

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ UTCB

RAPORTUL DE CERCETARE ȘTIINȚIFICĂ NR. 1

**Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban**

Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. CONSTANTIN RADU GOGU

Doctorand

ing. ALINA RĂDUȚU

Cuprins

Lista Figurilor.....	3
Lista Tabelelor	3
1 Surse de date de teledetecție pentru managementul apelor subterane	4
1.1 Precipitațiile	4
1.1.1 TRMM- Misiunea satelitară pentru măsurarea precipitațiilor tropicale	4
1.1.2 GPM- Misiunea pentru măsurarea globală a precipitațiilor	5
1.2 Evapotranspirația.....	5
1.3 Caracterizarea stratului de zăpadă	6
1.4 Indici de vegetație și temperatura suprafeței terenului.....	7
1.4.1 Indexul de vegetație.....	7
1.4.2 Temperatura suprafeței terenului	8
1.4.3 Date multispectrale de teledetecție utilizate pentru determinarea indicilor de vegetație și a temperaturii suprafeței terenului	8
1.5 Umiditatea solului.....	9
1.5.1 SMOS- Umiditatea solului și salinitatea oceanului (Soil Moisture and Ocean Salinity).....	11
1.5.2 SMAP- Umiditatea solului determinată cu senzori activi și pasivi (Soil Moisture Active Passive)	11
1.6 Monitorizarea nivelului rezervoarelor globale/ lacurilor (G-REALM)	11
1.7 Diminuarea globală a resurselor de apă subterană.....	12
1.7.1 Misiunea GRACE- Gravity Recovery and Climate Experiment	12
1.7.2 Misiunea GOCE- Exploratorul câmpului gravitic și al circulației oceanice în stare stabilă..	13
1.7.3 Misiuni satelitare radar cu apertură sintetică (SAR)	14
2 Monitorizarea deplasărilor în mediul urban la nivel internațional.....	16
2.1 Metode de monitorizare a deplasărilor verticale ale terenului	17
2.1.1 Nivelment de precizie	17
2.1.2 Extensometrie pentru foraje.....	18
2.1.3 Utilizarea sistemelor GNSS.....	19
2.1.4 Interferometria Radar cu Apertură Sintetică (SAR)	19
2.2 Monitorizarea InSAR a zonelor urbane afectate de fenomene de subsidență ca rezultat al pompării apei subterane.....	22
2.2.1 Analiza distribuției geografice și istoricul apariției fenomenelor de subsidență urbană ...	24

2.2.2	Metode InSAR folosite pentru monitorizarea deplasărilor și datele SAR utilizate	27
2.2.3	Modelarea deplasărilor verticale	33
2.2.4	Comparații și corelații dintre diverse metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală	37
2.2.5	Inițiative europene pentru monitorizarea deplasărilor verticale în zone urbane	40
3	Concluzii	41
	Bibliografie	42

Lista Figurilor

Figura 1-1	Satelii GRACE, NASA. Credite: NASA/JPL-Caltech	13
Figura 2-1	Privire de ansamblu a zonelor urbane afectate de fenomene de deplasări verticale	23
Figura 2-2	Componentele 3D ale deplasării (modificat după (Qin, et al., 2017))	31
Figura 2-3	Distanța în lungul liniei de vizare și estimarea deplasării verticale pentru ENVISAT, în cazul achiziției de pe orbită ascendentă (modificat după (Raspini, et al., 2012))	32

Lista Tabelelor

Tabelul 1-1	Rezumatul tehnicilor de teledetecție utilizate pentru estimarea umidității solului aproape de suprafață (modificat după Wang și Qu (2009))	10
Tabelul 1-2	G-REALