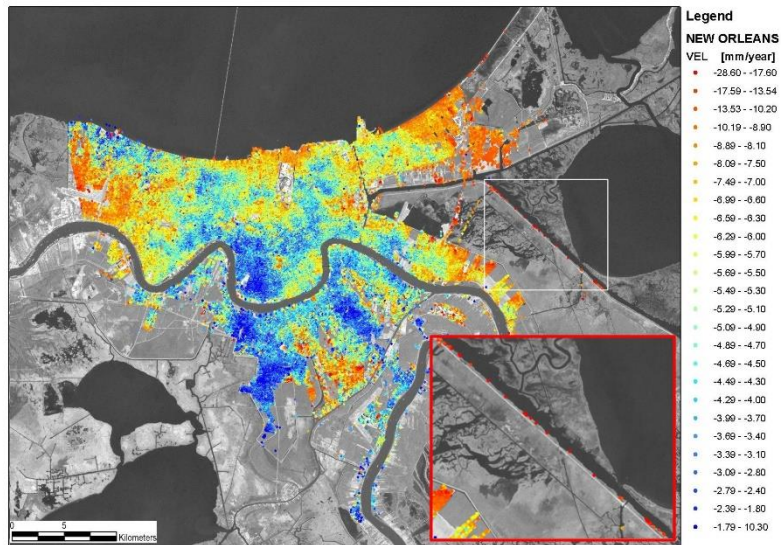


Figura 1.2. Harta deplasărilor în New Orleans realizată utilizând tehnica PS-INSAR: culoarea punctelor indică sensul și viteza de deplasare a acestora în timp. Sursa: Referința [31]

1.2.2. Stadiul actual al monitorizării deplasărilor în mediul urban la nivel național

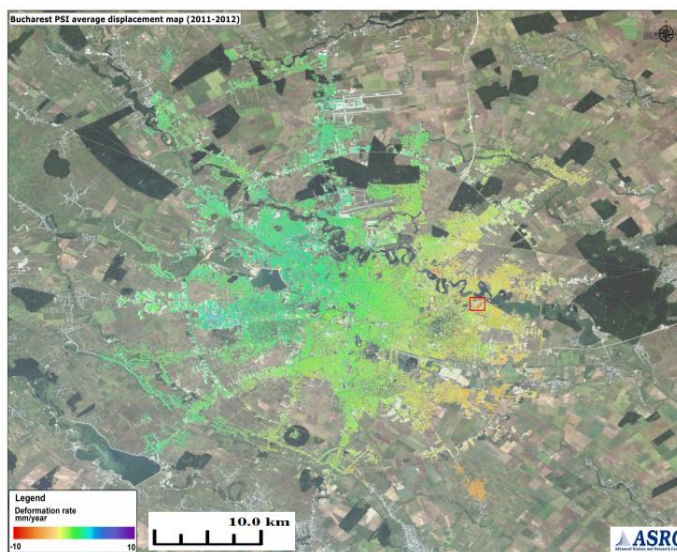


Figura 1.3. Determinarea subsidenței în București prin tehnica PS-INSAR. Sursa: Referința [48]

Utilizarea tehnicilor interferometrice SAR pe teritoriul țării noastre nu are o istorie foarte îndelungată, fiind abordată mai ales în ultimii 5 ani. La nivel național au fost aplicate atât tehnica PS cât și SBAS pentru studii ecologice [47], studiul mediilor urbane [48] și a elementelor de infrastructură de detaliu [49], [50]. Studiul mediilor urbane a vizat în special determinarea fenomenului de subsidență din București utilizând imagini ale sateliților Envisat și ERS, dar și date cu rezoluție înaltă ale sateliților TSX (Fig. 1.2) [48]. Alte studii care au utilizat datele satelitare pentru studiul mediului urban și implicit al construcțiilor, au fost cele ale lui Bălan și colab., (2016) și Dana Negula și colab., (2015) [51], [52]. Andronic și colab., 2014 au aplicat tehnica InSAR în studiul zonelor urbane și au comparat rezultatele

cu măsurători in-situ terestre, obținând o corelație bună. Vasile și colab., 2012 au evaluat posibilitatea

de a aplica PS pentru monitorizarea unor elemente de infrastructură precum diguri. Anghel și colab., 2015 au prezentat o metodă de a îmbunătăți tehnica de monitorizare a infrastructurii prin refocusarea imaginilor SAR în scopul identificării mai precise a punctelor de interes de pe construcții. Bălan și colab., (2016) [51] au utilizat imagini TerraSAR-X din perioada 2011-2013 pentru studiul în detaliu al unor construcții de interes din București, dar și al centralei Cernavodă. Există studii care tratează mișcările scoarței terestre în raport cu existența pânzei freatice din București [53] sau București și Ocnele Mari [54]. Răduțu și colab., (2017) [53] au utilizat 20 de imagini TerraSAR-X preluate în intervalul Martie 2014-Februarie 2015 pentru a studia legătura dintre fluctuațiile pânzei freatice inclusive în zona magistralei M5 de metrou, însă nu au găsit o corelație clară între creșterea sau scăderea nivelului apei și valorile de subsidență sau ridicare arătate de rezultatele InSAR.

Descrierea Geohazardelor în București din raportul PanGeo susținut de Comisia Europeană prin Programul de cooperare Space Call 3, este cel mai interesant studiu pentru obiectivul acestei teze de doctorat. Raportul conține rezultatele prelucrării imaginilor satelitare preluate de sateliții ERS și Envisat pentru perioada 1992-2000 pe teritoriul Bucureștiului.

2. Platforme satelitare

Structura care poartă senzorii de teledetecție pentru a colecta și a înregistra energia reflectată sau emisă de la o țintă sau de o suprafață terestră se numește platformă de teledetecție. Platformele pot fi terestre, adică situate pe sol, aeriene, situate pe o aeronavă sau pe un alt tip de platformă care zboară în interiorul atmosferei terestre, sau satelitare, dacă se află în afara atmosferei terestre (sateliți, stații orbitale, navete). Senzorii regăsiți la bordul platformelor satelitare se împart în două categorii principale: senzori activi și senzori pasivi. Senzorii pasivi înregistrează radiația solară sau termică, reflectate de suprafețele observate. Din cauza cerinței de surse externe de energie, senzorii pasivi pot prelua date în timpul zilei (radiația solară reflectată) și noaptea (emisiile în infraroșu radiate de obiectele de la sol). De exemplu, Sistemul de senzori Thematic Mapper (TM) aflat la bordul satelitului Landsat este un sensor pasiv. Spre deosebire de senzorii pasivi, senzorii activi se bazează pe o sursă de energie care provine de la un emițător aflat în componența sistemului. De exemplu, un sistem de detectare la distanță a fasciculului laser este un sensor activ care trimite un fascicul de radiație vizibilă sau IR cu o lungime de undă cunoscută. Acest fascicul atinge ținta și se reflectă înapoi spre senzor, care înregistrează timpul necesar fasciculului pentru parcurgerea distanței dus-întors.

2.1. Platforme satelitare cu senzori pasivi

În acest studiu sunt utilizați senzorii pasivi ai platformelor satelitare Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7 și Sentinel-2.

a. Senzorii Landsat 5 Thematic Mapper și Multispectral Scanner

Landsat la data de 1 Martie, 1984, satelitul Landsat 5 a asigurat continuitatea datelor preluate de Landsat 4, prin instalarea a două tipuri de senzori asemănători celor aflați la bordul acestuia. Achizițiile și transmiterea de date s-au făcut sub aceeași formă precum în cazul Landsat 4, prin intermediul constelației de sateliți TDRSS. Caracteristicile orbitei, înălțimea, înclinarea și timpul de revizitare ale Landsat 5 sunt identice cu cele ale satelitului Landsat 4.

Tabel 2.1 .Benzile senzorului Thematic Mapper aflat pe platformele satelitare Landsat

Banda	Lungimea de undă	Zona spectrală	Domeniul de utilizare și caracteristici	Rezoluție
1	0.45-0.52 μm	albastru	Cartografierea zonelor costiere, separarea sol-vegetație, dintre folioase și conifere	30 m
2	0.52-0.60 μm	verde	Corespunde reflectanței vegetației sănătoase	30 m
3	0.63-0.69 μm	roșu	Utilă pentru separarea diferitelor specii de plante și pentru determinarea limitelor diferitelor categorii de soluri și a structurilor geologice.	30 m
4	0.76-0.90 μm	infraroșu apropiat	Determinarea biomasei vegetale. Poate fi utilizată la delimitarea suprafețelor acvatice și terestre.	30 m
5	1.55-1.75 μm	infraroșu mediu	Este o bandă sensibilă la cantitatea de apă din plante; separarea zăpadă/gheață și a suprafețelor acvatice și terestre.	30 m
6	10.40-12.50 μm	infraroșu termic	Utilă pentru determinarea stadiului vegetativ, a intensității căldurii; Poate fi folosită, de asemenea, pentru localizarea activității geotermale. Energia captată în banda 6 este emisă de suprafața Pământului fiind posibilă achiziția de date și în timpul nopții	60 m
7	2.08-2.35 μm	infraroșu depărtat	Cartografiere hidrotermală și identificarea diferitelor tipuri de roci; identificarea corpurilor de apă	30 m
8	0.52-0.90 μm	pancromatic	Utilizată pentru îmbunătățirea rezoluției spațiale a imaginii.	15

b. Senzorul Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus

Landsat 7 are la bord senzorul Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), o versiune îmbunătățită a instrumentelor Thematic Mapper care au fost la bordul sateliților Landsat 4 și Landsat 5. Senzorul ETM+ include caracteristici suplimentare care îl fac un instrument mai versatil și mai eficient pentru studierea schimbărilor globale, monitorizarea și evaluarea acoperirii terenurilor și urmărirea unei suprafețe mari decât predecesorii săi.

Tabel 2.2. Benzile senzorului Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), aflat pe platformele satelitare Landsat

Banda	Lungimea de undă	Zona spectrală	Domeniul de utilizare și caracteristici	Rezoluție
1	0.45-0.52 (μm)	albastru	Utilă pentru cartografierea barometrică, pentru diferențierea sol/vegetație.	30 m
2	0.52-0.60 (μm)	verde	Corespunde reflexiei culorii verzi a vegetației sănătoase.	30 m
3	0.63-0.69 (μm)	roșu	Utilă pentru diferențierea diferitelor specii de plante și pentru determinarea limitelor diferitelor categorii de soluri și a structurilor geologice.	30 m
4	0.76-0.90 (μm)	infraroșu apropiat	Răspunde în mod deosebit la determinarea biomasei vegetale dintr-o imagine. Este utilă pentru identificarea culturilor și scoaterea în evidență a contrastelor sol/cultură și pământ/apă. Poate fi utilizată la delimitarea suprafețelor acvatice și terestre.	30 m
5	1.55-1.75 (μm)	infraroșu mediu	Este o bandă sensibilă la cantitatea de apă din plante, fiind, deci, utilă la studierea fenomenului de secetă și analizarea stadiului de dezvoltare a plantelor. Este, de asemenea, utilă pentru identificarea pe imagine a norilor de zăpadă și, respectiv, de gheață dar și pentru delimitarea suprafețelor acvatice și terestre.	30 m
6	10.40-12.50 (μm)	infraroșu termic	Utilă pentru determinarea stadiului vegetativ, a intensității căldurii, efectelor aplicării insecticidelor și pentru localizarea poluării termale. Poate fi folosită, de asemenea, pentru localizarea activității geotermale. Energia captată în banda 6 este emisă de suprafața Pământului fiind posibilă achiziția de date și în timpul nopții	60 m
7	2.08-2.35 (μm)	infraroșu depărtat	Pentru deosebirea tipurilor de roci, a limitelor tipurilor de soluri și pentru determinarea gradului de umiditate a solului și activității clorofilene a vegetației. Se folosește la delimitarea suprafețelor acvatice și terestre	30 m
8	0.52-0.90 (μm)	pancromatic	Utilizată pentru îmbunătățirea imaginii.	16

c. Senzorul Multispectral Instrument Sentinel-2

Constelația de sateliți Sentinel reprezintă o flotă de sateliți concepute special pentru a furniza bogăția de date și imagini care sunt esențiale pentru programul Copernicus al Comisiei Europene. Acest program unic de monitorizare a suprafeței terestre, încearcă să realizeze o schimbare treptată în modul în care gestionăm mediul înconjurător, înțelegem și abordăm efectele schimbărilor climatice. Sentinel-2A a fost lansat pe 23 iunie 2015, iar Sentinel-2B a urmat la 7 martie 2017. Comisia Europeană își asumă dreptul de proprietate asupra sateliților. Senzorul MSI folosește un concept de push-broom pentru preluarea datelor. Acesta colectează linii de date de imagine perpendiculare pe traiectorie, utilizând mișcarea înainte a navei spațiale de-a lungul orbitei. Proiectarea instrumentului multispectral (MSI) SENTINEL-2 a fost dictată de cerințele de performanță geometrică și spectrală ridicate ale măsurătorilor preluate cu câmpuri de deschidere mari. MSI măsoară radiația reflectată de Pământ în

13 benzi spectrale cuprinse între 400 și 2300 nm. În tabelul 2.3 au fost centralizate datele cu privire la valorile ce caracterizează lungimile de undă ale fiecărei benzi ale satelitului S2A.

Tabel 2.2. Benzile senzorului MultiSpectral instrument al satelitului Sentinel-2A

Banda	Lungimea de undă	Regiunea spectrului electromagnetic	Rezoluție spațială
1	0.43-0.46 (μm)	aerosoli	60 m
2	0.45-0.55 (μm)	albastru	10 m
3	0.54-0.58 (μm)	verde	10 m
4	0.65-0.68 (μm)	roșu	10 m
5	0.69 -0.71 (μm)	infraroșu apropiat pentru vegetație	20 m
6	0.73 -0.75 (μm)	infraroșu apropiat pentru vegetație	20 m
7	0.77-0.78 (μm)	infraroșu apropiat pentru vegetație	20 m
8	0.76- 0.91 (μm)	Infraroșu apropiat	10 m
8a	0.85-0.88 (μm)	Banda îngustă pentru infraroșu apropiat	20 m
9	0.93-0.96 (μm)	Vapori de apă	60 m
10	1.34-1.41 (μm)	Infraroșu cu lungimi de undă scurtă-Cirrus	60 m
11	1.54-1.69 (μm)	Infraroșu cu lungimi de undă scurtă	20 m
12	2.08-2.32 (μm)	Infraroșu cu lungimi de undă scurtă	20

2.2. Platforme satelitare cu senzori de preluare activi

Senzorul activ folosește semnale transmise de o antenă aflată la bordul platformei satelitare, care sunt reflectate, refractate sau difuzate de obiecte, suprafața Pământului sau de atmosfera sa. Senzorii activi din spațiu au o varietate de aplicații legate de meteorologie și de observarea suprafeței și atmosferei Pământului. Unul dintre senzorii activi este radarul. Radarele de precipitații măsoară ecoul radarului pentru a determina rata precipitațiilor deasupra suprafeței Pământului; iar radarul profilului norului măsoară revenirea ecoului radar de la nori pentru a furniza un profil tridimensional al reflexiei norului deasupra suprafeței Pământului. Există și tipuri de radar utilizate pentru aplicații terestre, precum observare acoperirii terenurilor sau corpurilor de apă.

Tabel 2.3 Frecvențe tipice ale sistemelor SAR, sisteme satelitare și aplicații specifice

Banda	Frecvența (Lungimea de undă)	Sateți SAR	Disponibilitate	Rezoluție planimetrică (m)	Unghi incident (°)	Lățimea culoarului de preluare (km)	Rezoluție temporală (zile)	Aplicații
X	10GHz (~3cm)	TerraSAR-X	2007-	1~16	20~55	10~150	11	Cutremure [55] Ghețari [56] Alunecări de teren [57] Generarea de modele digitale ale terenului [58]
		TanDEM-X	2009-	1~16	20~55	>30	11	
		COSMO SkyMed	2007-	1~100	25~50	10~200	16	
C	5.3GHz (~6cm)	ERS-1	1991-2000	20	21~26	100	3/35/176	Cutremure [59]–[61] Vulcani [62], [63] Ghețari [22], [30], [64] Tectonică [61], [65] Generarea de modele digitale ale terenului [66]
		ERS-2	1995-2008	20	21~26	100	3/35	
		Envisat ASAR	2002-2010	20~150	20~50	>100	35	
		RadarSat-1	1995-2013	8~100	20~49	45~500	24	
		RadarSat-2	2007-	3~100	20~50	20~500	24	
		Sentinel-1A Sentinel-1B	2014-prezent 2016-prezent	5~40	20~47	20~410	12	
L	1.2GHz (~24 cm)	JERS-1	1992-1998	18	35	75	44	Cutremure [67] Vulcani [68] Ghețari [69], [70]
		ALOS-1/PALSAR	2006-2011	10~100	8~60	30~350	46	
		ALOS-2/PALSAR	2013-prezent	3~100	8~70	25~490	14	

3. PREZENTAREA ZONEI DE STUDIU

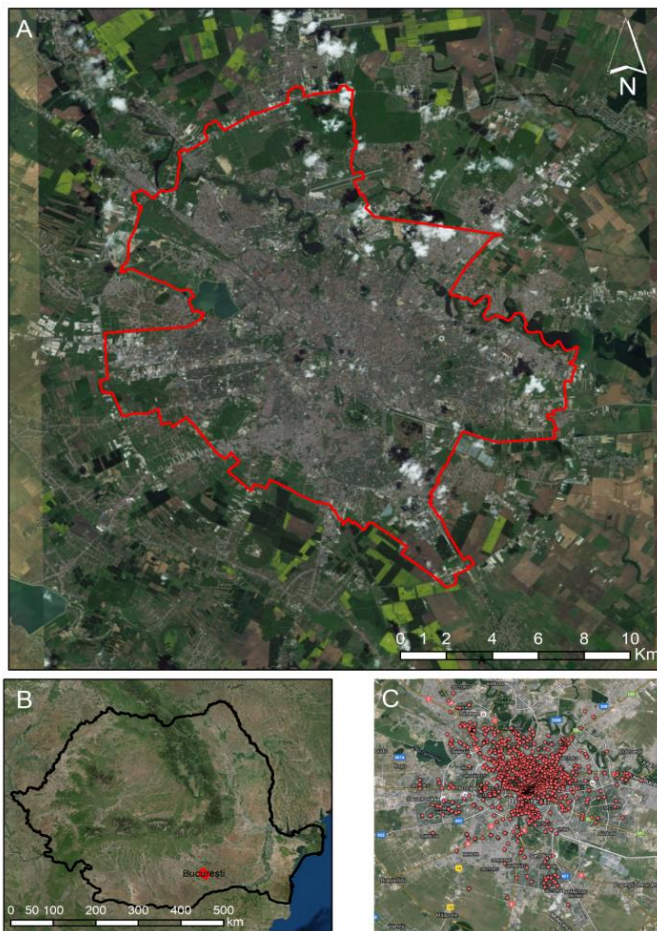


Figura 3.1. Descrierea zonei de studiu

În ceea ce privește caracteristicile geografice ale zonei de studiu, municipiul București este traversat de râul Dâmbovița, afluent al râului Argeș, care la rândul său se varsă în Dunăre. Lacurile regăsite în București - dintre care cele mai importante fiind Lacul Herăstrău, Lacul Floreasca, Lacul Tei, Lacul Plumbuita și Floreasca – sunt distribuite de-a lungul râului Colentina, și sunt distribuite în zona nordică a capitalei. În centrul capitalei se află Lacul Cișmigiu, un lac artificial înconjurat de grădinile Cișmigiu. Bazate pe planurile arhitectului german Carl Meyer, grădinile fiind facilități importante de agrement în centrul orașului încă din 1847. În vestul orașului se află lacul artificial Lacul Morii, care are cea mai mare suprafață comparativ cu celelalte lacuri amintite (2,46Km²) (Fig 3.1).

Fiind cotate drept al zecelea oraș în lume și primul în Europa în ceea ce privește expunerea la cutremure, București este considerat orașul cu cel mai mare risc seismic și în România. Localizarea, populația mare și numărul mare de clădiri vechi cresc vulnerabilitatea orașului la cutremurele puternice ce se produc periodic în Vrancea. Există o multitudine de factori care influențează riscul seismic al capitalei [71],

[72], dintre care cei mai importanți sunt: poziția geografică – 100-170 km de epicentrul vrâncean; numărul mare de clădiri cu peste P+3 etaje, cu structură de beton sau zidărie de cărămidă, construite înainte de anul 1940, cu structuri proiectate să reziste doar la acțiunea forței gravitaționale, și degradate în prealabil de cutremure puternice produse în anii 1940, 1977, 1986 și 1990; inexistența la nivel național a unor coduri în perioada construirii acestor clădiri, care să prevadă cunoștințele și normele tehnice necesare realizării unor structuri rezistente la cutremure puternice; condițiile locale care duc la amplificarea mișcărilor seismice, cu efecte distructive asupra structurilor existente; perioadă de vibrație proprie a clădirilor înalte construite în perioada interbelică asemănătoare cu perioada de vibrație cauzată de cutremurele puternice din Vrancea, ceea ce produce fenomenul de rezonanță, cu efect distrugător pentru clădirile înalte [73]. Autoritățile s-au preocupat în ultimii ani cu identificarea și clasificarea clădirilor în funcție de riscul seismic pe care acestea îl reprezintă și au publicat harta clădirilor aflate în pericol (Fig. 3.1(C)).

4. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI SATELITARE ELECTRO-OPTICE

4.1. STUDIU DE CAZ: Detectarea schimbărilor la nivelul orașului București utilizând imagini satelitare electro-optice

4.1.1. Seturi de date utilizate

Aria de studiu este cuprinsă în întregime în imaginile Landsat preluate pe traiectoriile 182 și 183. Patru imagini preluate de Landsat TM și ETM+ la diferite date au fost folosite pentru analiză schimbărilor zonei de studiu în timp. Considerând intervalele de timp stabilite, 1980-1990, 1990-2000 și 2000-2013, imaginile au fost selectate în așa fel încât să reprezinte zona de studiu la începutul și la sfârșitul fiecărei perioade de timp. Au fost alese cu precădere imagini din iulie pentru maximizarea informației despre vegetație. În cazul în care imagini din iulie nu au fost disponibile, s-au folosit imagini din iunie sau august. O condiție importantă pentru selectarea imaginilor a fost de asemenea o acoperire mică cu nori pentru fiecare imagine (sub 10%).

Pentru primul interval de timp, 1980-1989 a fost aleasă o imagine Landsat 4 TM preluată în anul 1984, iar imaginea care surprinde zona de studiu la sfârșitul perioadei este din 1989. Prima înregistrare Landsat deasupra Bucureștiului este preluată în 1979, însă calitatea și rezoluția spațială slabă a imaginii în comparație cu cea a următoarelor înregistrări a condus la excluderea acestei imagini din analiză. Imagini Landsat 5 TM și Landsat 7 ETM+ din 1989 și 2000 acoperă al doilea interval de timp. Ultimul interval 2000-2013, este reprezentat în imagini din 2000 și 2013.

4.1.2. Clasificarea acoperirii terenurilor

Sistemul de clasificări ale acoperirii terenurilor stabilit de "Organizația pentru hrană și agricultură a Națiunilor unite" (engl. - FAO) este un ghid larg folosit pentru clasificări realizate cu ajutorul datelor de teledetecție. În primul rând, pentru a evita o confuzie comună făcută între "acoperire a terenurilor" și "categorii de utilizare a terenului", Departamentul de management al resurselor naturale și Departamentul de mediu al FAO a definit acești termeni. Acoperirea terenurilor a fost definită ca "acoperirea (bio)fizică observată pe suprafață pământului", în timp ce categoria de utilizare este caracterizată de "aranjamente și activități pe care oamenii le întreprind pe o anumit tip de acoperire a terenurilor pentru a o produce, a schimba sau menține". Pentru București au fost inițial identificate șase tipuri de acoperire a terenului: zona construită urbană, zona construită rurală, zone cu sol necultivat, terenuri agricole, păduri și corpuri de apă. Cel mai mare accent a fost pus pe scoaterea în evidență a zonei urbane construite, reprezentată prin mari concertări de construcții în oraș, care includ zone rezidențiale, centre comerciale și industriale, artere de circulație sau facilități de servicii, precum și locurile de parcare asociate [19].

Din cauza naturii sale retrospective, în vederea validării studiului, s-au considerat surse diferite pentru datele considerate de referință. Pentru evaluarea preciziei clasificărilor obținute. Pentru imaginea Landsat TM din 1984, a fost considerată ca referință o harta topografică din publicată în 1980, la scara 1:2500. Pe această harta topografică s-au putut deosebi ușor locația zonei construite, zonelor agricole și pădurilor, precum și a corpurilor de apă. Imaginile istorice din Google Earth pentru anii 2000 și 2013, precum și imagini aeriene din 2011 au fost folosite ca date de referință pentru imaginile Landsat pentru intervalul de timp cuprins între 2000 și 2013. Pentru validarea celei mai recente clasificări, date de referință adiționale au fost achiziționate prin intermediul unei campanii de măsurători care a durat două zile și s-a desfășurat în Iulie, 2014. În timpul măsurătorilor de teren, au fost alese 20 de puncte de control, a căror poziție a fost

înregistrată folosind sisteme GPS integrate în smartphone. Pentru verificarea acurateții clasificărilor, nu au fost considerate doar punctele individuale a căror poziție a fost înregistrată, ci și ariile omogene care le înconjoară.

Nu toate scenele au putut fi legate de date de referință din ani corespunzători. De exemplu, pentru imaginea din 1990, imaginile au fost comparate cu hărți topografice din 1980, respectiv cu imagini Google din 2000. De asemenea, s-a folosit și o definiție a unor arii de referință pe imaginile Landsat TM observate în compozite reale de imagini.

Următoarea secțiune descrie etapele aplicării fiecăreia dintre metodele de clasificare cele mai utilizate: metoda verosimilității maxime, arbori decizionali și vectori suport (Fig. 4.1).



Figura 4.1. Reprezentarea etapelor urmate pentru obținerea imaginilor diferență pentru perioadele 1984-1989, 1989-2000 și 2000-2013 în București

4.1.2.1. Clasificarea prin metoda verosimilității maxime

În primul rând, profilele spectrale ale diferitelor tipuri de acoperiri de teren au fost investigate aprioric clasificării. Folosind imaginile de referință, s-au definit de către utilizator între 40 și 50 de probe sub formă unor zone de instruire în fiecare dintre cele 4 imagini Landsat. Depinzând de gradul de luminozitate al pixelilor din aceeași categorie și alternarea în compoziție, fiecare clasă a fost divizată în până la 4 subclase. Metodă bazată pe probabilități maxime aplică o analiză statistică pentru a clasifica informația spectrală. De aceea, înainte de a rula algoritmul de clasificare, au fost analizate histogramele și parametri statistici corespunzători fiecărei clase definite, în vederea maximizării informației cuprinse de fiecare clasă. În funcție de această analiză, alegerea siturilor au fost selecționate, unite sau șterse înainte de clasificare.

De-a lungul timpului, s-a observat obținerea unor rezultate slabe pentru deosebirea ariilor construite de soluri necultivate, în special din cauza asemănării lor spectrale. Cea mai mare eroare de clasificare a fost obținută pentru imaginea din 1984. Histogramele care caracterizează clasele definite pentru imaginea din 1984 au arătat că informația este afectată de zgomot, alegerea informației distribuite normal devenind o sarcină foarte dificilă. Distribuția normală a fiecărei clase este o condiție importantă la aplicarea algoritmului bazat pe probabilitate maximă [11].

4.1.2.2. Clasificarea bazată pe arbori decizionali (AD)

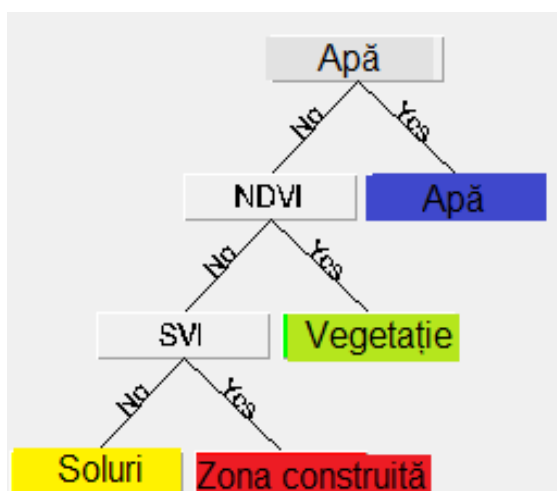


Figura 4.2. Construcția arborului decizional în software Envi

ENVI Classic 5.2 oferă posibilitatea construirii de arbori decizionali pentru clasificarea imaginilor. Definirea zonelor de instruire de către utilizator se poate face manual, alegând limite arbitrare între clase. În primul rând, pentru a simplifica selectarea manuală și definirea caracteristicilor zonelor selectate în imagine, pentru fiecare dintre imagini au fost calculați trei indici spectrali: Indicele diferență normalizat de evidențiere a vegetației (NDVI), Indicele diferență normalizat de evidențiere a apei (NDWI), și indicele de sol și vegetație (SVI). Au fost în continuare folosite aceleași zone test ca și în cazul clasificării prin metoda verosimilității maxime pentru impunerea limitelor între clasele de acoperire definite în arborele decizional. Stabilirea pragurilor indicilor spectrali ce caracterizează tipurile de acoperire s-a făcut pe bază de determinări statistice pentru fiecare ansamblu de zone test din fiecare clasă.

$$NDWI = \frac{NIR(TMband4) - Green(TMband2)}{NIR(TMband4) + Green(TMband2)} \quad (4.1)$$

$$NDVI = \frac{NIR(TMb4) - Red(TMb3)}{NIR(TMb4) + Red(TMb3)} \quad (4.2)$$

$$SVI = \frac{SWIR(TMb5) - Blue(TMb1)}{SWIR(TMb5) + Blue(TMb1)} \quad (4.3)$$

4.1.2.3. Clasificare bazată pe vectori suport (VS)

Chiar dacă algoritmul VS se comportă bine în clasificări chiar și cu un număr de situri egal cu jumătate în comparație cu numărul folosit pentru prima metodă de clasificare, același număr de zone test

au fost considerate pentru această clasificare, atât pentru comparare între metode, cât și pentru îmbunătățirea preciziei de clasificare a imaginii. Procedura de aplicare a acestei metode pentru clasificare este simplă. Fără a fi necesară definirea de subclase, siturile au fost împărțite în doar patru clase de acoperire definite de utilizator, rezultând imagini în care întreaga zonă este clasificată în una din clasele considerate [14].

4.1.2.4. Validarea clasificărilor

Pentru fiecare dintre cele 4 imagini satelitare, a fost utilizat același număr de 20 de zone de instruire per clasă, folosite pentru fiecare dintre cele 4 imagini pentru a evalua precizia clasificării rezultate. Ca referință au fost utilizate hărți topografice, imagini satelitare cu rezoluție mare din Google Earth, și imagini aeriene preluate după 2000. De asemenea, în timpul unei campanii de măsurători în teren au fost alese zone de validare a clasificării celei mai noi imagini satelitare (2013). Poziția zonelor de instruire pentru validare a fost înregistrată folosind aplicația Google Earth pentru mobil, instalată pe un smartphone Allview echipat cu GPS. Tabelul 4.1. prezintă rezultatele de calcul al preciziei, inclusiv precizia utilizatorului și a producătorului rezultate pentru patru imagini care definesc începutul și sfârșitul intervalelor de timp alese : 1984, 1989, 2000 și 2013. Tabelele 4.2. și A 4.3 reprezintă matricele de confuzie pentru clasificările folosind vectori suport și arbori decizionali rezultate pentru cea mai recentă imagine (2013). Atât algoritmii bazați pe vectori suport cât și cei bazați pe arbori decizionali au generat rezultate de precizie mai mare în comparație cu algoritmul bazat pe metoda verosimilității maxime. Acuratețea obținută pentru fiecare dintre metodele care folosesc învățare automată este ridicată și comparabilă: cu VS s-a obținut o precizie de clasificare medie de 82% iar AD a generat o precizie de 83%, în timp ce precizia obținută din clasificarea prin metoda verosimilității maxime a fost de numai 68%. Aceste rezultate confirmă concluzii ale studiilor apriorice care susțin faptul că metodele bazate pe învățare automată conduc la precizii de clasificare mai bune (Schneider 2009). Prin urmare, s-a renunțat la compararea eficienței algoritmilor și interpretarea rezultatelor obținute prin metoda verosimilității maxime și celelalte două metode.

Tabel 4.1. Comparatie între acuratețea producătorului (Producer) și a utilizatorului (User) pentru fiecare algoritm de clasificare

Metodă	Probabilitate maximă		Vectori suport		Arbori decizionali	
	Ac. Prod.(%)	Ac. Ut..(%)	Ac. Prod.(%)	Ac. Ut..(%)	Ac. Prod.(%)	Ac. Ut..(%)
Construcții	70.53	68.23	87.24	83.20	81.51	79.40
Vegetație	77.15	72.22	100.00	73.78	97.91	94.55
Apă	72.30	78.57	97.14	98.20	93.97	95.92
Soluri descoperite	68.50	71.92	81.24	97.98	87.98	94.46

Tabel 4.2. Matricea de confuzie pentru clasificarea imaginii 2013 folosind arbori decizionali

Clasa	Construcții	Vegetație	Apă	Soluri goale	Total
Construcții	3045	37	40	337	3459
Vegetație	48	1736	2	50	1836
Apă	1	0	1247	0	1248
Soluri descoperite	128	0	38	2833	2999
Total	3222	1773	1327	3220	9542

Tabel 4.3. Matricea de confuzie pentru clasificarea imaginii 2013 folosind vectori suport

Clasa	Construcții	Vegetație	Apă	Soluri goale	Total
Construcții	3109	0	36	35	3459
Vegetație	59	1773	2	559	1836
Apă	0	0	1289	0	1248
Soluri descoperite	54	0	0	2616	2999
Total	3222	1773	1327	3220	9542

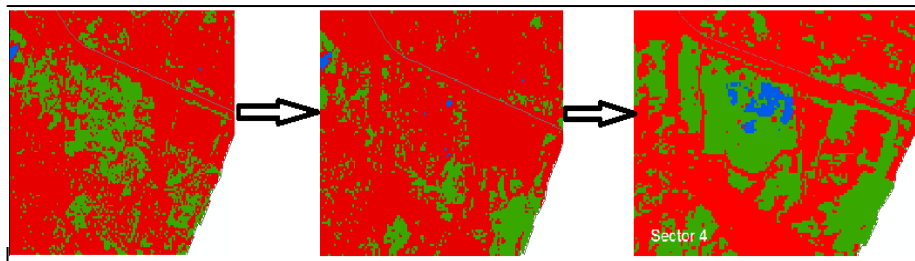
4.1.3. Analiza imaginilor diferență obținute pentru detectarea schimbărilor

Înainte de 1984, regimul comunist nu a dat foarte mare importanță planificării urbane. Principalul interes era reprezentat de zonele industriale, în timp ce arealele rezidențiale erau privite ca locuri a căror destinație trebuia să fie găzduirea a cât mai multor muncitori cu puțință. Prin urmare, în perioada dinainte de 1984 era caracterizată de zone construite dense, cu foarte puțin spațiu verde între zonele construite. În același sens, și amenajării centrului i se dădea foarte puțină importanță, acesta aflându-se departe de zonele industriale care se aflau la periferie. În 1984, în urma cutremurului din 1977 și vizite repetate în Nord Coreea, președintele țării, Nicolae Ceaușescu începe să dea mai multă importanță înfățișării capitalei, așa că se fac mari investiții în direcția reconstruirii și reamenajării orașului. Au existat proiecte noi care s-au concentrat pe resistemizarea centrului Bucureștiului, care au dus la schimbări dramatice în peisajul urban, de-a lungul unui timp relativ scurt. În 1984, un întreg cartier, Uranus, a fost demolat pentru a se elibera spațiu pentru ceea ce avea să devină cea mai mare construcție locuită din Europa, Palatul Parlamentului. Harta clasificării din 1984 (Fig. 4.3) surprinde zona chiar înainte de începerea construirii noii clădiri, unde se poate observa în centrul orașului un șantier imens, de aproximativ 7 kilometri pătrați, reprezentați prin sol necultivat. Construcția Palatului Parlamentului a început în 1983 și a fost terminată în 1987. Clădirea Palatului Parlamentului este vizibilă în imaginea din 1989. În spiritul aceluiași proiect de resistemizare, unele zone rezidențiale ale cartierului Izvor au fost demolate pentru a face loc unui nou lac, Văcărești. În imaginea din 1984, aria unde se plănuia amenajarea lacului Văcărești apare neconstruită. În imaginea din 1989 zona lacului se prezintă ca arie construită, ceea ce poate însemna că amenajarea lacului începuse, iar imaginea surprinde construcții aferente amenajării. Lacul Văcărești a fost însă unul dintre puținele proiecte pe care Ceaușescu le-a lăsat neterminate înainte de 1989. În 1989 putem observa că amenajarea lacului evolua, însă, după 1989, proiectul a fost abandonat de către autorități, iar locul construcțiilor aferente lacului începe să fie luat de vegetație (Fig. 4.4). O altă schimbare majoră între anii 1984 și 1989 este reprezentată de amenajarea Lacului Morii, situat în nord-vestul Bucureștiului (Fig. 4.5). În ceea ce privește zonele rezidențiale și spațiul construit, din hărți rezultă că, în afară de centru, orașul a continuat să se extindă la periferie. În plus, au apărut construcții noi în zonele deja dens construite, înlocuind puținele spații verzi existente. Această arată că proiectul de reamenajare era departe de a rezolva problema construirii haotice, lăsând multe cartiere rezidențiale mult prea aglomerate pentru a asigura condiții decente de viață (4.26).



Figura 4.3. Exemplu de schimbare: Vegetație rămasă după demolarea cartierului Uranus în 1984 apare înlocuite de Palatul Parlamentului în 1989

Figura 4.4. Exemplu de schimbare: Zona lacului Văcărești este parțial construită în 1989 după care proiectul este abandonat de autorități lăsând loc pentru vegetație (2000)



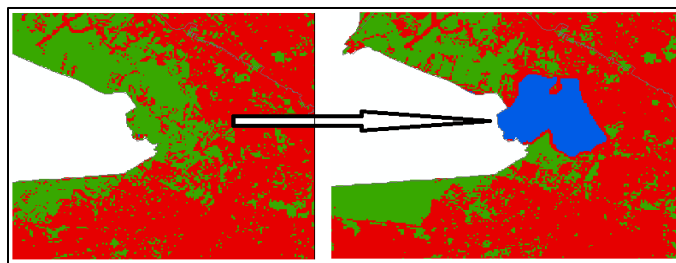


Figura 4.5. Construcția Lacului Morii între 1984 și 1989

4.1.3.1. Relația dintre categoria de acoperire a terenului și date demografice

După căderea comunismului, intervalul de timp cuprins între 1989 și 2000 a fost considerată cea mai haotică perioadă în ceea ce privește planificarea urbană. Clădirile naționalizate care până atunci aparținuseră statului, au fost apoi cumpărate în proporție de 95% de cei care le închiriau în timpul comunismului (Fig. 4.6). Liberalizarea pieței din această perioadă, combinată cu un număr mic de case disponibile pentru achiziționare, s-a materializat prin proiecte individuale de construcție. Zona de nord a Bucureștiului a cunoscut o dezvoltare rapidă, fiind și zona în care este detectată cea mai mare rată de schimbare a categoriilor de teren de la clasa de vegetație sau soluri neconstruite la zona construită. Zona construită a cunoscut de asemenea o extindere importantă în zona sudică, unde părți din sectorul 4 prezentau cu precădere case unifamiliale, fiind asemănător cu o așezare rurală până în 1989. În interiorul orașului, construcția de noi clădiri rezidențiale pe spații verzi a avut loc la o rată mai scăzută decât înainte de 1989, însă acest aspect reprezenta încă o problemă de planificare (Fig. 4.7). Zona pe care inițial trebuia să devină Lacul Văcărești a devenit un spațiu verde odată cu degradarea construcțiilor care ar fi trebuit să deservească amenajarea lacului. Din hărțile clasificate, spațiile verzi par să primească un grad mai mare de importanță în comparație cu perioada precedentă, prin amenajarea parcurilor Tineretului și Titan. Un alt posibil motiv pentru creșterea suprafeței verzi pe parcursul acestei perioade poate fi reprezentat de diferența între sezoanele de vegetație în care imaginile Landsat au fost preluate.

Ultima perioadă analizată, 2001-2013 (Fig. 4.8), este considerată de către experți și o perioadă de întoarcere la normalitate din punctul de vedere al peisajului urban. Cele mai multe schimbări sunt vizibile

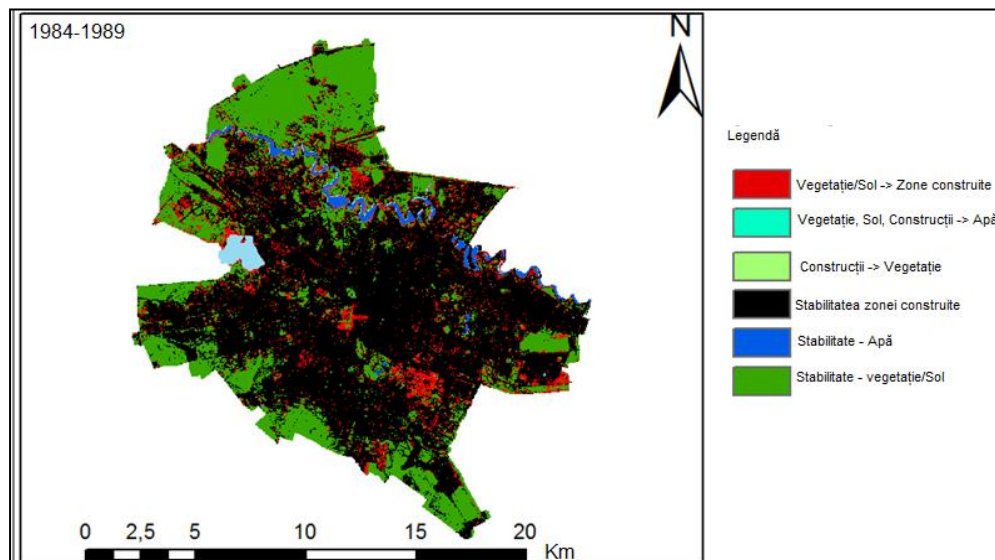


Figura 4.6. Schimbări în acoperirea terenurilor între 1984-1989

la periferia orașului, prin construcția de locuințe cu un grad mai ridicat de confort față de blocurile comuniste, locuri de parcare, și spații comerciale. Aceste cartiere rezidențiale au început să apară la marginea Bucureștiului din cauza lipsei spațiului în interiorul orașului. Zonele de nord și

sud continuă să se dezvolte, cu un ritm comparabil cu cel din perioada precedentă (Fig. 4.6, 4.7). Mai târziu, prin închiderea masivă a fabricilor din București, privatizarea lor sau falimentarea lor, au dus la apariția unor locuri libere chiar în interiorul orașului.

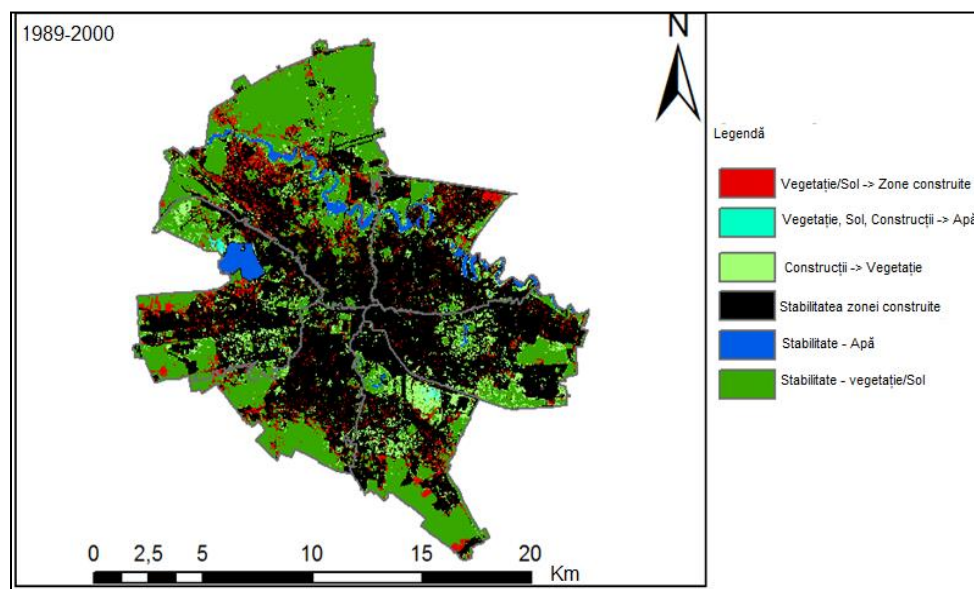


Figura 4.7. Schimbări în acoperirea terenurilor între 1989-2000

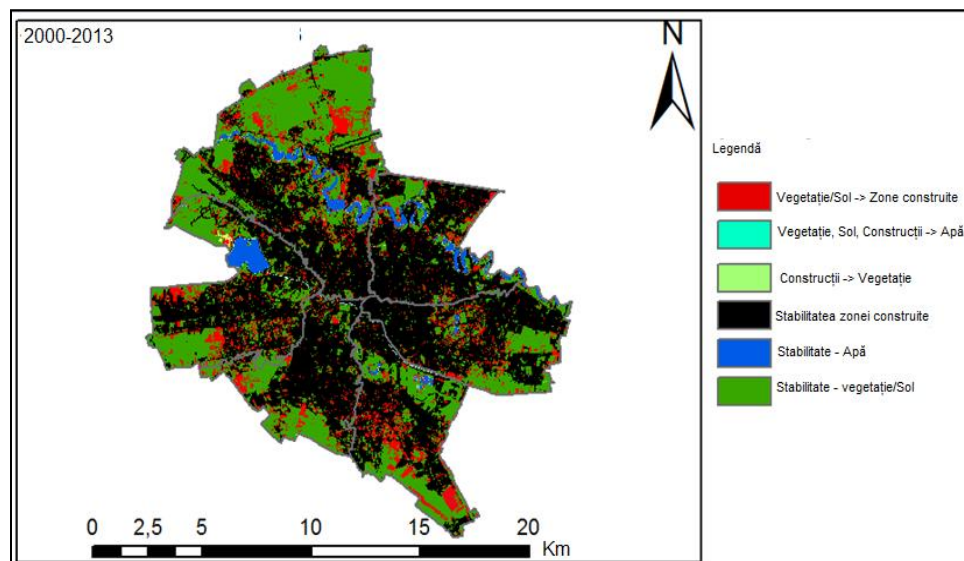


Figura 4.8. Schimbări în acoperirea terenurilor între 2000-2013. 3.4. Relația dintre categoria de acoperire a terenului și date demografice

5. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND IMAGINI RADAR

5.1. STUDIU DE CAZ: Clasificarea imaginilor Sentinel-1A pentru zona de studiu București

În vederea clasificării acoperirii terenului utilizând date radar, au fost achiziționate două variante ale unei imagini preluate la data de 29.07.2017. Imaginea SLC (Single Looked Complex) este un produs de nivel 1, georeferențiată utilizând date despre orbita satelitului, corespunzătoare geometriei de preluare a imaginilor. Benzile produselor SLC păstrează informația de fază, fiind descrise de numere complexe alcătuite din amplitudine și fază. Acestea au o rezoluție de 13.69x3.69 m, elementele de rezoluție ale imaginii având formă dreptunghică. Celălalt tip de produs, GRD (Ground Range Detected), este de asemenea un produs de nivel 1, care constă în date SAR care au fost proiectate utilizând un model elipsoidal al Pământului. Pixelii imaginilor au formă de pătrat, la care s-a ajuns prin medierea lor cu costul pierderii rezoluției, aceasta fiind de 10x10 m. Șaisprezece imagini SLC S1A din aceeași perioadă a anului au fost regisrate cu imaginea inițială, considerată imagine master, pentru a forma o nouă imagine mai puțin afectată de zgomet.

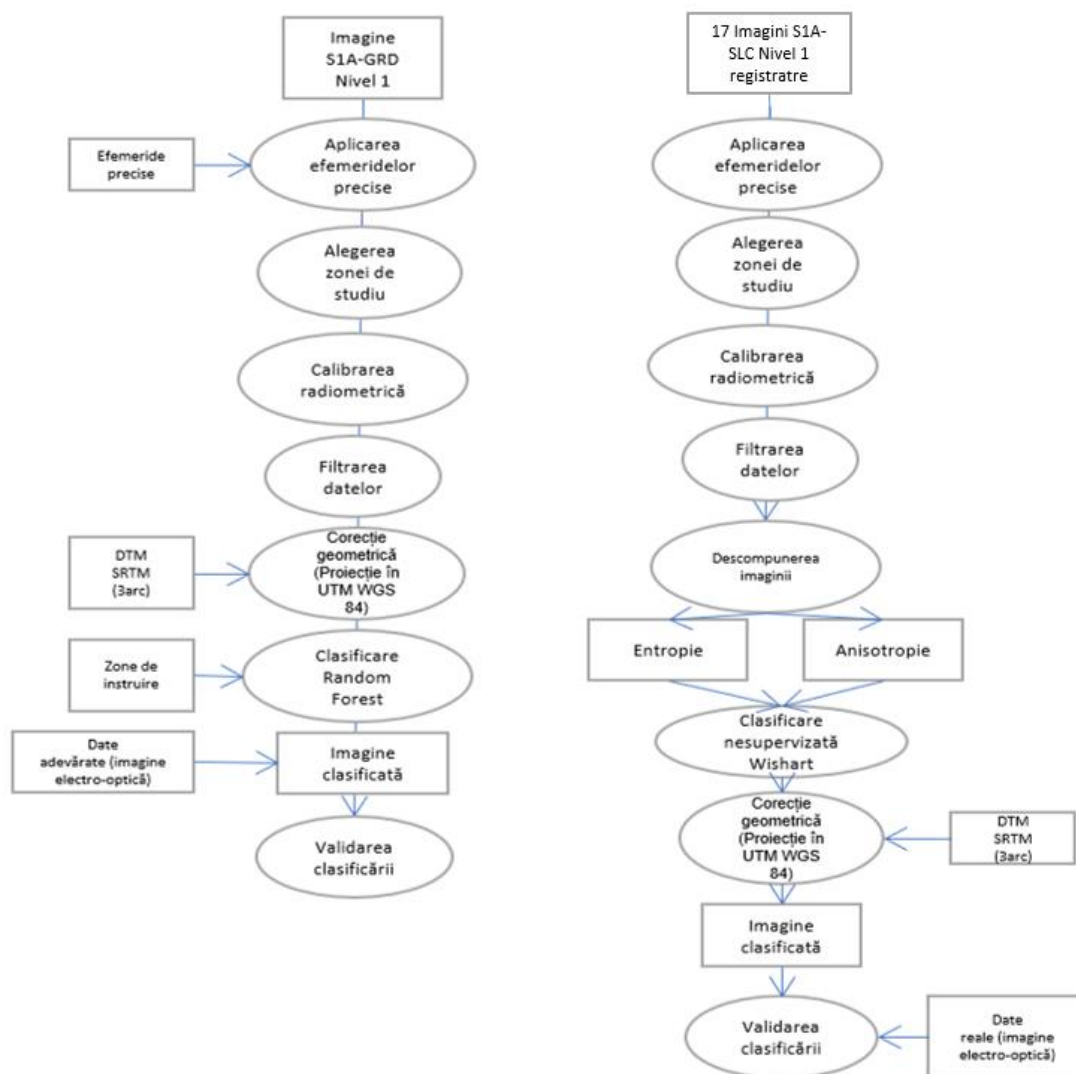


Figura 5.1. Fluxul de lucru pentru clasificarea imaginilor SAR de tipul GRD și SLC

5.1.1. Clasificarea imaginilor Sentinel-1A GRD și SLC

5.1.1.1. Clasificarea supervizată a imaginii GRD prin utilizarea algoritmului Random Forest

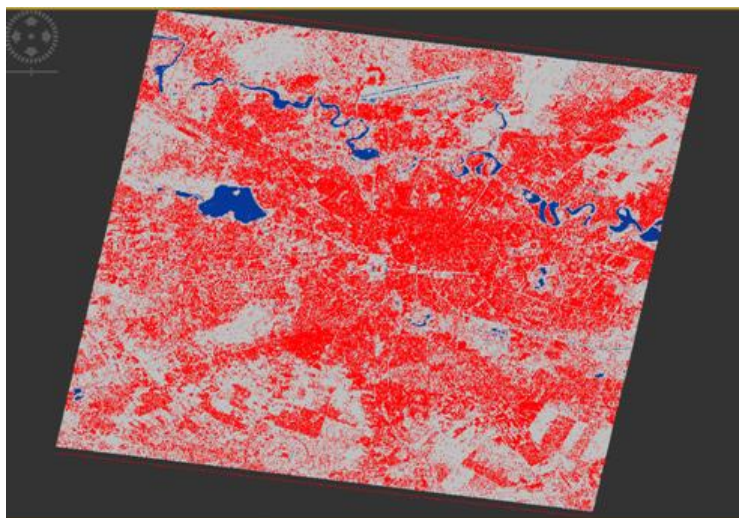


Figura 5.2. Rezultatele clasificării Random Forest pentru imaginea S1A-GRD. Construcții – roșu; Apă – Albastru; Vegetație și Sol – Gri

În primul rând, au fost stabilite clasele care descriu tipurile de acoperire ale terenului din zona de studiu, și pot fi identificate din mecanismul de dispersie al datelor radar: Clasa Construcții, Vegetație, Pădure, Apă. Se poate observa faptul că imaginea radar este clasificată diferit față de cele electro-optice. Principala diferență este necesitatea a două clase care să diferențieze între pădure și vegetație, datorită mecanismelor diferite de dispersie ale celor două tipuri de acoperire descrise. O altă diferență constă în renunțarea la clasa *Soluri descoperite*, deoarece intensitatea semnalului reflectat de acestea este comparabilă cu cea a semnalului reflectat de terenuri acoperite cu vegetație joasă precum iarba.

După rularea clasificării bazate pe zonele de instruire definite pentru imaginea GRD, s-a obținut imaginea din Fig. 5.2. Imaginea rezultată inițial din clasificare conține toate cele 4 clase. Deoarece studiul este axat pe zona construită a orașului, clasele de vegetație și pădure au fost agregate într-o singură clasă, și reprezentate ca atare.

Printr-o interpretare vizuală a imaginii se poate observa că zona construită a fost bine evidențiată în raport cu celelalte clase. Există însă și greșeli de clasificare, reprezentate de clasificarea aeroporturilor Henri Coandă și Băneasa din nordul Bucureștiului în clasa de apă din cauza reflexiei speculare. De asemenea, există multe tipuri de terenuri agricole din zonele limitrofe orașului, care sunt confundate cu zona construită.

5.1.1.2. Clasificarea datelor prin segmentarea planului H- α

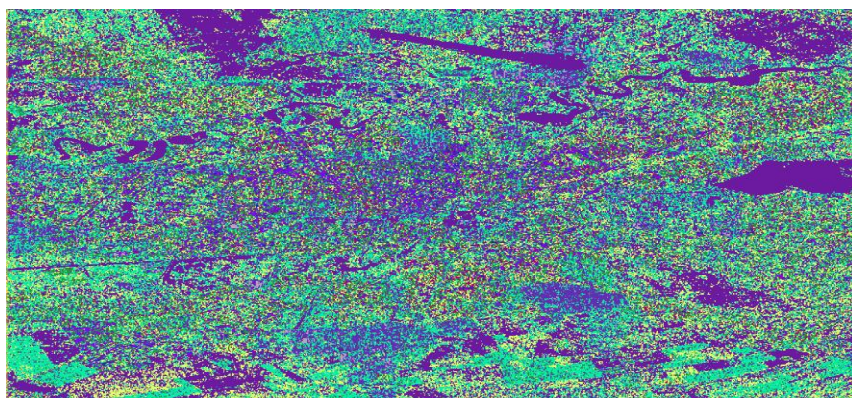


Figura 5.3. Rezultatele clasificării Wishart

Cele 17 imagini registrate care au rezultat în imaginea polarizată dual S1A-SLC au fost descompuse în funcție de planul H- α în parametrii Entropie, Anizotropie și Alfa. Valorile mari ale anizotropiei indică prezența a două mecanisme de dispersie dominante, cu probabilitate asemănătoare și a unui al treilea mecanism, mai

puțin semnificativ. Zonele cu valori foarte mari ale anizotropiei sunt în special construcții care prezintă reflexie dublă, dar și păduri și terenuri agricole care prezintă vegetație care produce reflexie dublă și dispersie volumetrică. Apa în schimb, prezintă valori foarte mici pentru anizotropie, deoarece este caracterizată doar de reflexie speculară. Entropia prezintă valori opuse anizotropiei, arătând acele tipuri de acoperire caracterizate de un singur mecanism de reflexie, precum apă, culturi agricole și o parte din zona construită. Clasificarea imaginii s-a făcut prin segmentarea planului H- α (Fig. 5.3). Rezultatele clasificării arată incertitudini mari în evidențierea zonei construite, în ciuda procedurii aplicat pentru reducerea zgomotului din imagine. Aceasta poate fi o consecință a geometriei senzorului satelitar față de dispunerea obiectelor din zona de studiu.

5.1.2. Validarea rezultatelor clasificărilor

Imaginile rezultate din clasificările imaginilor SAR au fost validate utilizând o imagine Sentinel-2A din 27 iunie 2017, care are o rezoluție spațială comparabilă cu cea datelor SAR inițiale (20 m). Au fost alese 15 zone de instruire pentru fiecare dintre tipurile de acoperire considerate. Pixelii imaginii electro-optice, cuprinși în zonele de instruire, au fost comparați cu pixelii rezultați în imaginile clasificate, determinându-se preciziile clasificărilor sub forma de precizia producătorului și cea a utilizatorului, din care a reieșit precizia finală de clasificare a fiecăreia dintre imagini (Tabel 5.1, Tabel 5.2).

Tabel 5.1. Matricea de confuzie pentru clasificarea imaginii SAR-GRD prin metoda Markov Random Field

Clasa	Construcții	Vegetație	Apă	Vegetație	Total
Construcții	1520	1095	563	827	4005
Vegetație	840	1013	289	728	2870
Apă	320	256	766	656	1998
Soluri descoperite	1325	506	380	1165	3376
Total	4005	2870	1998	3376	12249

Tabel 5.2. Matricea de confuzie pentru clasificarea imaginii SAR-SLC prin descompunere

Clasa	Construcții	Vegetație	Apă	Soluri descoperite	Total
Construcții	2929	666	55	355	4005
Vegetație	579	1677	163	451	2870
Apă	129	143	1726	0	1998
Soluri descoperite	368	384	54	2570	3376
Total	4005	2870	1998	3376	12249

Din procedeul de validare au rezultat precizii de 73% de clasificare a zonei construite în imaginea SAR-GRD și 37% din imaginea SAR-SLC. Precizia foarte mică a rezultatelor de clasificare obținute prin descompunerea imaginii SAR-SLC nu poate fi îmbunătățită considerabil prin abordarea unei alte metode de clasificare. Capacitatea foarte mică a rezultatelor indică o dificultate de clasificare a imaginii inițiale, dublu-polarizată. Cauzele posibile pentru obținerea de precizii atât de scăzute în urma clasificării acestei imagini prin descompunere, sunt orientarea obiectelor din imagine față de linia de vizare și tipurile de polarizări, VV și VH, ale imaginii Sentinel-1A.

Clasificarea imaginii SAR-GRD, utilizând amplitudinea imaginii și metoda Markov Random Fields a generat rezultate cu o precizie de 73%, comparabilă cu cea obținută prin clasificarea imaginilor electro-optice Landsat prin aplicarea metodei Verosimilității Maxime. Precizia finală de clasificare a zonei construite în imaginea SAR-GRD este afectată mai ales de confuzia dintre aceasta și zona de terenuri agricole, în special care nu prezintă vegetație, adică soluri descoperite.

Datorită preciziei superioare de clasificare, imaginea SAR-GRD a fost selectată pentru studiul preciziei de clasificare a imaginilor utilizând fuziuni de date electro-optice și radar.

6. DETECTAREA SCHIMBĂRILOR UTILIZÂND FUZIUNI DE DATE ELECTRO-OPTICE ȘI RADAR

6.1. STUDIU DE CAZ: Fuziuni de date pentru clasificarea imaginilor radar și electro-optice

6.1.1. Descrierea fluxului de lucru pentru realizarea fuziunilor de date pentru clasificarea imaginilor radar și electro-optice

Tipurile de date alese pentru îmbunătățirea preciziei clasificării terenurilor în zona de studiu sunt date provenite de la sateliții Sentinel-1A și Sentinel-2A. Selectarea datelor s-a făcut luând în considerare rezoluția spațială și rezoluția temporală a imaginilor, care sunt comparabile. De asemenea, disponibilitatea gratuită a imaginilor în baza de date oferită de ESA prin platforma *Copernicus* (ESA, joacă un rol important în alegerea senzorilor, deoarece aplicațiile de detectare a schimbărilor vizează perioade lungi de timp cu posibilitatea de achiziționare de noi imagini pe măsură ce sunt preluate.

Prin georeferențiere, imaginile sunt proiectate în sistemul WGS 84. După georeferențierea imaginilor, acestea sunt reeșantionate la rezoluția de 10 m, iar benzile imaginii electro-optice sunt registrate cu cele ale imaginii radar. Deoarece benzile 1, 9 și 10 ale imaginii Sentinel-2A sunt afectate de aerosoli și nori și au o rezoluție de 60 m, au fost excluse din procesul de fuziune a datelor.

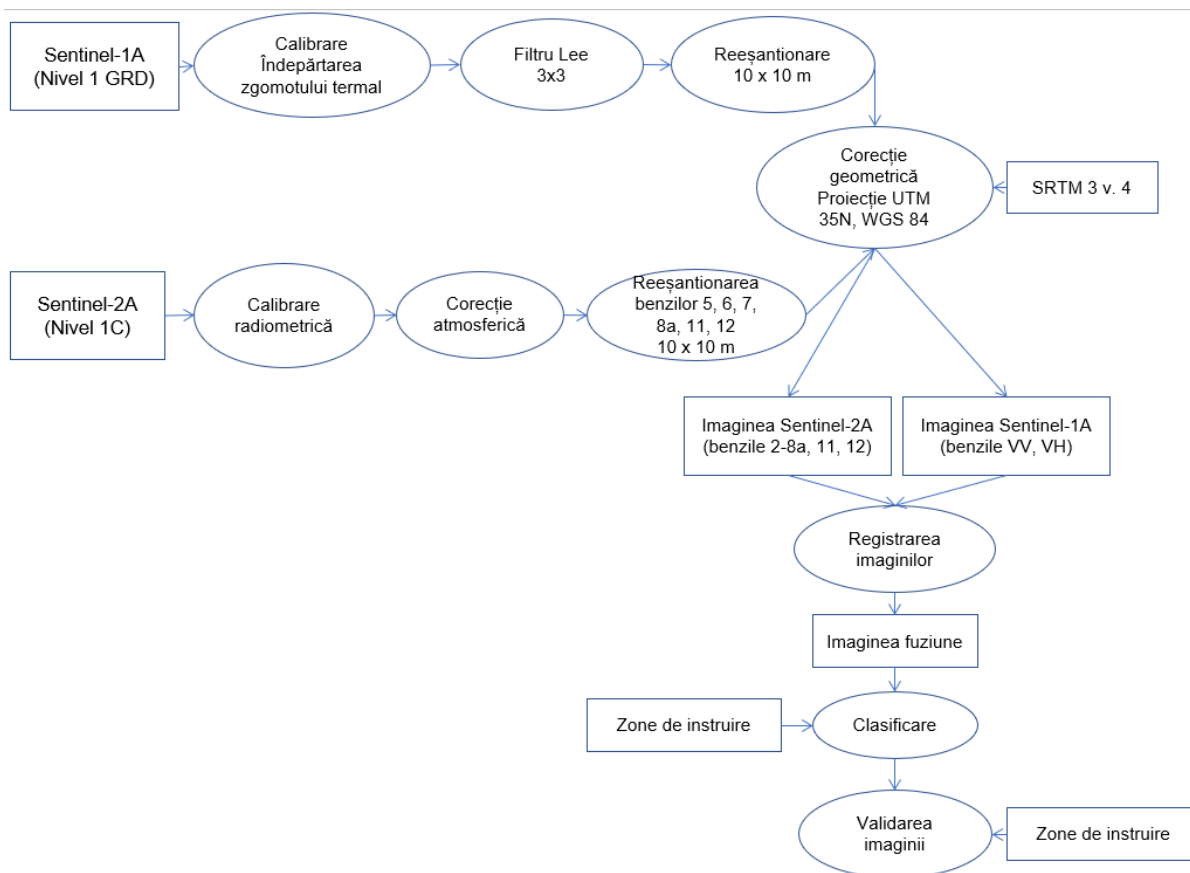


Figura 6.1. Flux de lucru pentru clasificarea imaginilor rezultate prin fuziuni de date Sentinel-1A și Sentinel-2A

6.1.2. Validarea clasificării imaginii obținute prin fuziuni de date

Precizia clasificării obținute din imaginea realizată prin fuziuni de date (Fig. 6.2) a fost validată utilizând 20 de zone de instruire pentru fiecare clasă, alese pe un ortofotoplan din 2015, cu rezoluție de 0.5 m. Matricea de confuzie întocmită pentru validare este redată în tabelul 6.1. În urma validării, precizia de clasificare obținută pentru zona construită din zona urbană este de 96.92%. Pentru zonele limitrofe, s-a obținut o îmbunătățire a preciziei de clasificare cu 29%, ajungându-se la o precizie de clasificare de 91%.

Chiar dacă nu fac obiectul acestui studiu, se observă că și celelalte clase, apă, vegetație și sol, au fost diferențiate mult mai eficient în urma fuziunii de date.

Tabel 0.1. Matricea de confuzie pentru clasificarea imaginii SAR-GRD prin metoda Markov Random Field

Clasa	Construcții	Vegetație	Apă	Soluri descoperite	Total
Construcții	4439	53	37	52	4581
Vegetație	31	2859	14	29	2933
Apă	32	5	1484	14	1535
Soluri descoperite	79	16	0	3481	3576
Total	4581	2933	1535	3576	12625

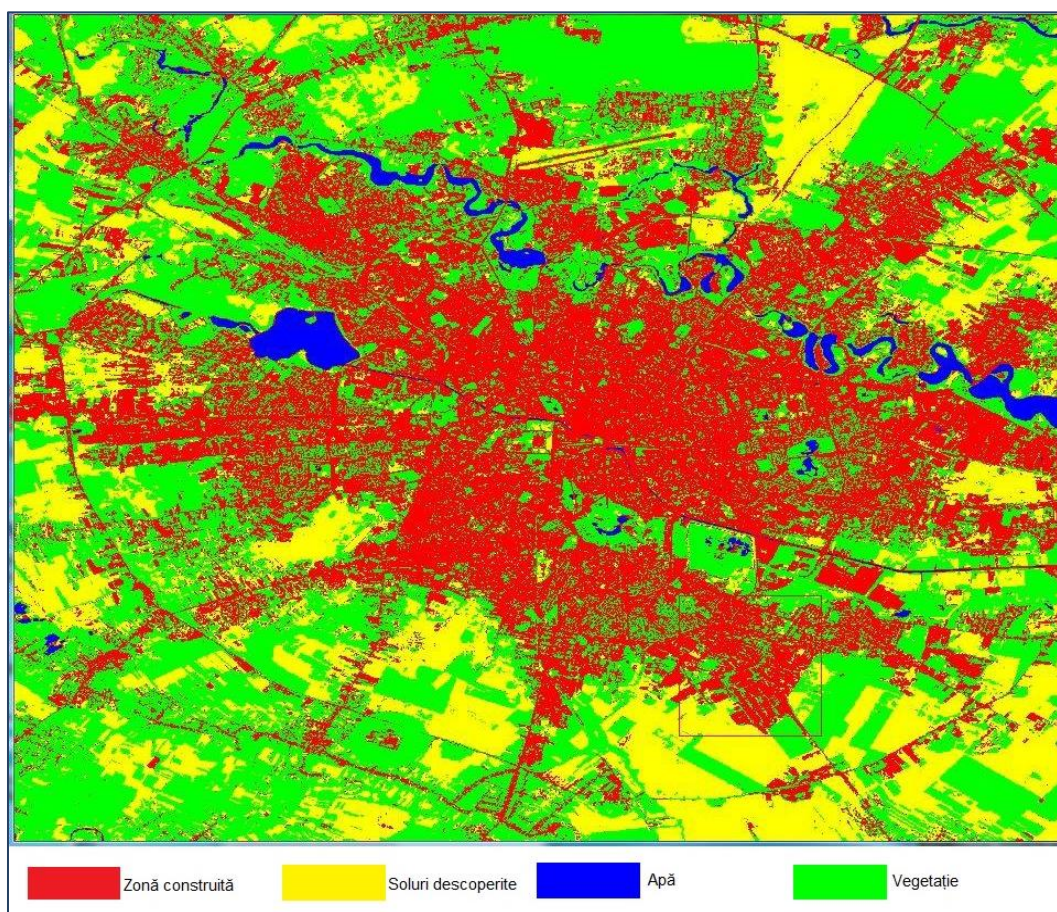


Figura 6.2. Rezultatul clasificării imaginii rezultate prin fuziuni de date utilizând algoritmul de clasificare Supported Vector Machine

7. UTILIZAREA METODELOR INTERFEROMETRICE PENTRU MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR

7.1. STUDIU DE CAZ: întocmirea hărților de deformații în orașul București

Pentru monitorizarea dinamicii ce caracterizează suprafața orașului București, au fost prelucrate imagini istorice, provenite atât de la senzori retrași din funcțiune, precum ERS și Envisat ai Agenției Spațiale Europene, precum și senzori actuali, precum TSX al Agenției Spațiale Germane și Sentinel-1 al Agenției Spațiale Europene. Imaginile provenite de la senzori diferiți au fost prelucrate separat, deoarece s-au luat în considerare faptul că senzorii și platformele satelitare au caracteristici diferite, astfel trebuie tratate individual.

Sursele de date și imaginile inițiale sunt următoarele:

- Cele mai vechi imagini, provenite de la satelitul ERS, au fost preluate în perioada 1992-2000. Din această perioadă, pentru studiul curent s-au utilizat rezultatele prelucrării a 24 imagini.
- Douăzeci și șapte de imagini Envisat au fost utilizate pentru monitorizarea perioadei 2003-2010. Datele satelitare ERS și Envisat au fost achiziționate de la Agenția Spațială Europeană în cadrul propunerii ESA AO CAT-1 (proiect 12793) de către Prof. univ. dr. Iuliana Armaș și prelucrate de către PI Marius Necșoiu. În cadrul studiului curent au fost utilizate rezultatele obținute în urma prelucrărilor. Rezultatele obținute au fost utilizate în analize pentru a completa baza de date privind deformațiile scoarței terestre din 1992 până în 2017.
- Imaginile provenite de la senzorii aflați pe platformele satelitare TSX și Sentinel-1 au o rezoluție temporală mai bună în comparație cu sateliții istorici și de asemenea sunt mai ușor de accesat. Douăzeci și șapte de imagini TSX au fost achiziționate contra cost din arhiva DLR, în cadrul propunerii DLR LAN 1444, PI Prof. Univ. Dr. Ing. Iuliana Armaș, pentru acoperirea intervalului de timp 2011-2014.
- Cele mai recente imagini prelucrate sunt imaginile provenite de la Sentinel-1. Au fost descărcate gratuit imagini acoperind intervalul de timp ianuarie 2015-iunie 2017. Datorită rezoluției temporale mari asigurate de satelitul Sentinel-1A (12 zile), precum și a disponibilității gratuite, au putut fi prelucrate un număr foarte mare de imagini pentru fiecare an (20 pe an).

Atât datele TSX cât și datele Sentinel-1 sunt calibrate aprioric descărcării de pe platformele unde sunt disponibile. Primul pas în cadrul prelucrării acestor date de către operator a fost estimarea poziției exacte a satelitului pe orbită în momentul preluării imaginii, prin definirea orbitelor precise puse la dispoziție de către ESA prin intermediul site-ului menționat mai sus.

7.1.1. Etapele prelucrării prin tehnica Țintelor Persistente (PS)

Fig. 7.1 descrie în detaliu procesul de prelucrare a imaginilor SAR prin tehnica PS. Fiecare pas este detaliat ulterior în subcapitole.

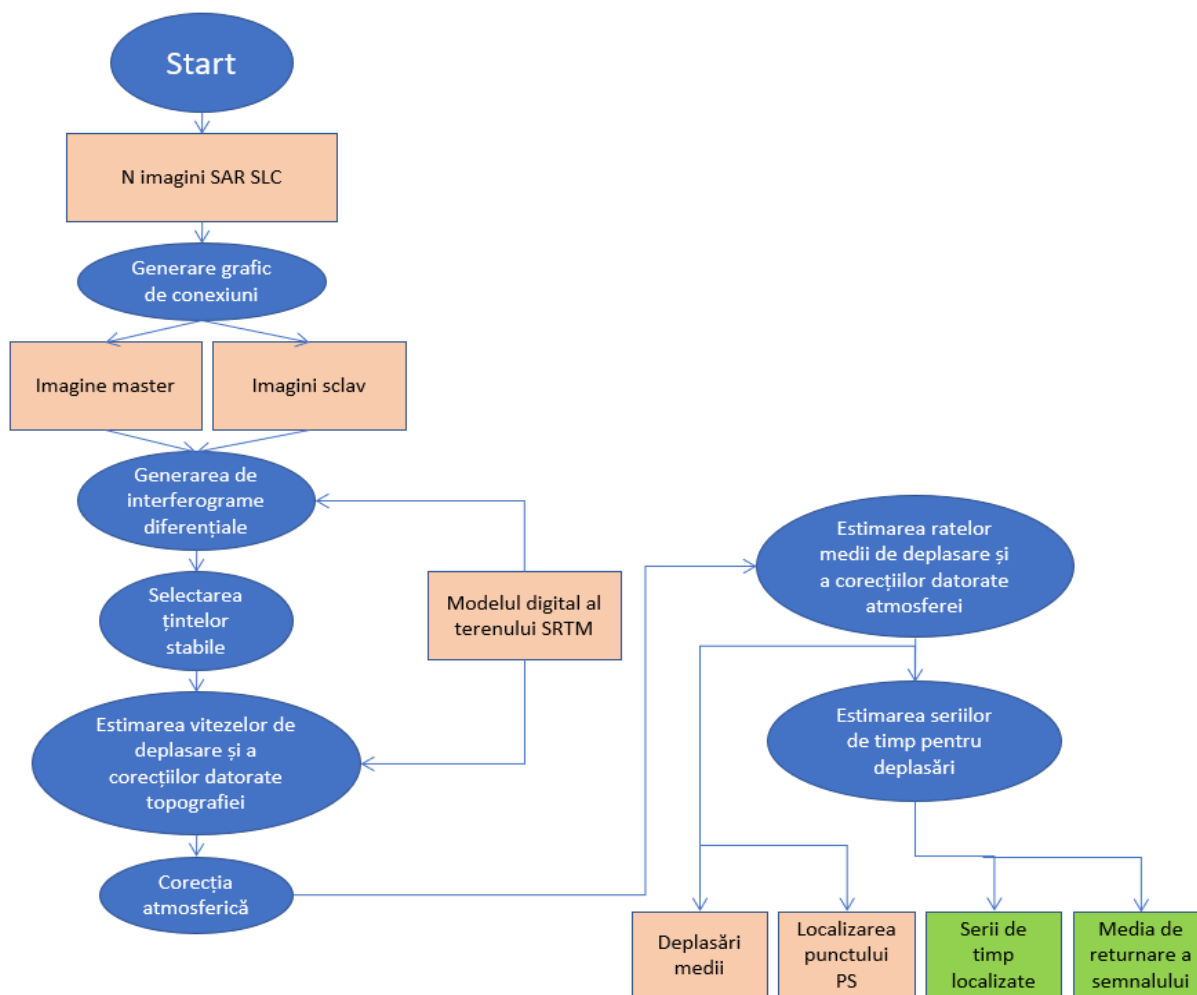


Figura 7.1. Prezentarea etapelor de prelucrare prin tehnica PS

7.1.2. Prelucrarea datelor utilizând tehnica SBAS

Algoritmului SBAS (Small BAseline Subset) propus de către Berardino ș. a., (2002) este o altă tehnică interferometrică SAR multitemporală care se bazează pe alegerea baze de preluare spațiale și temporale optime între imaginile care formează interferogramele în vederea reducerii zgomotului datorat decorelărilor în timp sau influențelor atmosferice.

Această prelucrare introduce diferențe în considerentele privind crearea generarea interferogramelor, rezolvarea ambiguităților de fază și modelele utilizate pentru determinarea deplasărilor multitemporale. În primul rând, tehnica se bazează pe coerența suprafețelor, și astfel ia în considerare distribuția spațială a zonelor coerente, și nu a unor ținte discrete. În timp ce tehnica PS determină deplasări liniare ale țintelor coerente, tehnica SBAS utilizează modele cvadractice și cubice pentru determinarea deplasărilor, ceea ce face posibilă identificarea variațiilor în deplasări (Fig. 7.2).

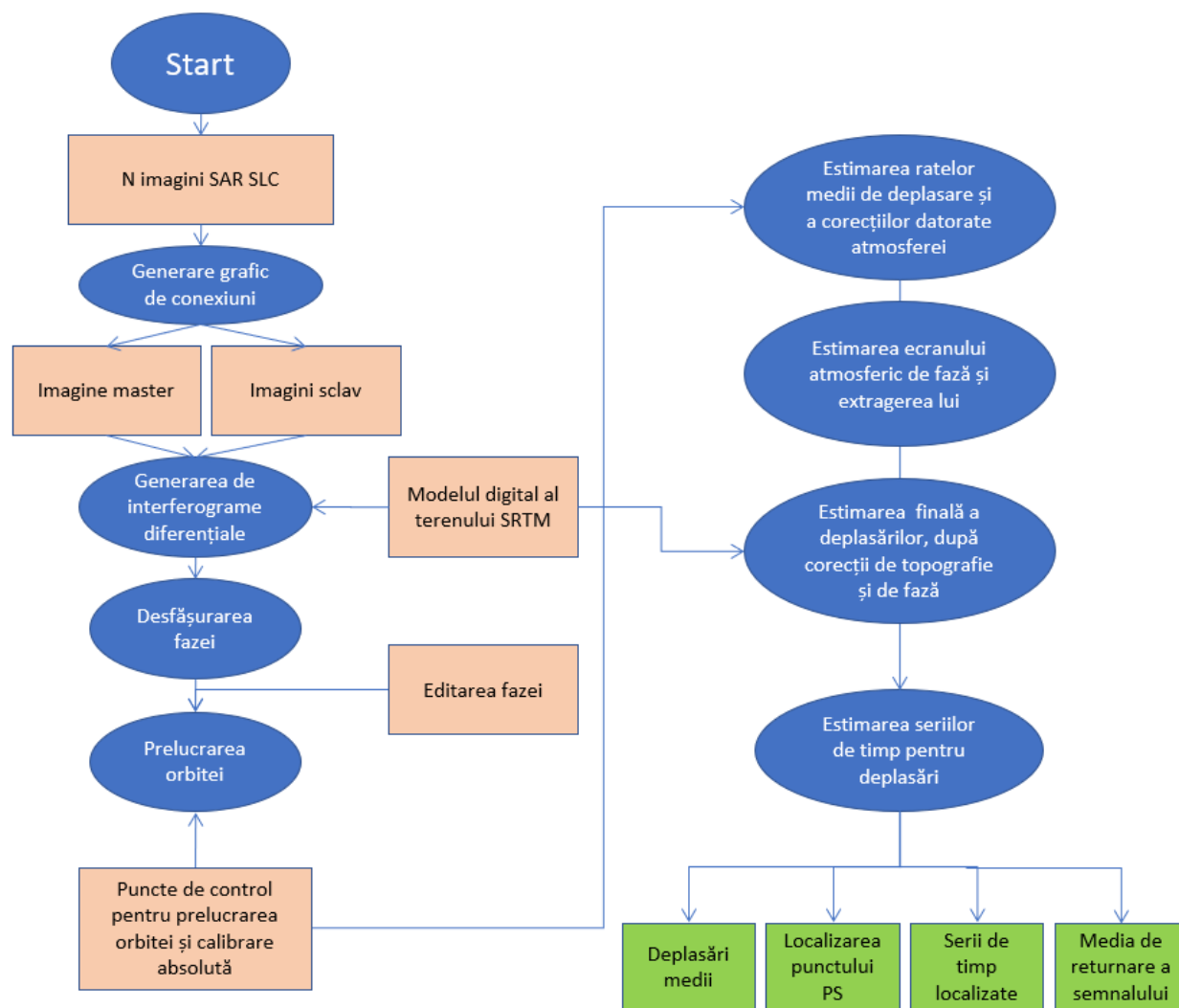


Figura 7.2. Prezentarea etapelor de prelucrare prin tehnica SBAS

7.1.3. Prezentarea rezultatelor în urma prelucrărilor PS și SBAS pentru orașul București

Punctele georeferențiate rezultate în urma prelucrării tuturor seturilor de date satelitare au fost reprezentate cu ajutorul programului ArcGIS v. 10.2 (ESRI 2016), fiind suprapuse pe imagini satelitare Landsat, preluate în anul 1996, 2005, 2012 și 2016 și ortofotoplanul orașului București realizat în 2010.

Valorile pozitive (verde-albastru) pentru vitezele anuale de deplasare în lungul liniei de vizare a satelitului, corespund unei diminuări a distanței dintre țintă și satelit, cauzată de o ridicare în timp a țintei observate. Valorile negative, reprezentate prin roșu-galben, corespund unei creșteri a distanței dintre țintă și satelit de-a lungul liniei de vizare. Mărirea distanței dintre senzor și țintă corespunde unei subsidențe a obiectului observat. Din prelucrările PS au rezultat patru baze de date ce conțin informații despre deplasările suprafeței terestre în București, fiecare fiind corespunzătoare unui anumit interval de timp. Prelucrarea SBAS a fost aplicată doar pe imaginile TSX, pentru a scoate în evidență diferențele cu privire la valorile vitezelor anuale de deplasare precum și liniaritatea deplasărilor determinate pe baza aceluiași set de date inițial, utilizând algoritmi de calcul diferiți.

Tehnicile aplicate au dus la determinarea deplasărilor de ordinul milimetrelor pentru țintele coerente de pe teritoriul orașului, permițând o privire de ansamblu asupra deformațiilor suferite de suprafața terestră. Valorile deformațiilor obținute de fiecare dintre senzori sunt relative la punctul de referință selectat în etapa 3 de prelucrare a algoritmului PS, considerat stabil. În cazul prelucrării cu ajutorul algoritmului SBAS, a fost aleasă o suprafață considerată cât mai stabilă din punct de vedere geologic și geomorfologic, relativ la care s-au calculat deplasările detectate de fiecare senzor, astfel încât valorile să poată fi comparate.

Majoritatea punctelor rezultate în urma prelucrărilor se concentrează în zona centrală a orașului, dar există și un număr semnificativ de puncte aflate la periferie.

7.1.3.1. Perioada 1992-2000

Din analiza imaginilor ERS prelucrate au rezultat 40 000 de puncte, adică o densitate de aproximativ 100 puncte/km². Viteza de deplasare a punctelor este cuprinsă între -24 și 24 de mm/an, dar cele mai frecvente valori se încadrează în intervalul -3 – 3 mm/an. Precizia determinărilor este de ± 0.3 mm/an.

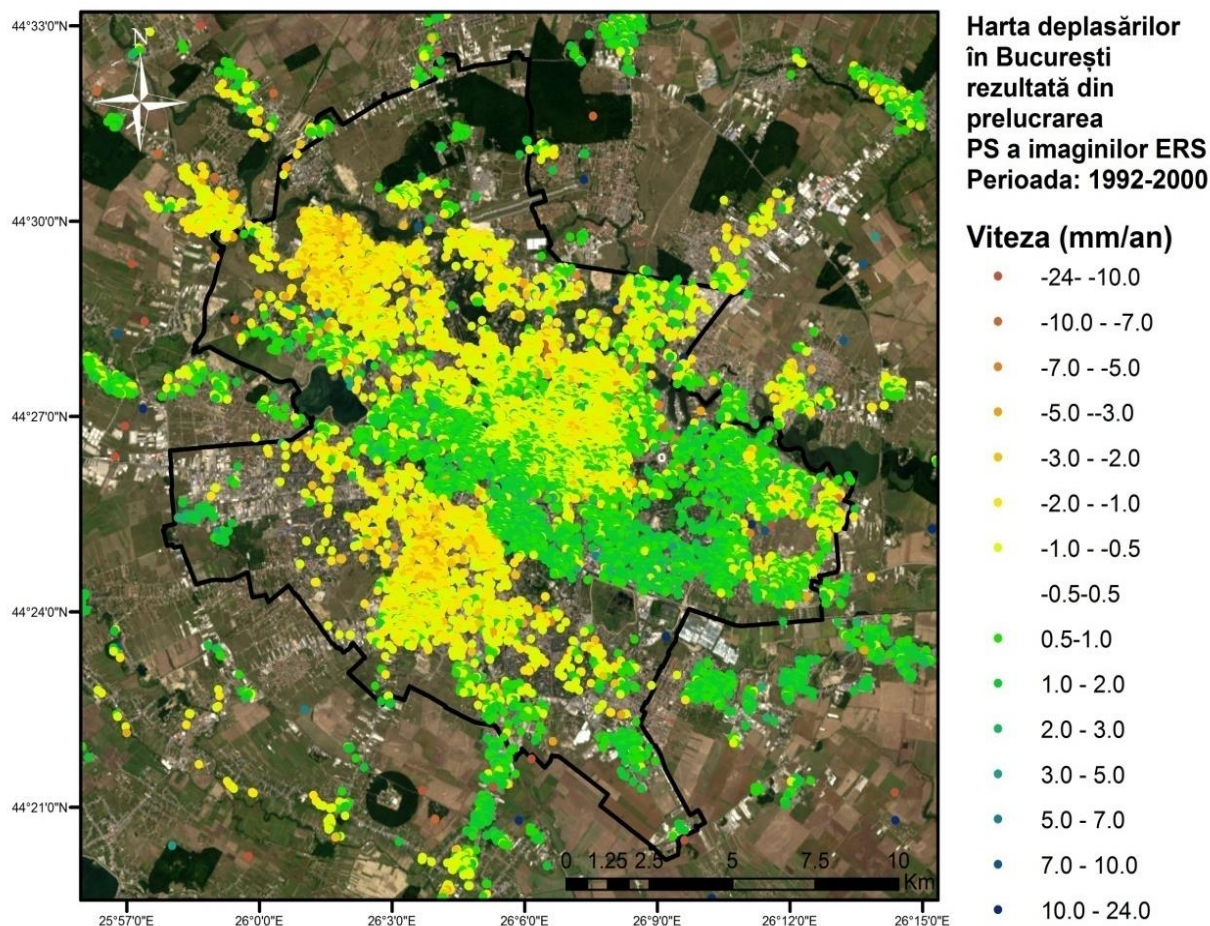


Figura 7.3. Harta deplasărilor în București rezultată din prelucrarea PS a imaginilor ERS, perioada: 1992-2000

7.1.3.2. Perioada 2001-2010

Imaginile Envisat sau fost caracterizate de o amplitudine mai mare a semnalului și de coerență mai mare a interferogramelor. Densitatea Țintelor persistente identificate prin analiza interferometrică este de 150 puncte/km², rezultată dintr-un număr de 60 000 de puncte. Viteza de deplasare determinată este cuprinsă între -25 și 20 mm/an, însă cea mai mare frecvență a punctelor este întâlnită în intervalul -3 – 3 mm/an.

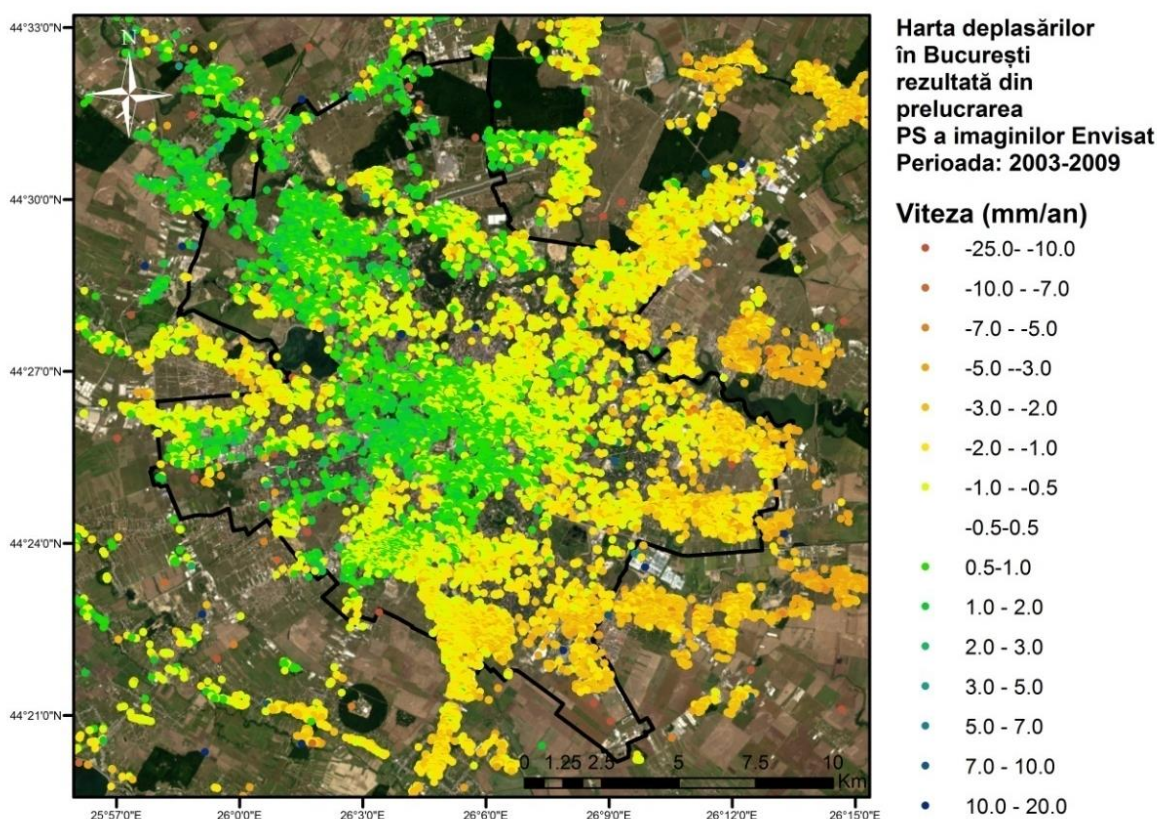


Figura 7.4. Harta deplasărilor în București rezultată din prelucrarea PS a imaginilor Envisat, perioada: 2003-2009

7.1.3.3. Perioada 2011-2014

Din cauza numărului mare de Ținte persistente identificate în cele 26 de imagini TSX, și a dificultăților întâmpinate în prelucrare din cauza zonelor necoerente care înconjoară orașul, aria analizată a fost restrânsă. Numărul de puncte determinate este de 600 000, rezultând o densitate de densitate de 1500 puncte/km². Viteza de deplasare anuală este cuprinsă între -24 și 25 mm/an. Precum în cazul imaginilor ERS și Envisat, frecvența punctelor este mai mare în intervalul restrâns -3 – 3 mm/an. Precizia de determinare a vitezelor de deplasare este ± 0.3 mm/an.

Din prelucrarea SBAS au rezultat valori ale deplasărilor mai mici decât cele rezultate din prelucrarea PS. Valorile vitezelor de deplasare anuală se încadrează cu precădere în intervalul -1.5 – 1.5 mm. Având în vedere considerentele pe care se bazează prelucrarea PS, și anume suprafețe coerente și interpolarea Țintelor coerente, valorile mai mici obținute în urma prelucrării SBAS sunt justificate.

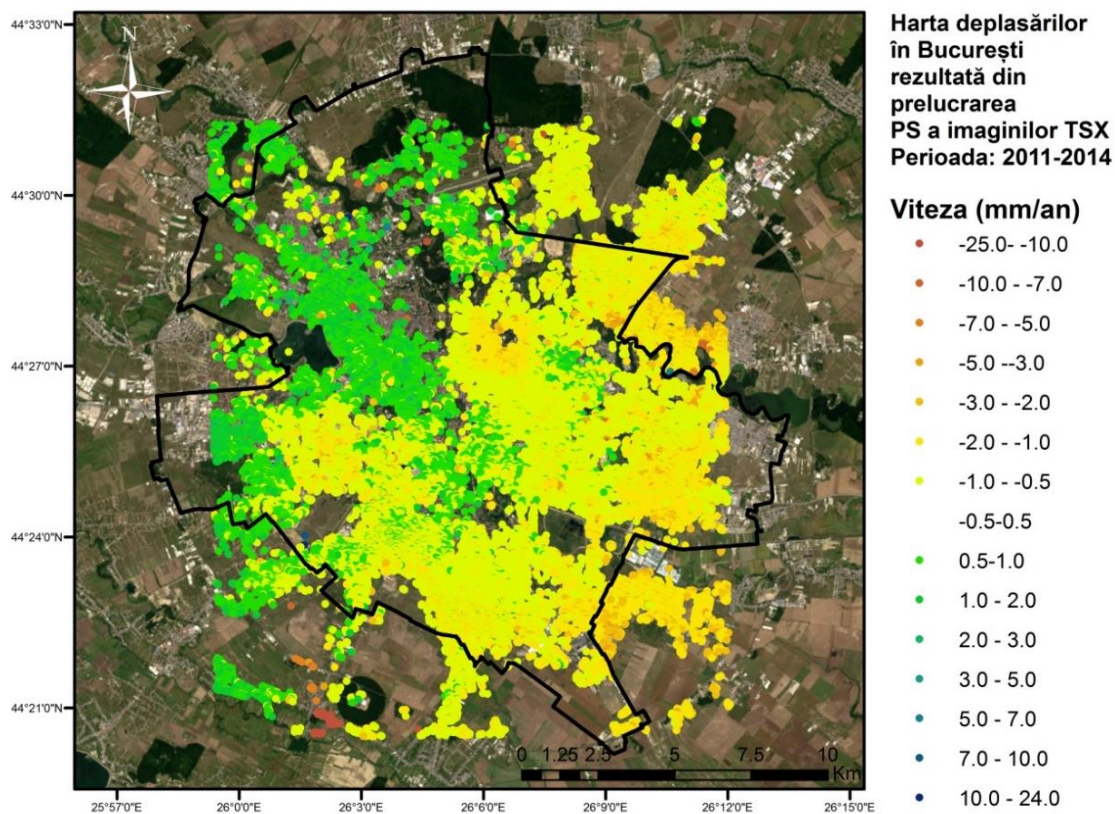


Figura 7.5. Harta deplasărilor în București rezultată din prelucrarea PS a imaginilor TSX, perioada: 2011-2014

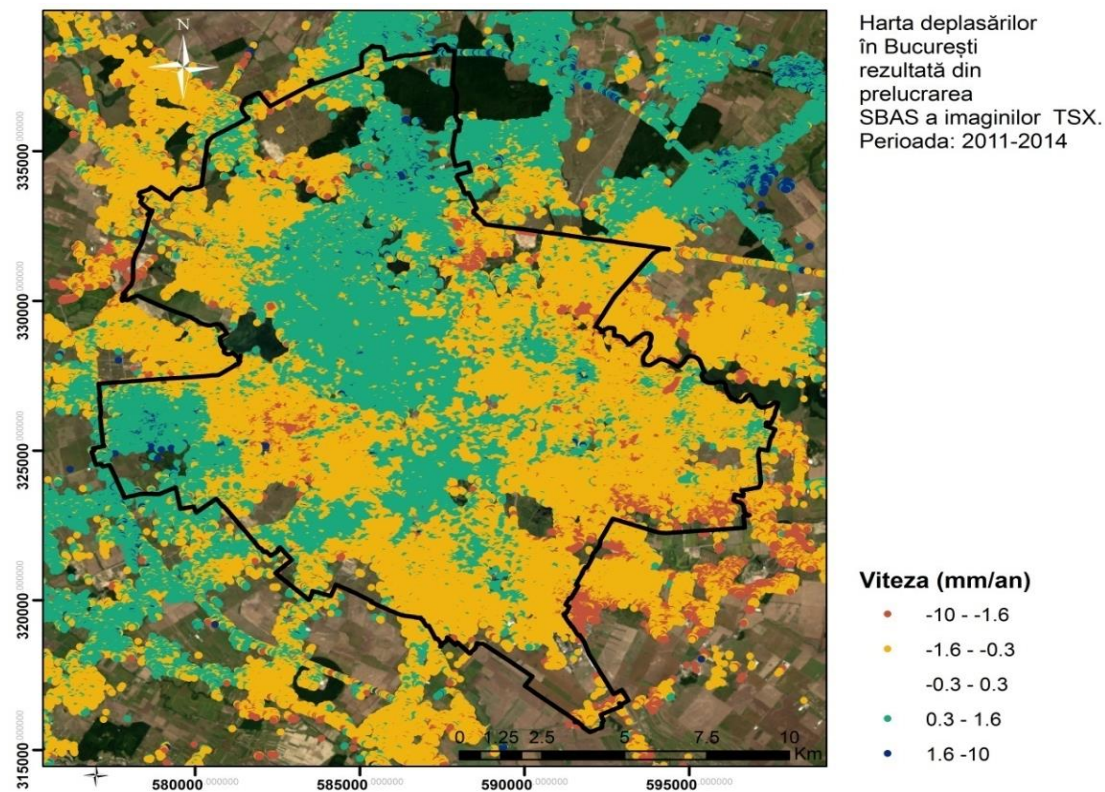


Figura7.6. Harta deplasărilor în București rezultată din prelucrarea SBAS a imaginilor TSX, perioada: 2011-2014

7.1.3.4. Perioada 2015-2017

Rezultatele obținute din prelucrarea imaginilor Sentinel-1A se încadrează în intervalul -16 – 13 mm/an, valori determinate cu precizia de ± 0.3 mm/an. O explicație pentru diminuarea valorilor extreme ale intervalului este mărirea considerabilă a numărului de imagini analizate (61 în comparație cu 26). Cele mai frecvente valori se încadrează, la fel ca în cadrul celorlalte imagini Frecvența cea mai mare a valorilor se încadrează, la fel ca în cazul celorlalte seturi de date obținute, în intervalul -3-3 mm/an. Punctele PS obținute din imaginile Sentinel-1A au cea mai mare densitate spațială comparativ cu celelalte perioade: 1500 puncte/m².

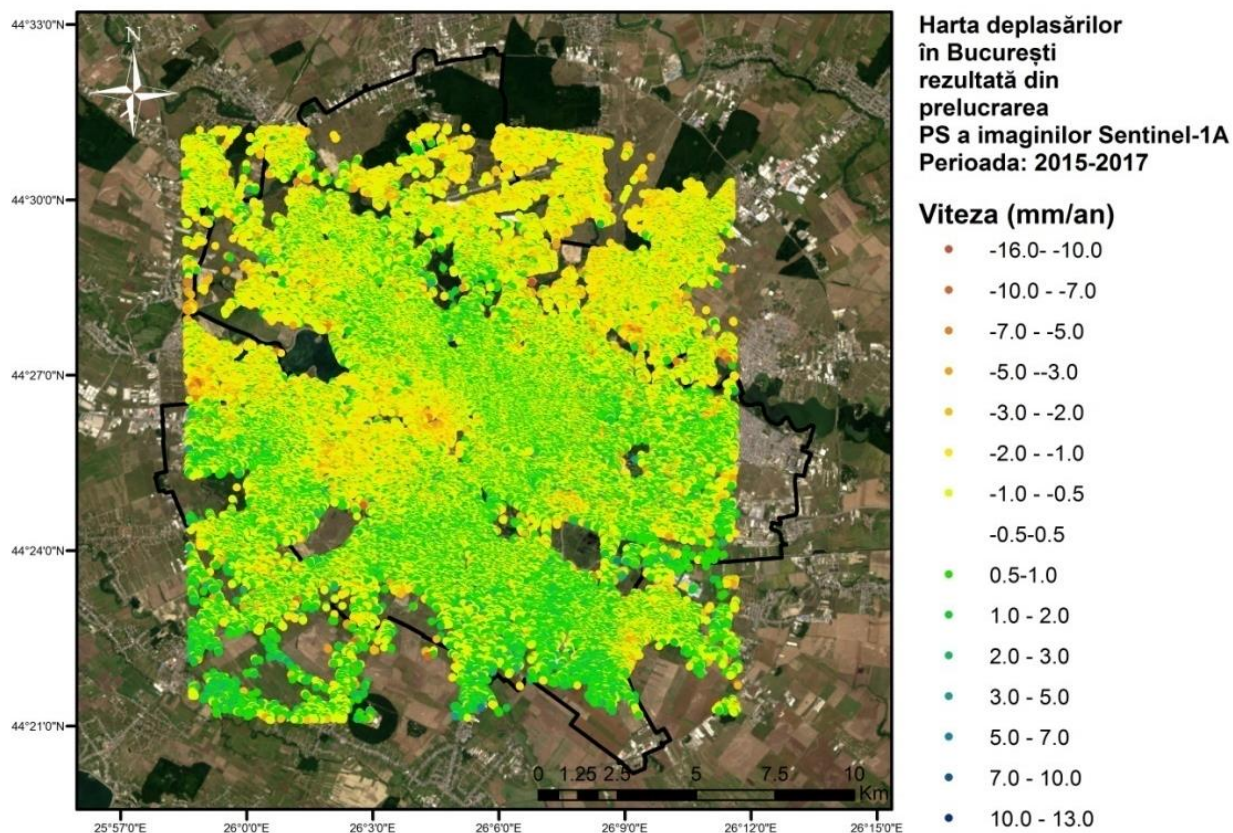


Figura 7.7. Harta deplasărilor în București rezultată din prelucrarea PS a imaginilor Sentinel-1A, perioada 2015-2017

8. ANALIZA TENDINȚELOR DE DEPLASARE A SUPRAFEȚEI TERESTRE ÎN BUCUREȘTI



Figura 8.1. Comparație vizuală albia Dâmboviței –Rezultate 2001-2010

Rezultatele obținute în urma prelucrării tuturor seturilor de date sunt în primul rând asemănătoare din punct de vedere al valorilor vitezelor de deplasare anuale. Valorile mici ale deplasărilor sunt caracteristice zonelor urbane care nu sunt afectate de procese antropice importante care să afecteze în mod remarcabil sau periculos comportamentul suprafeței terestre. Totuși, valorile mici ale deplasărilor pot fi analizate și interpretate din punct de vedere geologic. Valea Dâmboviței reprezintă o zonă de interes pentru astfel de studii, această porțiune este caracterizată de instabilitate, solul fiind nisipos, format din aluviuni aduse de cele două râuri (Fig. 8.1)

În continuare, au fost analizate formele de relief care au suferit intervenții antropice invazive, presupunând că impactul antropic a impus fluctuații pe termen scurt asupra tendințelor naturale de formare. Pentru diferențierea evoluțiilor naturale de zgomot și de mișcările impuse antropic, au fost selecționate areale test după criteriul impactului antropic, situate pe toate formele de relief și uniform răspândite la nivelul orașului: albia majoră, terase și câmpurile interfluviale ale râului Dâmbovița. Ipoteza de lucru a constatat în prezumția că diferențele în tendințele de deformare care apar între zonele test și perimetrele înconjurătoare vor evidenția reacții adaptive pe termen scurt suprapuse evoluțiilor dinamice pe termen lung. Plecând de la această ipoteză, analiza s-a realizat sistematic pentru suprafețe care au suferit un impact antropic considerabil, și anume parcurile industriale, precum și suprafețe cu instabilitate mare din cauze naturale: zonele mlăștinoase.

8.1. Analiza zonelor mlăștinoase

Arealele mlăștinoase apar de-a lungul fostei albie majore a râului Dâmbovița. Aceste zone sunt caracterizate în prezent de soluri instabile și sunt acoperite cu precădere cu vegetație (parcuri, terenuri acoperite cu verdeață). Din cauza unei densități foarte mici a construcțiilor și implicit a intervențiilor antropice asupra acestor zone, s-a obținut o coerență mică a imaginilor analizate, pentru întreg intervalul (1992-2017) (Fig. 8.2). Numărul limitat de puncte obținute nu a permis o analiză asupra tendințelor, care să conducă la o generalizare a tendințelor de evoluție identificate.

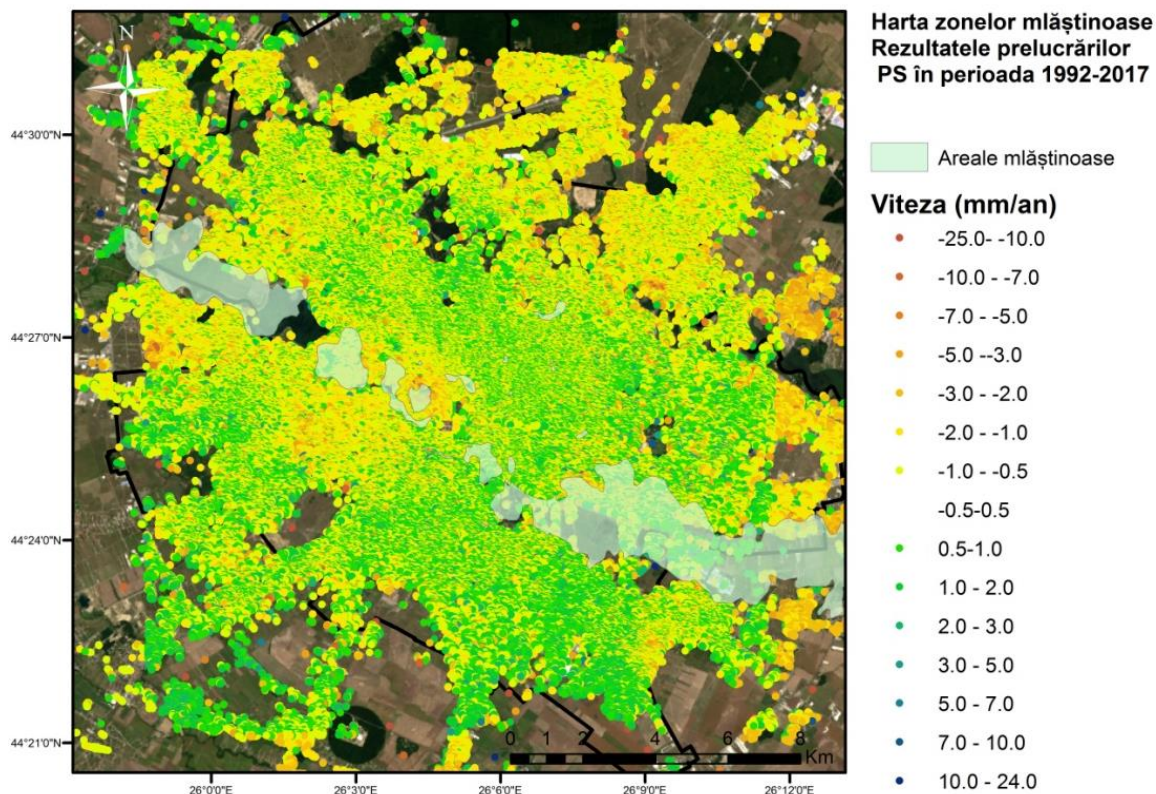


Figura 8.2. Localizarea zonelor mlăștinoase în raport cu rezultatele obținute

8.2. Analiza parcurilor industriale

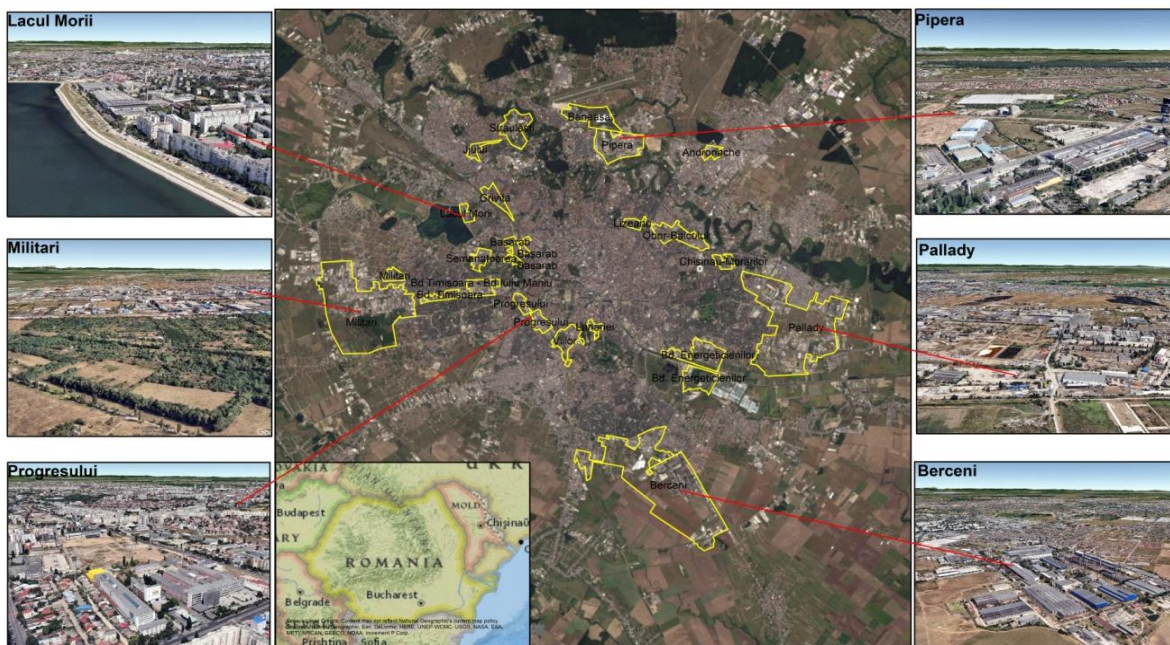


Figura 8.3. Localizarea platformelor industriale în raport cu zona de studiu

În perioada comunistă au luat ființă numeroase obiective industriale, amplasate în exteriorul orașului, ținând seama de întinderea acestuia de la acea vreme. Fabricile aparțineau industriei grele (industria constructoare de mașini), industriei textile, industriei chimice și industriei materialelor de construcții, toate acestea fiind mari consumatoare de apă. Pentru această necesitate, apa era extrasă din pânza freatică – din straturile freatice de Frătești (în special din stratul A). În București, după 1990 toate marile fabrici au fost închise sau și-au schimbat radical domeniul de activitate, astfel că pânza freatică a început să se refacă (Fig. 8.4). În numai 15 ani, între anii 1990 și 2005, necesarul de apă în București s-a înjumătățit.

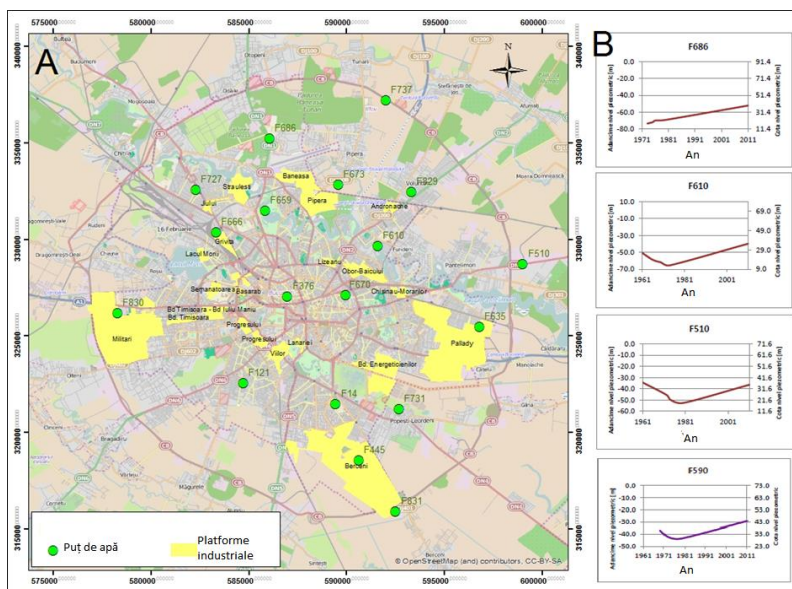


Figura 8.4. (A) Localizarea puțurilor de apă, săpate pentru măsurarea nivelului pânzei freatice, în raport cu parcurile industriale. (B) Grafice care descriu evoluția nivelului pânzei freatice în ultimii 50 de ani (Hartă realizată pe baza studiului lui Ivan M., 2012)

Analiza a 25 de puțuri de apă aflate în proximitatea zonelor industriale studiate, au indicat o creștere a presiunii apei din pânza freatică, mai ales după anul 2000. La nivel național, consumul de apă a scăzut de la 20.5 miliarde de metri cubi în 1990, la 8.45 miliarde în 2010. Aceeași tendință, de reducere a consumului de apă, s-a manifestat și în București, unde industria utilizează 67% din totalul consumului. Prin urmare, închiderea majorității fabricilor din ultimii douăzeci de ani, își pune amprenta asupra reîncărcării pânzei freatice.

În urma analizei mișcărilor parcurilor industriale, în raport cu mișcările zonale și comportamentul pânzei freatice, au fost identificate trei tendințe de mișcare exemplificate în fig. 8.5: o tendință normală (anticipată), de ridicare, și de subsidență continuă.

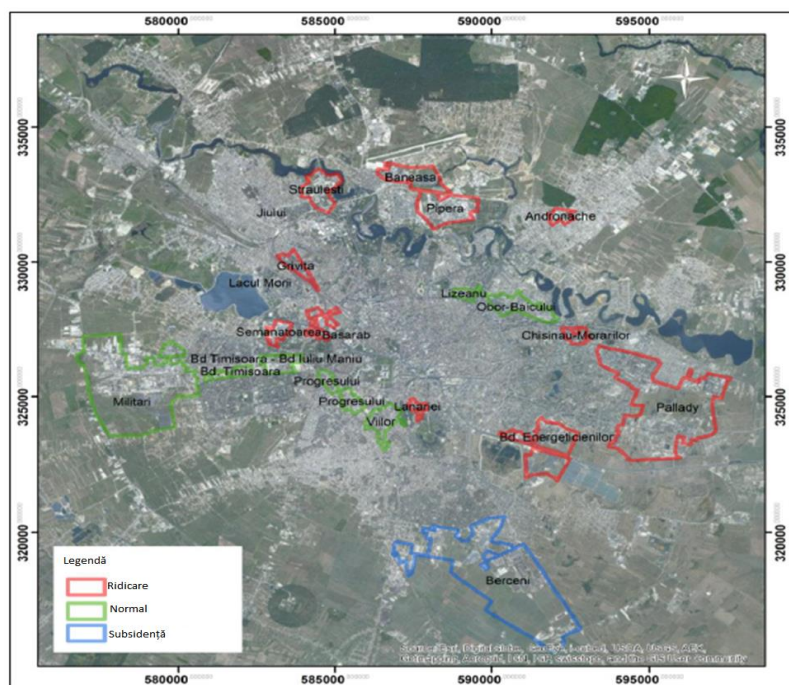
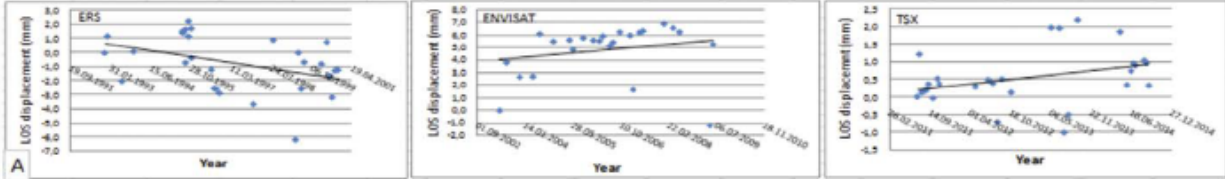
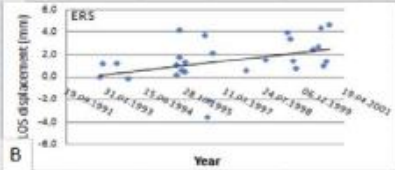
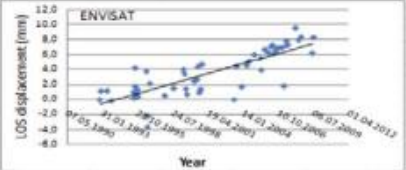
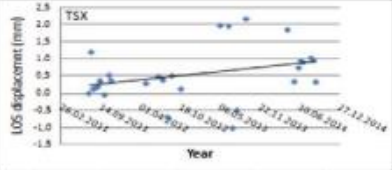
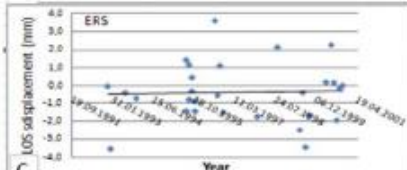
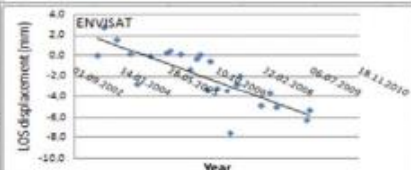
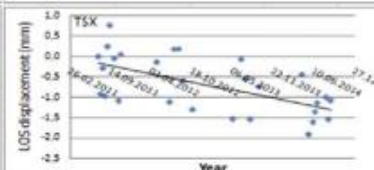


Figura 8.5. Clasificarea platformelor industriale în funcție de tendințele de mișcare pentru perioada 1992-2017

Tabel 8.1. Centralizarea platformelor industriale în funcție de evoluția dinamicii

Tendență	Zona industrială	Geomorfologie	Tipul industriei	Istoric
Normal	Timișoara -Iuliu-Maniu	- Situată pe interfluviul Dâmbovița-Argeș, Câmpia Cotroceni	Producția echipamentelor electronice	- Până în 2008 a activat Uzina de mașini electrice București (UMEB). - Din 2008, UMEB a fost înlocuită cu un centru comercial
	Militari	-Terasele râului Argeș	Materiale de construcții Centrală electric de termoficare Producția echipamentelor electronice	- Cele mai multe fabrici și centrale industriale au avut o expansiune remarcabilă înainte de 1989 - În prezent, acestea funcționează la o treime din capacitatea dinainte de 1989 (CESAROM, CSO – fabrici de material de construcții). - Centrala termică CET-vest , responsabilă cu energia termică în zonă, funcționează la 40% din capacitatea apriorică 1989.
				
Ridicare	Semănătoarea	Lunca Dâmboviței	Producția de echipamente agricole	- Înainte de 1914, cele mai proeminente industrii erau cele de textile. - Industriile grele erau absente - După Primul Război Mondial, începe să se dezvolte industria grea, prin construcția uzinelor Malaxa (Pallady). Aici se construiau mașini grele precum locomotive și motoare, precum și țevi. - Cea mai mare creștere a producției a avut loc între 1960 și 1989; - După 1989, toate fabricile constructoare de mașini s-au închis treptat - Romaero Băneasa construia aeronave înainte 1989 (11 aeronave). După 1990, producția a fost axată pe elemente de aeronave destinate exportului
	Lânăriei		Industrie textilă	
	Pallady (=Malaxa, 23 August)	Terasa râului Dâmbovița	Industria de mașini grele Centrală termică Materiale de construcție	- Fabricile de echipamente electronice au activat înainte de 1989 în Pipera. În ultimii 27 de ani, fabricile au fost fie desființate și demolate, fie au suferit o schimbare a destinației. - Fabrica de procesare a lemnului funcționează la 30% din capacitatea inițială.

	Băneasa	Terasa râului Colentina și câmpia Băneasa	Construcția de echipamente de aviație	
	Pipera		Producția de echipamente electronice	
		Procesarea lemnului		
  				
Subsidență	Berceni =IMGB – mașini grele	Terasa râului Argeș	Industrie grea Energie termică	- IMGB (Întreprinderea de mașini grele București) reprezenta una dintre cele mai mari zone industriale înainte de 1989, cu 6000 de angajați. După 1989, centralele au fost privatizate de investitori străini, sau producția a fost mutată în afara orașului. - Producția și numărul angajaților au scăzut treptat, numărul de angajați ajungând la 700 în prezent. - În 2006, tehnologia și producția au fost îmbunătățite prin investiția unui investitor sud-corean - CET Sud încă funcționează pentru a asigura energia termică pentru aproximativ 25000 de locuitori, ceea ce reprezintă o capacitate de 40% în comparație cu cea de până în 1989 - Această zonă este caracterizată de asemenea de o expansiune continuă a zonei rezidențiale.
  				

8.3. Analiza coerenței contextuale utilizând rezultate PS din date TSX.

Pentru analiza coerenței contextuale s-au utilizat clădirile care suferă degradări în timp la nivelul Bucureștiului, s-a aplicat o analiză orientată pe obiect, într-o zonă de test restrânsă – Centrul Vechi al orașului (Fig. 8.6). Conceptul de coerență contextuală este introdus aici pentru a defini particularitățile mișcărilor clădirilor datorate caracteristicilor acestora. Pentru a verifica ipoteza formulată cu privire la impactul pe care îl are vechimea, structura, înălțimea și locația unei clădiri, a fost aleasă o zonă de studiu sugestivă, centrul vechi al Bucureștiului, care prezintă o gamă variată de construcții. Clădirile studiate au fost selectate și în funcție de cartările existente la nivel terestru care s-a realizat cu precădere în centrul orașului. În analiza mișcărilor clădirilor s-au utilizat rezultatele obținute din prelucrările imaginilor TSX, având în vedere lungimea de undă a semnalului utilizat și implicit a magnitudinii deplasărilor detectate.

Au fost delimitate 6 cvartale care conțin un număr mare de clădiri încadrate în clasa 1 de risc seismic. Clădirile din zona de studiu au regim de înălțime asemănător, 1-2 etaje, și vechime mai mare de 50 de ani. În analiza comportamentului clădirilor, s-a pornit de la premisa că degradările structurale sau de suprafață ar putea fi observate prin interpretarea comportamentului clădirilor reieșit din deplasările punctelor detectate la nivelul acestora. Cu ajutorul imaginilor TSX, care au o rezoluție planimetrică de 3 m, s-au determinat sute de puncte asociate clădirilor. Comparția mișcărilor clădirilor s-a bazat pe determinarea valorilor minime și maxime ale deplasărilor suferite de toate punctele aferente clădirii studiate, determinarea abaterii standard medii a deplasărilor, precum și pe interpretarea reprezentării grafice a variației deplasărilor pentru fiecare punct. Punctele de pe clădiri au fost de asemenea clasificate și reprezentate prin clustere. În continuare este prezentată analiza acestora pentru fiecare cvartal în parte:

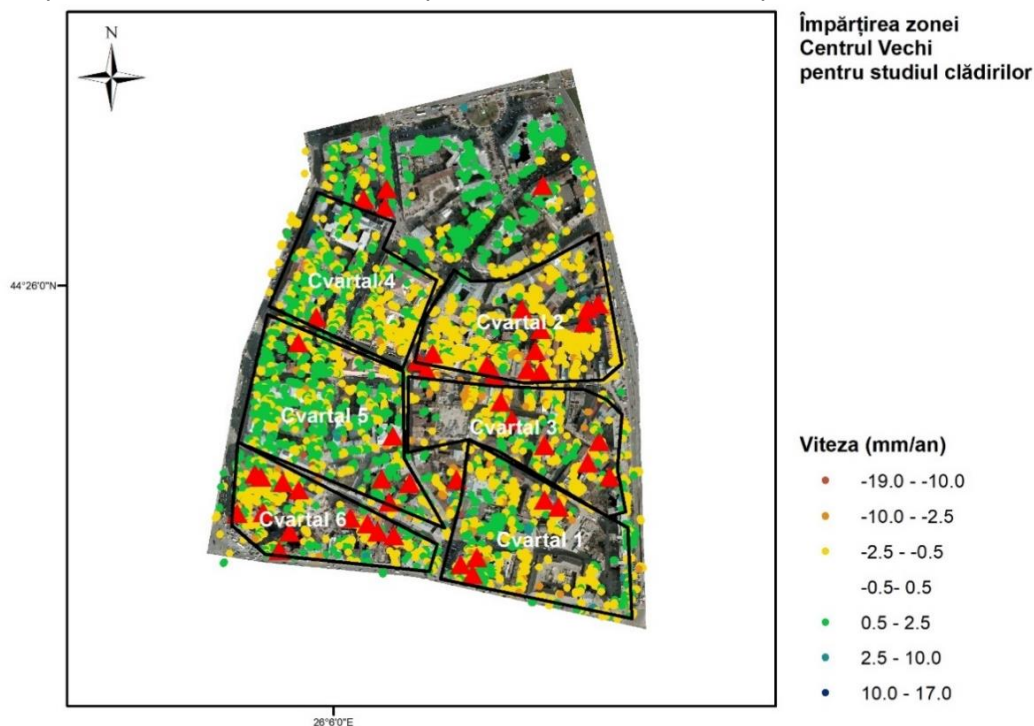


Figura 8.6. Punctele rezultate din analiza PS din imaginile TSX în zona centrului vechi a orașului București. Reprezentarea adreselor clădirilor încadrate în clasa I de risc seismic. Împărțirea zonei de studiu pe cvartale.

Tabel 8.2. Analiza statistică a clădirilor din cvartalele 1-4, clasificate în funcție de încadrarea în clase de risc

Cvartal	Tip clădire	Număr de puncte analizate	Deplasare			
			Media (mm)	Minim (mm)	Maxim (mm)	Abatere standard (mm)
1	Cu risc seismic	180	-2.53	-15.22	6.76	±1.80
	Fără risc seismic	144	-1.32	-11.06	5.65	±2.02
2	Cu risc seismic	143	-2.40	-11.26	7.54	±1.75
	Fără risc seismic	150	-2.23	-10.23	4.56	±1.71
3	Cu risc seismic	44	-2.58	-6.56	3.35	±1.45
	Fără risc seismic	140	-2.44	-6.78	7.34	±1.65
4	Cu risc seismic	151	-1.68	-8.42	7.23	±1.58
	Fără risc seismic	160	-1.34	-6.35	7.34	±1.47

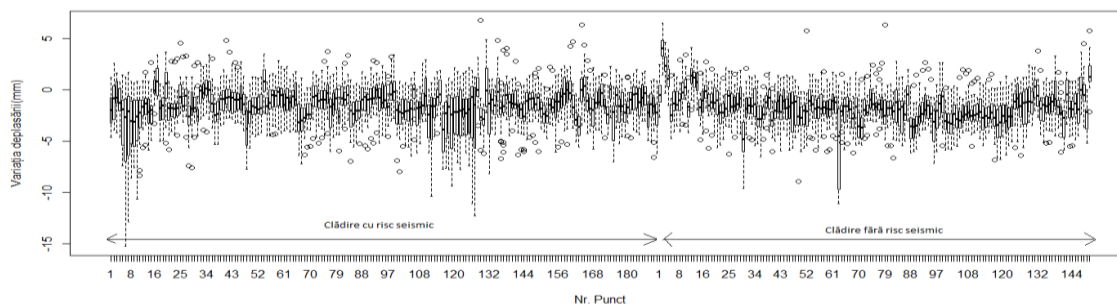


Figura 8.7. Reprezentarea grafică a variației deplasărilor pentru clădirile din cvartalul 1

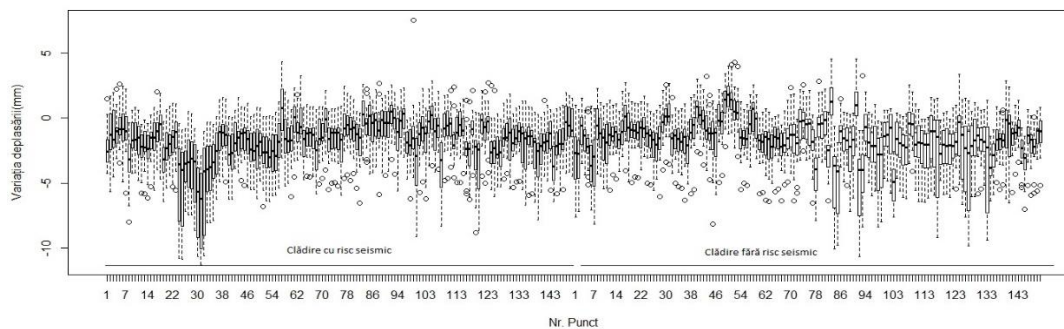


Figura 8.8. Reprezentarea grafică a variației deplasărilor pentru clădirile din cvartalul 2

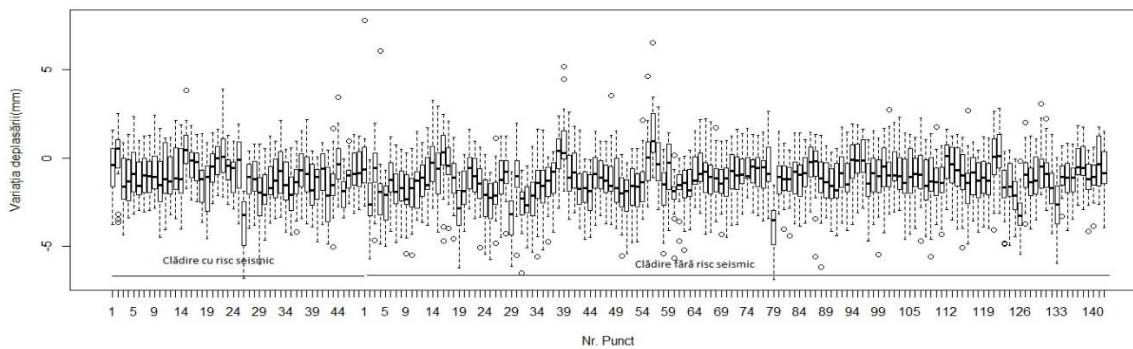


Figura 8.9. Reprezentarea grafică a variației deplasărilor pentru clădirile din cvartalul 3

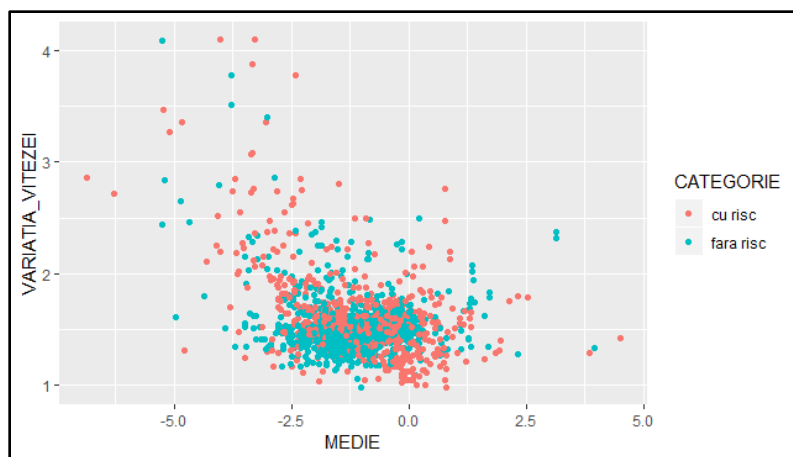


Figura 8.10. Reprezentarea clusterelor corespunzătoare clădirilor cu același nivel de înălțime cu și fără risc

În urma analizei valorilor obținute pentru deplasările și variațiile deplasărilor punctelor, se observă că valorile medii, minime și maxime sugerează diferențe puțin remarcabile între clădiri. Datele statistice nu reprezintă predictorii pentru identificarea clădirilor încadrate în clasa I de risc seismic deoarece atât media deplasărilor cât și variația acesteia sunt indicatori ai proximității clădirilor investigate, ținând cont de faptul că analiza a fost făcută pe clădiri cu regim de înălțime asemănător. În Fig. 8.10, prin generarea clusterelor de punct

aflate pe toate clădirile cu același regim de înălțime, încadrate în clase de risc diferite și aflate în aceeași locație, se observă o diferențiere a variației vitezei între cele două clase, clădirile cu risc seismic afișând o răspândire mai accentuată a valorilor calculate pentru media vitezei anuale de deplasare.

Investigația s-a axat în continuare pe alegerea unor clădiri cu regim de înălțime diferit, pentru a identifica influența însușirilor clădirii asupra deplasărilor detectate cu ajutorul InSAR. În acest scop, s-au ales cvartalele 5 și 6, unde s-au putut identifica 8 construcții neîncadrate în clase de risc seismic, cu regim de înălțime diferit, pentru care s-au calculat următoarele date:

Tabel 8.3. Analiza statistică a clădirilor din cvartalele 5-6, clasificate în funcție de regimul de înălțime

Cvartal	Tip clădire	Număr de puncte analizate	Deplasare			
			Media (mm)	Minim (mm)	Maxim (mm)	Abatere standard (mm)
5	Bloc locuințe – P+7	149	-0.98	-7.98	6.13	±1.38
	Bloc locuințe – P+4	48	-1.25	-7.72	4.34	±1.48
	Bloc de locuințe – P+4	97	-0.50	-5.36	6.21	±1.37
	Clădire individuală – P+1	43	-0.82	-5.55	4.74	±1.42
	Clădire individuală – P+3	99	-0.25	-8.68	5.63	±1.40
	Biserică - P	36	-1.87	-8.07	10.32	±1.37
	Clădire individuală – P+1	76	-0.44	-18.50	4.49	±1.64
	Clădire individuală – P+1	100	0.40	-9.03	8.00	±1.46

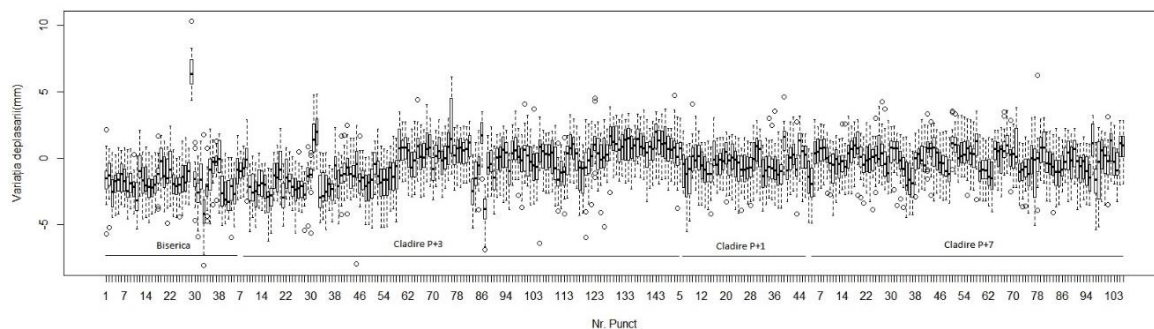


Figura 8.11. Reprezentarea grafică a variației deplasărilor pentru clădirile din cvartalele 5-6, clasificate în funcție de regimul de înălțime

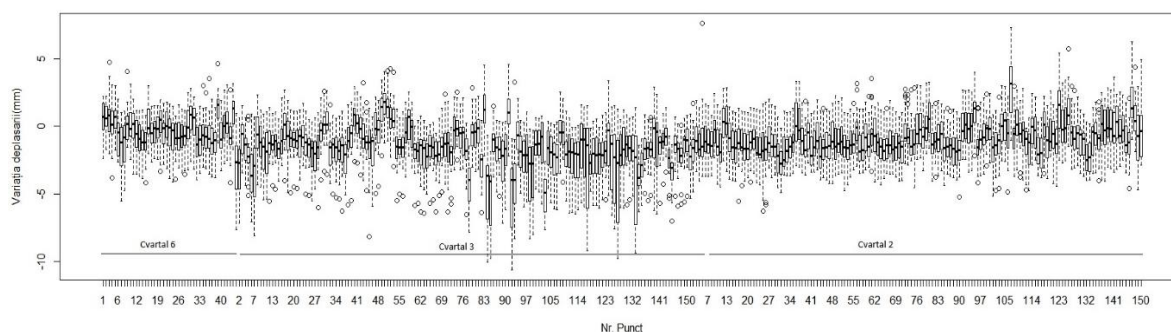


Figura 8.12. Reprezentarea grafică a variației deplasărilor pentru clădirile fără risc seismic din cvartalele 6, 3 și 2

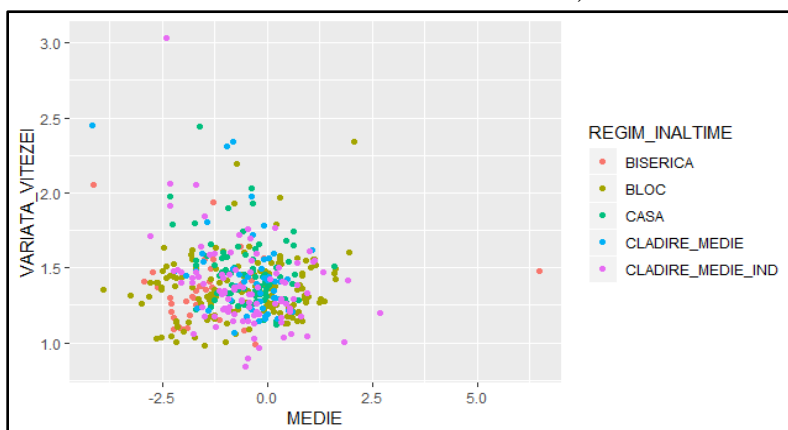
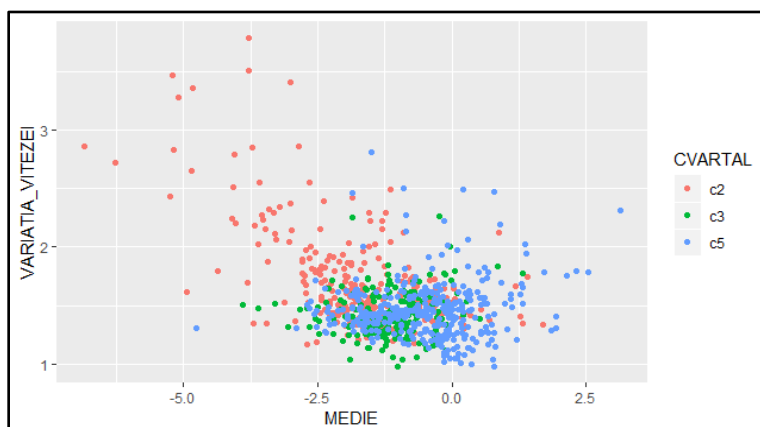


Figura 8.13. Reprezentarea clusterelor corespunzătoare clădirilor fără risc seismic din cvartalele 6, 3 și 2

Figura 8.14. Reprezentarea clusterelor corespunzătoare clădirilor cu același regim de înălțime și fără clasă de risc, aflate în cvartale diferite



Rezultatele inițiale ținând cont de tipul și înălțimea clădirilor a condus la rezultate neconcludente pentru diferențierea mișcărilor în funcție de regimul de înălțime. Privind atât valorile centralizate precum și reprezentarea grafică a variației deplasărilor punctelor de pe clădiri în timp, nu au putut fi identificate clase clar distincte în care acestea să poată fi încadrate în funcție de descrierea mișcărilor punctelor.

Ultima analiză a punctelor aflate pe clădiri a luat în considerare faptul că deplasările înregistrate de satelit se datorează în primul rând influenței deformațiilor suprafeței terestre asupra clădirilor. Având în vedere intervalul de preluare al imaginilor satelitare, 11 zile, care de cele mai multe ori nu poate fi reprodus în prelucrări din cauza influenței condițiilor meteorologice asupra imaginilor, putem presupune că vibrațiile caracteristice ale clădirilor nu sunt surprinse prin prelucrarea liniară a imaginilor satelitare. De asemenea, elementele de fațadă care ar putea suferi deteriorări pe o clădire aflată în stare medie sau gravă de degradare, pot produce deplasări prea mari, care provoacă o pierdere a coerenței în imaginile SAR. În tabelul 8.4, au fost centralizate datele reieșite din comparația datelor statistice calculate pentru clădiri în regim de înălțime P+1, neîncadrate în clase de risc seismic, aflate în cvartale diferite, având deci o distribuție spațială dispersată în toate cele 6 cvartale considerate.

Atât din datele statistice cât și din interpretarea grafică a Fig. 8.11 Fig. 8.12, Fig. 8.13 și Fig. 8.14 reiese că diferențele sesizabile între magnitudinea și variația deplasărilor determinate cu ajutorul prelucrărilor interferometrice, sunt predictorii ai distribuției spațiale a obiectelor analizate, și nu a caracteristicilor individuale ale clădirilor.

Tabel 8.4. Analiza statistică a clădirilor din cvartalele 1-6, care nu prezintă risc seismic

Cvartal	Număr de puncte analizate	Deplasare			
		Media (mm)	Minim (mm)	Maxim (mm)	Abatere standard(mm)
1	144	-1.32	-11.06	5.65	±2.02
2	150	-2.23	-10.23	4.56	±1.71
3	140	-2.44	-6.78	7.34	±1.65
4	160	-1.34	-6.35	7.34	±1.47
5	76	-0.44	-18.50	4.49	±1.64
6	100	0.40	-9.03	8.00	±1.46

Aceeași interpretare a mișcărilor se regăsește și în lucrarea lui Armaș și colab., 2017 [75], în care fisurile apărute pe fațada a patru clădiri individuale, Palatul Parlamentului, Colegiul Lazăr, Arhiva Națională și sediul Primăriei, au fost măsurate cu ajutorul unui unei busole geologice. Orientarea fisurilor apărute pe fațada clădirilor arată o corespondență între clădirile aflate în proximitate, și diferențe față de clădirile aflate într-o zonă diferită din punct de vedere geomorfologic. Prin urmare, Palatul Parlamentului arată o dispunere orientată cu precădere pe direcția est-vest, care se regăsește și în clădirea sediului Primăriei. În sediul Arhivei naționale și Colegiul Lazăr, fisurile sunt dispuse SVV-NEE. Sediul Primăriei, sediul Arhivei naționale și Colegiul Lazăr arată și fisuri dispuse pe direcția nord-sud, care nu sunt observate pe clădirea Palatului Parlamentului.

8.4. Analiza seriilor cronologice pentru identificarea fenomenului de subsidență cauzat de construcția magistralei M5 de metrou

8.4.1. Prezentarea evenimentelor

În București, 750 000 de persoane folosesc metroul zilnic pentru transport, în timp ce mașina personală este folosită pentru mai mult de 900 000 de transferuri în oraș. În ultimii ani, creșterea populației din București, împreună cu solicitarea rețelelor de transport, au determinat autoritățile să ia în considerare îmbunătățirea condițiilor de transfer subterane astfel încât să devină principalul mijloc de transport până în 2030. Rețeaua actuală este formată din 4 artere: M1, M2, M3 și M4. În total, acestea au o lungime de 70 km și au 51 de stații, cu aproximativ 1,5 km distanță între ele. În cadrul programului *Strategia Globală pentru Dezvoltare și Modernizarea Transportului Metroului din București 2008-2030*, sunt plănuit investiții de 8,5 miliarde de euro pentru a extinde rețeaua de metrou prin prelungirea arterelor existente sau prin construirea de magistrale noi.

Figura 8.15 prezintă rețeaua actuală de metrou reprezentată cu linii continue și arterele care sunt în curs de construcție în prezent sau care vor fi construite conform proiectului, reprezentate aici cu linii punctate. Prima arteră care se construiește este M5 și se află în construcție începând cu anul 2011 și era planificată să fie finalizată la sfârșitul anului 2017. Construcția sa a fost etapizată în mai multe secțiuni: tronsonul Râul Doamnei-Universitate (Etapa 1 1- Râul Doamnei-Eroilor și Etapa 2 - Eroilor - Universitate) și tronsonul Universitate - Pantelimon.

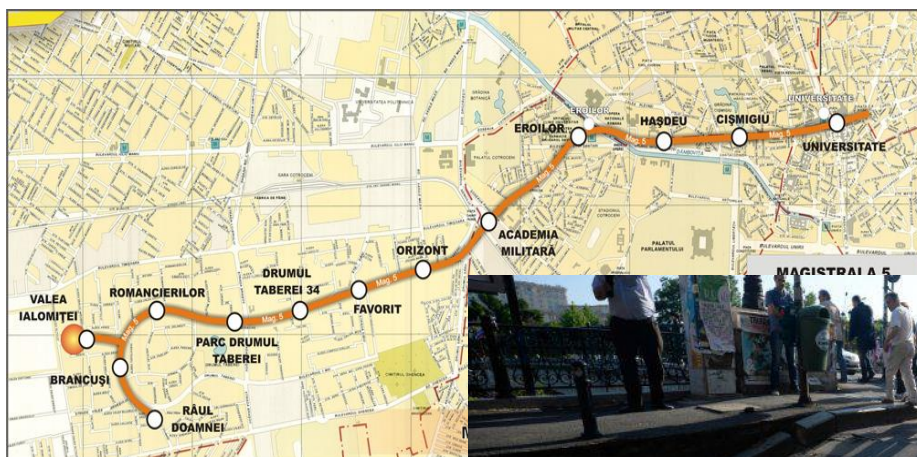


Figura 8.15. Reprezentarea magistralei 5 de metrou, tronson Râul Doamnei-Universitate (sursa: Metrorex)

Figura 8.16. Surpare în zona stației de metrou Eroilor (Sursa: www.Adevărul.ro)



Săpăturile pentru tunelul tronsonului Râul Doamnei-Eroilor a început pe 25 septembrie 2013, până aproximativ 90% din lucrările de structură fiind realizate până în 2016. Data estimată a utilizării secțiunii pentru stația Eroilor este prima parte a anului 2018. Lucrările la magistrala 5 de metrou au fost marcate de evenimente la începutul anului 2015, când o parte din carosabilul aflat deasupra construcției s-a surpat, afectând și o parte din clădirile din zonă (Fig. 8.16)

Din comunicatele de presă, reiese că lucrările au demarat prin amenajarea stațiilor de metrou prevăzute, la începutul anului 2011. Lucrările de forare a tunelurilor interstațiilor au fost demarate în 21 noiembrie 2013, având ca punct de plecare Academia Militară. Lucrările de forare a tronsonului Academia militară-Râul Doamnei au fost finalizate în ianuarie 2015, prin execuția tunelului pentru interstația Orizont-Favorit. Pe 3 februarie 2015, TBM (Tunnelling Boring Machine) Varvara a fost trimisă spre Academia Militară pentru a începe misiunea de forare către stația Eroilor 2.

La data de 14 decembrie 2015, au fost semnalate evenimente constând în surparea asfaltului la intersecția dintre Bd. Eroilor și Bd. Eroii Sanitari, în proximitatea stației de metrou Eroilor 2. În funcție de tendințele de mișcare observate în imaginile TSX și Sentinel-1, analiza a fost împărțită pe tronsoane ale magistralei: Eroilor-Academia Militară, Academia Militară-Drumul Taberei, Drumul Taberei-Râul Doamnei. Luând în considerare evenimentele produse în zona stației Eroilor, precum și observarea unei tendințe clare de subsidență localizată în zona problematică, aceasta a fost tratată separat. Pentru analiza eventualelor subsidențe cauzate de construcția magistralei de metrou, a fost reconstituit traseul acestuia cu ajutorul planurilor de execuție, și au fost alese punctele PS aflate la o distanță de maxim 100 de metri liniari de ambele părți ale metroului (Fig. 8.17). Pentru analiza prin intermediul seriilor cronologice ale deplasărilor, au fost utilizate punctele PS rezultate din imagini TSX pentru perioada 2011-2014 și imagini Sentinel-1 pentru perioada 2014-2017.

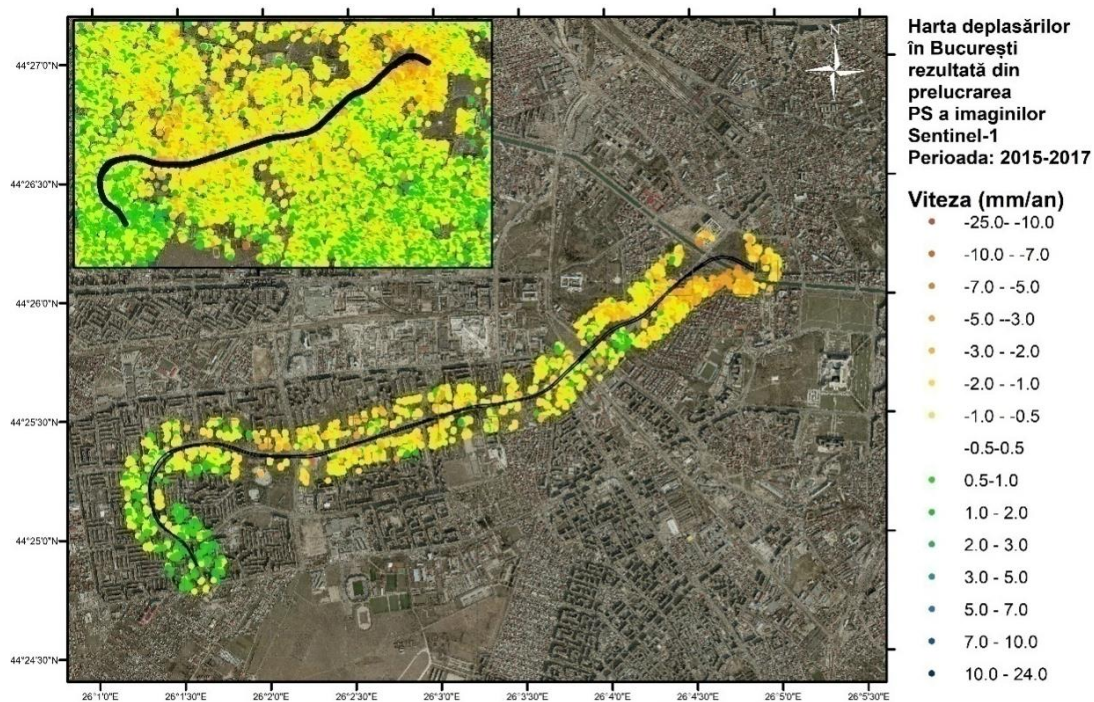


Figura 8.17. Harta deplasărilor în București - zona magistralei 5 de metrou, pentru perioada 2015-2017

8.4.2. Analiza subsidențelor de-a lungul tronsoanelor de metrou

8.4.2.1. Analiza tronsonului Eroilor-Academia Militară pentru perioada 2011-2017

Analiza seriilor de timp rezultate pentru punctele PS obținute pentru perioada 2011-2014 arată o tendință de stabilitate a suprafeței terestre. Cu o valoare medie a vitezelor de deplasare de 0.18 mm/an și o precizie de determinare a acesteia de 0.22 mm/an, valorile pot fi considerate zgomot. Punctele obținute pentru intervalul 2015-2017 arată o tendință ușoară de subsidență, cu o viteză de -0.92 mm/an. Valorile maxime ale subsidenței au atins -4 mm/an în ultimul an, putând fi considerate stabile pentru zonele suprafeței terestre aflate deasupra unei construcții subterane în desfășurare.

8.4.2.2. Analiza tronsonului Academia Militară-Drumul Taberei, pentru perioada 2011-2017

Tronsonul Academia Militară-Drumul Taberei a fost caracterizat de mișcări de subsidență mici, atât înainte cât și după anul 2015. Pentru perioada 2011-2014, imaginile TSX arată o rată de subsidență de -0.65 mm/an, cu deplasări ce ajung la 3.5 mm față de poziția inițială. Din imaginile Sentinel-1, pentru perioada 2014-2017 reies de asemenea valori ale subsidenței de aproximativ 3 mm, dar viteza de deplasare este mai mare, de -1.20 mm/an.

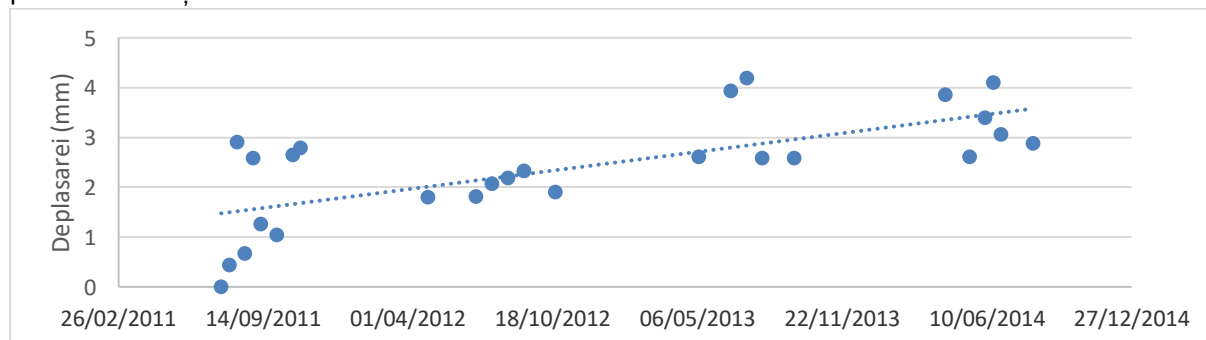
8.4.2.3. Analiza tronsonului Drumul Taberei-Râul Doamnei, pentru perioada 2011-2017

Chiar dacă nici pentru celelalte tronsoane, exceptând zona Eroilor, deplasările nu se manifestă prin valori care să provoace nesiguranță, zona tronsonului Taberei-Râul Doamnei este singura caracterizată de stabilitate atât înainte cât și după anul 2015. Punctele obținute din imaginile TSX pentru această zonă arată viteze de deplasare medii de 0.15 mm/an cu o precizie de determinare de ± 0.22 mm/an. Punctele PS obținute cu ajutorul imaginilor Sentinel-1, arată viteze medii de deplasare de -0.32 mm/an. Având în vedere faptul că precizia măsurătorilor este de ± 0.51 mm/an, valorile determinate sub această valoare sunt considerate zgomot.

8.4.2.4. Analiza zonei Bd-Eroilor-Bd. Eroii Sanitari pentru perioada 2011-2017

În perioada 2011-2014 (Fig 8.18), punctele din zona Eroilor erau caracterizate de o mișcare ușoară de ridicare, cu o viteză medie de 0.80 mm/an, cu valori maxime ale deplasărilor ajungând până la 5 mm. Această mișcare se încadrează în tendințele identificate pentru zona studiată, cauzate de caracteristicile geomorfologice ale suprafeței terestre. Eventualele deplasări cauzate de săpăturile în stația Eroilor nu ar fi putut fi observate în primul rând din cauza lipsei coerenței semnalului în zone care suferă schimbări rapide, precum stațiile de metrou aflate în lucru. În Fig. 8.24 au fost reprezentate punctele aflate pe clădirile care la momentul evenimentelor au fost evacuate din cauza pericolelor iminente privind structura de rezistență. Se poate observa faptul că perioada Noiembrie 2015 – Iulie 2016 este caracterizată de o subsidență accelerată a punctelor aflate pe clădiri, după care urmează o perioadă de stabilizare

Din anul 2015, pentru imaginile Sentinel-1 se observă o tendință de subsidență accentuată, cu viteze medii de deplasare de -6 mm/an, care nu sunt considerate tipice pentru zona considerată, caracterizată în general de viteze medii de +1 mm/an. Stația Eroilor se află în raza de acțiune a albiei Râului Dâmbovița, care prin depunerea de aluviuni provoacă o ridicare constantă dar foarte înceată a vecinătăților. Imaginile Sentinel-1 arată o subsidență de aproximativ 20 mm între ianuarie 2015 și iunie 2017. Prevederile pentru construcția în siguranță a liniilor de metrou au stabilit la demararea lucrărilor un prag de 10 mm/an pentru subsidența considerată sigură pentru buna desfășurare acțiunilor de foraj pentru interstații.



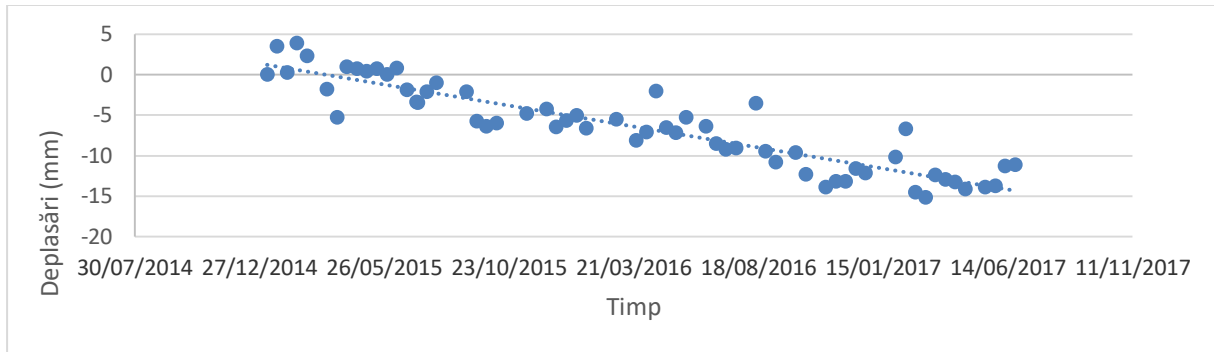


Figura 8.18. Serii de timp pentru deplasările punctelor din zona magistralei 5 de metrou - intersecția Bd. Eroilor-Bd. Eroii Sanitari pentru perioada 2011-2014 (sus) și perioada 2015-2017 (jos)

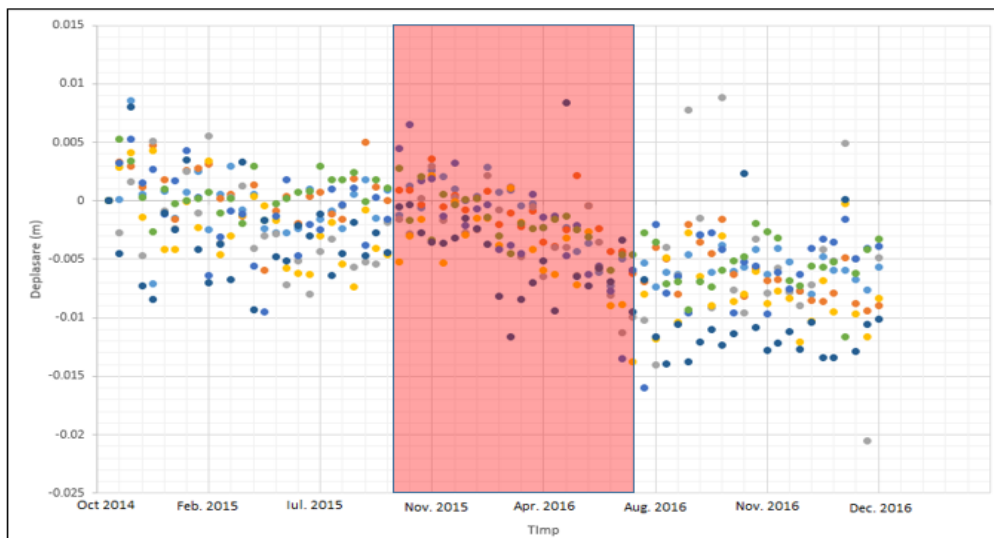


Figura 8.19. Serii de timp caracteristice punctelor aflate pe clădirile afectate de evenimentele de la stația Eroilor. Evidențierea perioadei Noiembrie 2015-Iunie 2016 caracterizată de instabilitate crescută (Bulevardul Eroilor Sanitari nr.55)

8.4.3. Validarea deplasărilor determinate în zona stației de metroului Eroilor

Cu ajutorul tehnicilor interferometrice este măsurată deplasarea în lungul liniei de vizare. În scopul validării rezultatelor obținute din prelucrările interferometrice, au fost determinate deplasările pe verticală ale unui punct de stație utilizând tehnici GNSS. În anii 2015 și 2016 au fost efectuate mai multe etape de măsurători GNSS statice în zona stației de metrou Eroilor (Fig. 8.20). Măsurătorile s-au realizat cu ajutorul unui receptor GNSS instalat utilizând un sistem cu centrare forțată. Receptorul GNSS utilizat, de tip Topcon Hiper Pro are o precizie verticală de $\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$. Măsurătorile au fost prelucrate utilizând programul Topcon Tools, rezultatele fiind în final proiectate în sistemul de referință WGS 84. Receptorul GNSS a făcut parte dintr-o rețea de 20 de puncte a căror poziție a fost determinată prin măsurători statice în vederea validării rezultatelor GNSS obținute pentru mai multe locații din București [74]. În vederea validării rezultatelor InSAR pentru zona analizată, au fost selectate datele măsurătorilor cele mai apropiate de datele corespunzătoare trecerii satelitului Sentinel-1A deasupra Bucureștiului. În tabelul 8.5 au fost centralizate valorile deplasărilor determinate la fiecare dată a preluării, relativ la epoca 0 considerată la data 25/01/2015. Pentru a putea fi comparate, deplasările medii ale punctelor InSAR aflate la cel mult 50 de m față de locația receptorului GNSS au fost proiectate din direcția liniei de vizare a satelitului pe verticală, prin rezolvarea unui triunghi dreptunghic pentru care se cunoaște valoarea unei catete și a unui unghi (unghiul de incidență al satelitului, cunoscut pentru fiecare punct al imaginii din metadata).

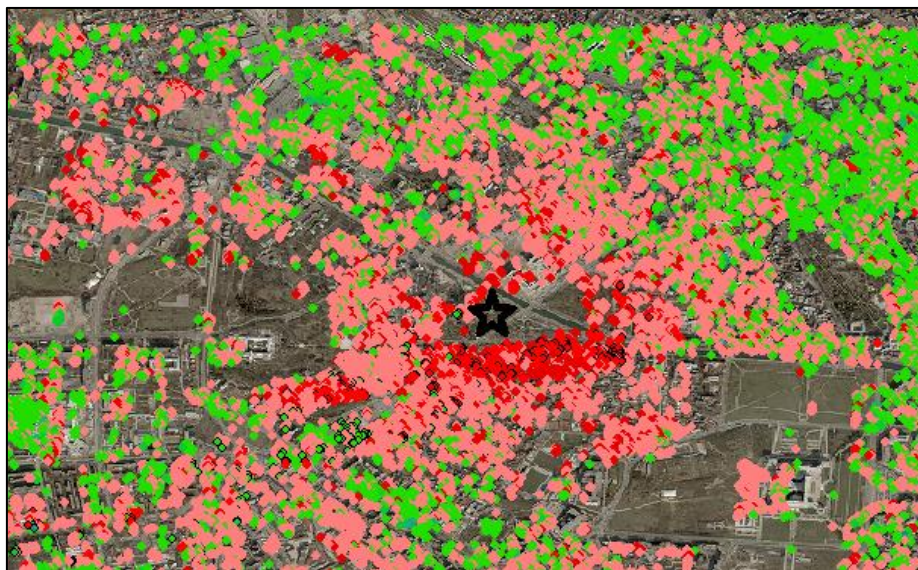


Figura 8.20. Localizarea receptorului GNSS în raport cu punctele determinate prin tehnica Țintelor Persistente

Tabel 8.5. Valorile deplasărilor determinate cu ajutorul tehnicilor PS InSAR și GNSS

	25.01.2015	28.02.2015	21.03.2015	17.04.2015	23.05.2015	03.07.2015	28.07.2015	17.08.2016	09.09.2016	18.10.2016	18.11.2016
InSAR (mm)	0	2.0	-2.1	0.4	0.5	-3.6	-1.3	-9.8	-13.6	-15.2	-16.8
GNSS (mm)	0	-1.0	2.0	2.0	-4.0	-7.0	-8.0	-14.2	-16.0	-17.0	-18.0

Atât rezultatele obținute prin tehnica PS-InSAR cât și cele obținute prin măsurători GNSS, arată valori mari de subsidență, care ajung la -16.8 mm determinați cu ajutorul InSAR; respectiv -18.0 mm din măsurători GNSS în luna noiembrie a anului 2016. Coeficientul de corelație între rezultatele determinate prin cele două tehnici este de 92%.

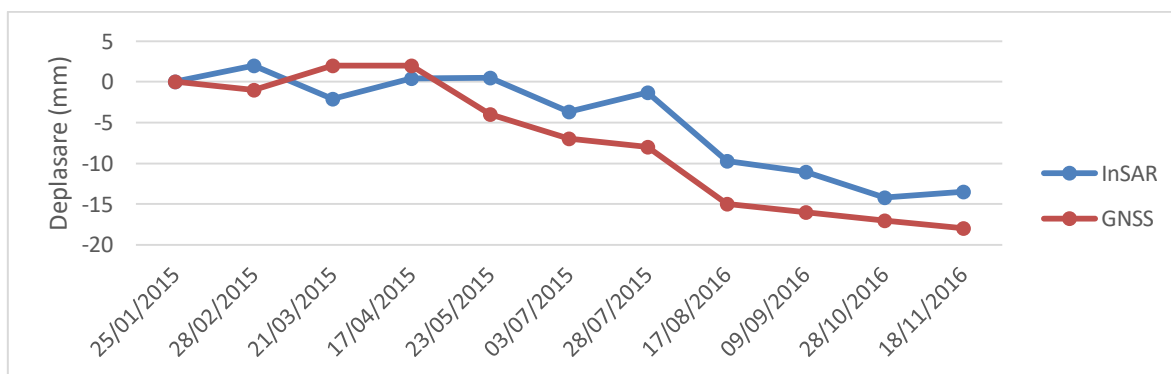


Figura 8.21. Reprezentarea deplasărilor determinate cu ajutorul tehnicilor PS-InSAR și GNSS

9. CONCLUZII GENERALE ALE CERCETĂRILOR EFECTUATE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE VIITOR

9.1. CONCLUZII GENERALE

Obiectivele acestui studiu au vizat două aspecte specifice aplicațiilor de teledetecție din mediul urban: monitorizarea evoluției în timp a întinderii zonelor construite și monitorizarea dinamicii terestre.

În primul rând, lucrarea face o trecere în revistă a stadiului actual al aplicațiilor de monitorizare a mediilor urbane cu ajutorul imaginilor de teledetecție multispectrale și radar, precum și a fuziunilor dintre aceste tipuri de date. Stadiul actual al tehnicilor se referă atât la metodele utilizate în prezent la nivel național și internațional pentru clasificările zonelor construite în vederea calculării imaginilor diferență, precum și la preciziile obținute. În ceea ce privește dinamica suprafeței terestre, este rezumat de asemenea stadiul actual al monitorizării prin tehnici multitemporale de interferometrie, PS și SBAS la nivel național și internațional.

Următoarele capitole prezintă o scurtă istorie a teledetecției și caracteristicile sateliților de teledetecție cu senzori pasivi și activi care sunt utilizați în studiile de caz prezentate în cadrul studiului.

În continuare, au fost prezentate aspectele teoretice cu privire la tehnicile utilizate, metodologiile și cercetările experimentale conduse în cadrul studiului pentru monitorizarea zonelor construite și a dinamicii scoarței terestre în zona de studiu, orașul București.

Monitorizarea zonei construite din mediul urban și periurban s-a bazat pe imagini multispectrale provenite de la sateliții Landsat 5 și 7 și Sentinel-2, precum și pe imagini radar de la satelitul Sentinel-1 preluate în intervalul de timp 1984-2017. Metodologia de detectare a schimbărilor a constatat în introducerea etapei de generare a clasificărilor de imagini înainte de calculul imaginii diferență pentru un control mai bun asupra preciziei rezultatelor obținute. Imaginile au fost clasificate prin trei metode statistice, și anume metoda verosimilității maxime, metoda vectorilor suport și metoda arborilor decizionali. Cea mai bună precizie de clasificare a imaginilor multispectrale a fost obținută cu prin aplicarea metodei cu vectori suport, respectiv 83% pentru zonele urbane și 62% pentru zonele periurbane. Pentru perioadele 1984-1989, 1989-2000, 2000-2013 au fost calculate imagini diferență din clasificările rezultate, care au fost interpretate și corelate cu tendințele planificărilor urbane și dinamica populației în perioadele respective.

Imaginile provenite de la sateliții Sentinel-1 și Sentinel-2 au fost utilizate pentru propunerea unei metodologii de îmbunătățire a preciziei obținute prin clasificarea imaginilor multispectrale. Au fost aleși sateliții Sentinel datorită rezoluției spațiale și geometriei orbitei asemănătoare, aspecte foarte importante pentru procedeul deregistrare al datelor specific fuziunii dintre datele cu proveniență diferită.

Primul pas pentru evaluarea îmbunătățirii aduse prin fuziuni de date a fost clasificarea imaginii radar prin diferite metode, utilizând atât amplitudinea semnalului reflectat de zona construită cât și polarizările diferite, VV și VH ale care imaginilor Sentinel-1. În urma clasificărilor prin metoda supervizată utilizând algoritmul Markov Random Fields pentru clasificarea imaginii în funcție de amplitudinea imaginii au fost obținute precizii de 71%. Decompunerea imaginii în funcție de polarizările imaginii în planul H- α au condus la rezultate cu precizie de numai 32% pentru clasificarea zonei urbane. În urma fuziunii dintre imaginea multispectrală și cea radar, preciziile de clasificare a zonei urbane au crescut considerabil, obținându-se o valoare de 97% pentru clasificarea zonei urbane și de 91% pentru clasificarea zonei periurbane.

În ceea ce privește monitorizarea dinamicii zonelor construite, lucrarea prezintă aspectele teoretice și practice privind două tehnici actuale de monitorizare a evoluției zonelor urbane din punct

de vedere al deplasărilor suferite de suprafața terestră, utilizând tehnici de interferometrie multitemporală, respectiv metoda Țintelor persistente și metoda Bazelor minime de preluare. Obiectivul principal al tezei a fost realizarea unei baze de date privind deplasările în zone urbane pentru intervale îndelungate de timp și identificarea prin analize a principalelor aplicații pe care acestea le pot avea în monitorizarea lor. În vederea realizării acestui obiectiv, au fost utilizate înregistrări preluate de către senzorii aflați pe platforme satelitare istorice, precum ERS-1/ERS-2 și EVISAT, precum și platforme satelitare actuale, precum TerraSAR-X și Sentinel-1A. Zona urbană aleasă pentru studiu este orașul București. Pe baza rezultatelor obținute, se pot trage următoarele concluzii cu privire la monitorizarea zonelor urbane prin intermediul interferometriei:

- *Considerații privind alegerea senzorilor și rezoluția datelor inițiale:*
 - Alegerea imaginilor care alcătuiesc perechile pe baza cărora sunt generate interferogramele, trebuie să îndeplinească o serie de condiții optime, pornind de la condițiile meteorologice din momentul preluării imaginilor, până la configurația de preluare, care influențează dimensiunea bazei perpendiculare de preluare și a bazei temporale. Aceste caracteristici pot produce erori în generarea și prelucrarea interferogramelor, care dacă nu sunt cunoscute și corectate, conduc la compromiterea rezultatelor. După fiecare etapă de prelucrare, rezultatele intermediare au fost evaluate individual, iar perechile de imagini care nu au putut fi corectate prin prelucrare, au fost eliminate.
 - Intervenția asupra fiecărei etape de prelucrare, cu controlul datelor intermediare în scopul îmbunătățirii preciziei au făcut posibilă obținerea de rezultate care descriu dinamica impusă de geologia regiunii din prelucrarea imaginilor TSX, mișcări cu amplitudini mult mai mici în comparație cu cele rezultate din intervenții antropice.
 - Cunoașterea modelului matematic aplicat pentru prelucrările interferometrice multitemporale are în primul rând o importanță deosebită pentru detectarea eventualelor erori, precum și pentru interpretarea rezultatelor finale (liniaritate – dinamică neliniară reieșită din prelucrările multitemporale prin tehnica liniară PS și tehnica neliniară SBAS).
 - Integrarea orbitelor precise la încărcarea imaginilor SAR este un pas obligatoriu. Acestea îmbunătățesc precizia procesului de registrație a imaginilor și reduc zgomotul rezultatelor finale. Extragerea din surse online ale orbitelor precise a fost necesară în cazul imaginilor provenite de la Sentinel-1A.
- *Concluzii privind rezultatele prelucrărilor interferometrice:*
 - Pentru imaginile preluate cu senzori din banda C ($\lambda=5.6$ cm), respectiv ERS, Envisat și Sentinel-1A. preciziile de determinare a vitezelor sunt de 0.5 mm/an, iar pentru imaginile preluate de TerraSAR-X de 0.2 mm/an. Valorile determinate pentru vitezele de variație a deplasărilor sunt cuprinse în intervalul -25 mm – 25 mm pentru toate seturile de date obținute, însă frecvența cea mai mare a deplasărilor se găsește în intervalul -3 – 3 mm, ceea ce sugerează o suprafață terestră din orașul București poate fi considerată stabilă.
 - Rezultatele caracterizate de cel mai mult zgomot au fost obținute din prelucrarea imaginilor Sentinel-1A. Cu toate că numărul mare de imagini ajută la o estimare mai bună a tendințelor de deplasare în timp, acestea pot reprezenta și un dezavantaj în analiza individuală a tuturor rezultatelor intermediare, și implicit în eliminarea tuturor imaginilor care creează perechi de interferograme afectate de erori.
 - Rezultatele obținute prin prelucrarea imaginilor Sentinel-1A sunt cele mai afectate de zgomot, astfel nu poate fi dedusă dinamica suprafeței terestre cauzată de fenomene geologice, ci doar subsidențe caracterizate de valori mari ale vitezei de deplasare (± 5 mm/an) în comparație cu cele specifice scoarței terestre în București;
 - Analiza rezultatelor în vederea aplicării interferometriei multitemporale pentru monitorizări urbane, s-a axat pe 3 aspecte: interpretarea rezultatelor în relație cu aspectele geomorfologice ale suprafeței terestre în București, analiza la nivelul clădirilor și analiza seriilor de timp în vederea identificării zonelor care prezintă potențial risc seismic sau de scufundare.

- Analiza din punct de vedere a evoluției geomorfologice pe termen lung a rezultatelor PS se face în special în zonele în care mișcările analizate au o amplitudine mică, iar cauzele principale pentru tendințele observate sunt naturale. În cazul de față, din imagini ERS, Envisat și TSX au fost identificate 3 tipuri de tendințe în dinamica platformelor industriale: ridicare continuă, subsidență urmată de ridicare și subsidență continuă. Interpretarea dată acestora, și anume suprapunerea mișcărilor de ridicare cauzate de refacerea pânzei freatice peste mișcările naturale cu origine geomorfologică a fost confirmată și de măsurătorile din teren ale apelor subterane din acviferul Frățești;
- Analiza clădirilor pentru identificarea coerenței contextuale în funcție de caracteristicile clădirii au condus la rezultate neconcludente, și la stabilirea localizării ca singur predictor pentru manifestarea mișcărilor construcțiilor în timp. Trebuie luat în considerare faptul că imaginile SAR pot fi afectate de erori atmosferice, orbitale sau de topografie, iar procesul de prelucrare se poate dovedi ineficient în îndepărtarea lor. În plus, localizarea planimetrică incertă a punctelor provenite din prelucrarea imaginilor preluate de senzorul TerraSAR-X în modul Stripmap, conduc la o ambiguitate în selectarea punctelor provenite de la clădirile analizate.
- În cazul detectării zonelor care reprezintă un potențial pericol, satelitul Sentinel-1A s-a dovedit eficient. Valorile subsidenței în zona Bd Eroilor – Eroii Sanitari, de maximum -20 mm în 6 luni, și o viteză anuală de -6 mm/an, sunt asemănătoare cu cele identificate de Sillerico și colab., (2015) [76] pe anumite porțiuni în timpul construcției magistralei 30 de metrou din Madrid, Spania.
- Chiar dacă ipoteza inițială cu privire la potențialul imaginilor SAR, de a surprinde caracteristici individuale ale clădirilor istorice încadrate în clasa I de risc seismic relativ la clădirile fără risc seismic, acestea s-au dovedit eficiente în analize care servesc ca bază interpretărilor geomorfologice, precum și la identificarea unor fenomene cu potențial periculos. Rezultatele confirmă faptul că tehnica PS-InSAR prezintă avantaje atunci când analizele se întind pe zone mari, însă în cazul analizelor de detaliu, aceasta este limitată.
- Datorită disponibilității măsurătorilor GNSS în zona stației de metrou Eroilor în perioada preluării de imagini de către satelitul Sentinel-1A, a fost posibilă validarea rezultatelor obținute pentru zona afectată de surpări la începutul anului 2015. Între măsurătorile InSAR și GNSS a fost obținută o corelație de 92% și diferențe medii de aproximativ 2 mm între valorile altitudinii determinate pentru punctul respectiv.

9.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

În ceea ce privește contribuțiile originale în cadrul acestei lucrări, menționez:

- Investigarea și alcătuirea unei baze teoretice cu privire la situația actuală a prelucrărilor de imagini multispectrale, radar și a fuziunilor de date în vederea clasificării zonelor construite din mediile urbane și periurbane;
- Crearea unei baze de date constând în hărți de detectare a schimbărilor suferite de orașul București între 1984 și 2013;
- Testarea, prezentarea modelelor matematice și selectarea de algoritmi optimi pentru clasificarea zonei construite a Bucureștiului atât cu ajutorul imaginilor multispectrale, radar și fuziunilor de date;
- Corelarea datelor obținute cu privire la schimbarea zonei construite cu politici de planificare urbană specifice fiecărei perioade de timp considerate;
- Propunerea unei metodologii de îmbunătățire a preciziei de clasificare a imaginilor multispectrale prin fuziuni cu date radar, care a condus la îmbunătățirea preciziei de clasificare a zonei construite de la 83% la 96.97%.

- Investigarea și alcătuirea unei baze teoretice cu privire la situația actuală a prelucrărilor interferometrice multitemporale, și aplicarea lor în diferite domenii;
- Prezentarea modelelor matematice folosite în cadrul celor două metode interferometrice multitemporale;
- Prezentarea în detaliu a etapelor de prelucrare interferometrică multitemporală, metoda Țintelor Persistente și metoda SBAS, inclusiv a metodelor de îmbunătățire a rezultatelor prin manipularea rezultatelor intermediare;
- Lucrarea prezintă contribuțiile aduse pentru alcătuirea unei baze de date care conține evoluția deplasărilor pentru București, în intervalul 1992-2017, utilizând atât platforme satelitare istorice cât și actuale;
- Lucrarea este prima la nivel național în care dinamica suprafeței terestre este interpretată din punct de vedere al evoluției deplasărilor pentru intervale lungi de timp (22 de ani) arătând corelații cu dinamica pânzei freatice și a fenomenelor geologice care pot influența dinamica scoarței terestre pe termen îndelungat;
- Contribuții cu privire la identificarea limitărilor în analiza de detaliu a construcțiilor cu ajutorul tehnicilor InSAR multitemporale, introducând pentru prima dată ipoteza coerenței contextuale;
- Prin identificarea subsidențelor în zona magistralei 5 de metrou, lucrarea prezintă pentru prima dată la nivel național eficiența utilizării datelor satelitare pentru identificarea unor zone problematice în mediile urbane, oferind o perspectivă de monitorizare pentru mitigarea riscului;
- Lucrarea este prima la nivel național și una dintre puținele lucrări la nivel internațional care validează rezultate Sentinel-1 utilizând măsurători terestre;

9.3. Perspective privind aprofundarea și extinderea cercetărilor

- Organizarea unui sistem de monitorizare online, actualizat periodic, a zonelor urbane, cu ajutorul imaginilor Sentinel-1A și B, disponibile gratuit, care să integreze produse satelitare de origine diferită, servind pentru studii de monitorizare sau analize de predicție bazate pe evoluția în timp a fondului construit;
- Utilizarea datelor Sentinel-1 și Sentinel-2 pentru continuarea bazei de date de detectare a schimbărilor pentru orașul București și alte orașe din România;
- Utilizarea de alți parametri radar pentru studiul acoperirilor de teren, precum textura, pentru îmbunătățirea preciziei obținute pentru celelalte tipuri de acoperire a terenului;
- Extinderea analizei dinamicii scoarței terestre cu ajutorul tehnicilor de interferometrie multitemporală pentru alte orașe din România (ex: Galați);
- Utilizarea de imagini TerraSAR-X Hotspot pentru o rezoluție spațială mărită pentru analiza de detaliu a clădirilor pentru studiul coerenței contextuale;
- Alcătuirea unei baze de date care să conțină toate însușirile relevante ale clădirilor din zona de studiu, prin cartarea acestora pe teren și utilizarea rapoartelor întocmite de specialiști pentru încadrarea în diferite regimuri de urgență sau clase de risc;
- Instalarea de reflectori pentru semnalul radar, pentru localizarea arbitrară a Țintelor persistente observate în timp, precum și pentru posibilitatea validării rezultatelor prin măsurarea deplasărilor terestre ale reflectorilor instalați.

10. LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

Gheorghe, M., Armaș, I., Năstase E., Munteanu A, (May 2018), Deformation Monitoring In Galați Area Using Multitemporal Satellite Interferometry. In *Proceedings Of The International Conference: From Field Mapping And Landform Analysis To Multi-Risk Assessment: Challenges, Uncertainties And Transdisciplinarity. The 19th Joint Geomorphological Meeting Italy-Romania-France-Belgium-Greece and the 34th Romanian National Symposium on Geomorphology*, 16-20 May, 2018, Buzău

Gheorghe, M., Armaș, I., Năstase E., Munteanu A., Potential of InSAR monitoring for seismic areas in Romanian, *GeoPatterns*, Vol. III, Issue 1, Aprilie 2018, pp. 23-31.

*Armaș, I., Mendes D, Popa R, **Gheorghe M.**, and Popovici D. (2017) Long-term ground deformation patterns of Bucharest using multi-temporal InSAR and multivariate dynamic analyses: a possible transpressional system?. *Scientific Reports* 7: 43762.

Armaș, I., Mendes, D. A., **Gheorghe, M.**, Popa, R. G. & Popovici, D. (2017). Identifying ground displacement trends in Bucharest using InSAR. In Mihai Niculi, Mihai Ciprian Mrgint (Ed.), *Proceedings of the 33rd Romanian Geomorphology Symposium*. (pp. 20-23). Iasi: Alexandru Ioan Cuza University of Iai Press.

*Armaș, I., **Gheorghe, M.**, Lendvai, A. M., Dumitru, P. D., Bădescu, O., & Călin, A. (2016). InSAR validation based on GNSS measurements in Bucharest. *International Journal of Remote Sensing*, 37(23), 5565-5580.

***Gheorghe, M.**, & Armaș, I. (2016). Comparison of Multi-Temporal Differential Interferometry Techniques Applied to the Measurement of Bucharest City Subsidence. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 221-229.

*Călin, L.A., Badea, D., **Gheorghe, M.**, Țăpuș, D., Lorinti, A.C., Geographic Information System for local public authorities. *SGEM2016 Conference Proceedings*, ISBN 978-619-7105-60-5 / ISSN 1314-2704, June 28 - July 6, 2016, Book2 Vol. 3, 239-246;

*Badea, D., **Gheorghe, M.**, Călin, L., Lidar Filtering, *SGEM2016 Conference Proceedings*, ISBN 978-619-7105-59-9 / ISSN 1314-2704, June 28 - July 6, 2016, Book2 Vol. 2, 925-930 pp

Gheorghe, M., Armaș, I., Monitoring historical urban infrastructure using multi-temporal InSAR techniques, *GeoPatterns*, Vol. I, Issue 2, November 2016, pp. 35-41.

Armaș, I., Necsoiu, M., Mendes, D. A., **Gheorghe, M.**, & Gheorghe, D. (2015, May). Ground Displacement Trends in an Urban Environment Using Multi-Temporal InSAR Analysis and Two Decades of Multi-Sensor Satellite-Based SAR Imagery. In *ESA Special Publication* (Vol. 731, p. 63).

Armaș, I., **Gheorghe, M.**, Calin, A., Dumitru, P. D., & Mihai, O. (2015). Identifying linearity/non-linearity in landscape evolution by integrating satellite-based radar interferometry and ground-based monitoring data. Study area: Bucharest. *Revista de Geodezie, Editorial Board*, 35.

**Internationally Scientific Indexed paper*

Bibliografie

- [1] O. O. Omo-Irabor and K. Oduyemi, "A comparative study of classification methods for monitoring land use/land cover (LULC) changes using remote sensing technology and GIS techniques," in *Proceedings of the 6th International Conference on Earth Observation & Geoinformation Sciences in Support of Africa's Development*, 2006.
- [2] L. K. A. Azaz, "Monitoring Urban Growth In Alexandria-Egypt Using Satellite Images," in *FORUM*, 2005.
- [3] R. Michishita, Z. Jiang, and B. Xu, "Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing," *Remote Sens. Environ.*, vol. 117, pp. 3–18, 2012.
- [4] S. F. Fonji and G. Taff, "Using satellite data to monitor land-use land-cover change in North-eastern Latvia," *Springerplus*, vol. 3, p. 1:61, 2014.
- [5] H. Taubenböck, T. Esch, A. Felbier, M. Wiesner, A. Roth, and S. Dech, "Monitoring urbanization in mega cities from space," *Remote Sens. Environ.*, vol. 117, pp. 162–176, 2012.
- [6] K. Vermeiren, A. Van Rompaey, M. Loopmans, E. Serwajja, and P. Mukwaya, "Urban growth of Kampala, Uganda: Pattern analysis and scenario development," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 106, pp. 199–206, 2012.
- [7] Sandric, I., Mihai, B., Savulescu, I., Suditu, B., & Chitu, Z. (2007, April). Change detection analysis for urban development in Bucharest-Romania, using high resolution satellite imagery. In *2007 Urban Remote Sensing Joint Event* (pp. 1-8). IEEE..
- [8] H. Bagan and Y. Yamagata, "Land-cover change analysis in 50 global cities by using a combination of Landsat data and analysis of grid cells," *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, no. 6, p. 064015, May 2014.
- [9] R. Manandhar, I. O. A. Odeh, and R. G. Pontius Jr, "Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 135, pp. 336–346, 2010.
- [10] T. X. Yue, Z. M. Fan, and J. Y. Liu, "Scenarios of land cover in China," *Glob. Planet. Change*, vol. 55, pp. 317–342, 2007.
- [11] A. M. Dewan and Y. Yamaguchi, "Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization," *Appl. Geogr.*, vol. 29, pp. 390–401, 2009.
- [12] M. A. Friedl and C. E. Brodley, "Decision tree classification of land cover from remotely sensed data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 61, pp. 399–409, 1997.
- [13] P. Griffiths, P. Hostert, O. Gruebner, and S. van der Linden, "Mapping megacity growth with multi-sensor data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, pp. 426–439, 2010.
- [14] M. Pal and P. M. Mather, "Support vector machines for classification in remote sensing," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, pp. 1007–1011, 2005.
- [15] C. Gouinaud, F. Tupin, and H. Maitre, "Potential and use of radar images for characterization and detection of urban areas," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS'96. Remote Sensing for a Sustainable Future. International*, 1996, vol. 1, pp. 474–476.
- [16] C. He, G.-S. Xia, and H. Sun, "An adaptive and iterative method of urban area extraction from SAR images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 3, pp. 504–507, 2006.
- [17] F. Dell'Acqua, P. Gamba, and G. Lisini, "Rapid mapping of high resolution SAR scenes," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, pp. 482–489, 2009.
- [18] R. J. Dekker, "Texture analysis and classification of ERS SAR images for map updating of urban areas in the Netherlands," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, pp. 1950–1958, 2003.
- [19] C. Tison, J.-M. Nicolas, F. Tupin, and H. Maitre, "A new statistical model for Markovian classification of urban areas in high-resolution SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, pp. 2046–2057, 2004.
- [20] T. Esch, A. Roth, and S. Dech, "Robust approach towards an automated detection of built-up areas from high resolution radar imagery," in *Proceedings ISPRS Conference URBAN 2005*, 2005.
- [21] J. Zhang, "Multi-source remote sensing data fusion: status and trends," *J. Image Data Fusion*, vol. 1, no. 1, pp. 5–24, 2010.
- [22] C. Santos and J. P. Messina, "Multi-sensor data fusion for modeling African palm in the Ecuadorian Amazon," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 74, pp. 711–723, 2008.
- [23] G. Schiavon, F. Del Frate, and C. Solimini, "High resolution multi-spectral analysis of urban areas with quickbird imagery and synergy with ERS data," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003, vol. 3, pp. 1972–1974.
- [24] S. Stramondo, C. Bignami, N. Pierdicca, and M. Chini, "SAR and optical remote sensing for urban damage detection and mapping: case studies," in *Urban Remote Sensing Joint Event*, 2007, pp. 1–6.
- [25] P. Hyde, R. Dubayah, W. Walker, J. B. Blair, M. Hofton, and C. Hunsaker, "Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy," *Remote Sens. Environ.*, vol. 102, pp. 63–73, 2006.
- [26] A. H. S. Solberg, T. Taxt, and A. K. Jain, "A Markov random field model for classification of multisource satellite imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, pp. 100–113, 1996.
- [27] B. N. Haack, E. K. Solomon, M. A. Bechdol, and N. D. Herold, "Radar and optical data comparison/integration for urban delineation: a case study," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 68, 2002.
- [28] T. Costăchioiu and M. Datcu, "Land cover dynamics classification using multi-temporal spectral indices from satellite image time series," in *Communications (COMM), 2010 8th International Conference on*, 2010, pp. 157–160.

- [29] T. Costachioiu, R. Constantinescu, and M. Datcu, "Multitemporal Satellite Image Time Series analysis of urban development in Bucharest and Ilfov areas," in *Communications (COMM), 2014 10th International Conference on*, 2014, pp. 1–4.
- [30] P. A. Rosen *et al.*, "Synthetic aperture radar interferometry," *Proc. IEEE*, vol. 88, pp. 333–382, 2000.
- [31] T. H. Dixon *et al.*, "Space geodesy: Subsidence and flooding in New Orleans," *Nature*, vol. 441, p. 587, 2006.
- [32] S. Zerbini, B. Richter, F. Rocca, T. van Dam, and F. Matonti, "A combination of space and terrestrial geodetic techniques to monitor land subsidence: case study, the Southeastern Po Plain, Italy," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 112, 2007.
- [33] R. Lanari, G. Zeni, M. Manunta, S. Guarino, P. Berardino, and E. Sansosti, "An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case study of the city of Naples, Italy," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, pp. 2855–2867, 2004.
- [34] G. E. Hilley, R. Bürgmann, A. Ferretti, F. Novali, and F. Rocca, "Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis," *Science (80-.)*, vol. 304, pp. 1952–1955, 2004.
- [35] G. Herrera *et al.*, "Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain)," *Eng. Geol.*, vol. 90, pp. 148–159, 2007.
- [36] M. Crosetto, E. Biescas, J. Duro, J. Closa, and A. Arnaud, "Generation of advanced ERS and Envisat interferometric SAR products using the stable point network technique," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 74, pp. 443–450, 2008.
- [37] P. Vallone, M. Crosetto, M. S. Giammarinaro, M. Agudo, and E. Biescas, "Integrated analysis of differential SAR interferometry and geological data to highlight ground deformations occurring in Caltanissetta city (Central Sicily, Italy)," *Eng. Geol.*, vol. 98, pp. 144–155, 2008.
- [38] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, pp. 2375–2383, 2002.
- [39] A. Pepe, E. Sansosti, P. Berardino, and R. Lanari, "On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 2, pp. 265–269, 2005.
- [40] C. Werner, U. Wegmüller, T. Strozzi, and A. Wiesmann, "Interferometric point target analysis for deformation mapping," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003, vol. 7, pp. 4362–4364.
- [41] J. Duro, J. Inglada, J. Closa, N. Adam, and A. Arnaud, "High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data," in *Proceedings of FRINGE 2003 Workshop*, 2003, p. 6.
- [42] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, 2004.
- [43] M. Crosetto, B. Crippa, E. Biescas, O. Monserrat, M. Agudo, and P. Fernández, "Land deformation measurement using SAR interferometry: state-of-the-art," *Photogramm. Fernerkundung Geoinf.*, vol. 2005, p. 497, 2005.
- [44] M. Crosetto, O. Monserrat, R. Iglesias, and B. Crippa, "Persistent scatterer interferometry," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 76, pp. 1061–1069, 2010.
- [45] F. J. Van Leijen and R. F. Hanssen, "Persistent Scatterer interferometry using adaptive deformation models," 2007.
- [46] M. Manunta, M. Marsella, G. Zeni, M. Sciotti, S. Atzori, and R. Lanari, "Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, pp. 1665–1684, 2008.
- [47] D. Gheorghe and I. Armas, "InSAR applications in environmental sciences," *Geopolit. Hist. Int. Relations*, vol. 7, p. 278, 2015.
- [48] V. Poncos, D. Teleaga, M. A. Boukhemacha, S. A. Toma, and F. Serban, "Study of urban instability phenomena in Bucharest city based on Ps-InSAR," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International*, 2014, pp. 429–432.
- [49] G. Vasile, A. Anghel, D. Boldo, R. Boudon, G. D'Urso, and R. Muja, "Potential of multi-pass high-resolution SAR interferometry for dam monitoring," *MTA Rev.*, vol. 22, pp. 235–246, 2012.
- [50] A. ANGHEL, G. VASILE, and R. CACOVEANU, *Infrastructure Monitoring with Spaceborne SAR Sensors*. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [51] S. F. Balan, V. Poncos, D. Teleaga, R. Nicolae, and B. F. Apostol, "SATELLITE MONITORING FOR A SAFER CONSTRUCTION ENVIRONMENT," *Rom. J. Phys.*, vol. 61, pp. 1108–1119, 2016.
- [52] I. D. Negula, R. Sofronie, A. Virsta, and A. Badea, "Earth observation for the world cultural and natural heritage," *Agric. Agric. Sci. Procedia*, vol. 6, pp. 438–445, 2015.
- [53] A. Radutu, I. Nedelcu, and C. R. Gogu, "An overview of ground surface displacements generated by groundwater dynamics, revealed by InSAR techniques," *Procedia Eng.*, vol. 209, pp. 119–126, 2017.
- [54] V. Poncos *et al.*, "Water induced geohazards measured with spaceborne interferometry techniques," in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2012, vol. 14, p. 4654.
- [55] S. Voigt, T. Schneiderhan, A. Twele, M. Gähler, E. Stein, and H. Mehl, "No Title," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 77, no. 9, pp. 923–931, 2011.
- [56] W. A. Jaber, D. Floricioiu, H. Rott, and M. Eineder, "Dynamics of fast glaciers in the Patagonia Icefields derived from TerraSAR-X and TanDEM-X data," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 3226–3229.

- [57] F. Bovenga, J. Wasowski, D. O. Nitti, R. Nutricato, and M. T. Chiaradia, "Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis," *Remote Sens. Environ.*, vol. 119, pp. 272–285, 2012.
- [58] B. Bräutigam, P. Rizzoli, M. Martone, M. Bachmann, T. Kraus, and G. Krieger, "InSAR and DEM quality monitoring of TanDEM-X," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 5570–5573.
- [59] D. Massonnet *et al.*, "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry," *Nature*, vol. 364, p. 138, 1993.
- [60] S. Stramondo, M. Moro, C. Tolomei, F. R. Cinti, and F. Doumaz, "InSAR surface displacement field and fault modelling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran)," *J. Geodyn.*, vol. 40, pp. 347–353, 2005.
- [61] R. J. Walters *et al.*, "The 2009 L'Aquila earthquake (central Italy): A source mechanism and implications for seismic hazard," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, no. 17, 2009.
- [62] D. Massonnet, P. Briole, and A. Arnaud, "Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry," *Nature*, vol. 375, p. 567, 1995.
- [63] Z. Lu *et al.*, "Deformation of New Trident Volcano measured by ERS-1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 24, pp. 695–698, 1997.
- [64] R. M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb, and R. M. Frolich, "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream," *Science (80-.)*, vol. 262, pp. 1525–1530, 1993.
- [65] T. Wright, L. Zhong, and C. Wicks, "Source model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 18, 2003.
- [66] T. Farr *et al.*, "The shuttle radar topography mission," *Rev. Geophys.*, vol. 45, no. 2, 2007.
- [67] Z.-K. Shen *et al.*, "Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake," *Nat. Geosci.*, vol. 2, no. 10, p. 718, 2009.
- [68] B. Philipposian and M. Simons, "A survey of volcanic deformation on Java using ALOS PALSAR interferometric time series," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 12, no. 11, 2011.
- [69] E. Rignot, "Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, 2008.
- [70] F. J. Meyer, A. R. Mahoney, H. Eicken, C. L. Denny, H. C. Druckenmiller, and S. Hendricks, "Mapping arctic landfast ice extent using L-band synthetic aperture radar interferometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, pp. 3029–3043, 2011.
- [71] M.-L. Carreño, O. D. Cardona, and A. H. Barbat, "Urban seismic risk evaluation: a holistic approach," *Nat. Hazards*, vol. 40, pp. 137–172, 2007.
- [72] K. Poljanšek, F. Bono, and E. Gutiérrez, "Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: the case of European gas and electricity networks," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 41, pp. 61–79, 2012.
- [73] I. Vlad and M. Vlad, "Behavior of dwellings during strong earthquakes in Romania," in *14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [74] Armaş, I., Mendes, D. A., Popa, R. G., Gheorghe, M., & Popovici, D. (2017). Long-term ground deformation patterns of Bucharest using multi-temporal InSAR and multivariate dynamic analyses: a possible transpressional system?. *Scientific reports*, 7, 43762.
- [75] I. Armaş, D. Mendes, R. Popa, M. Gheorghe, and D. Popovici, "Long-term ground deformation patterns of Bucharest using multi-temporal InSAR and multivariate dynamic analyses: a possible transpressional system?," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 43762, 2017.
- [76] E. Sillerico, P. Ezquerro, M. Marchamalo, G. Herrera, J. Duro, and R. Martínez, "Monitoring ground subsidence in urban environments: M-30 tunnels under Madrid City (Spain)," *Ing. e Investig.*, vol. 35, pp. 30–35, 2015.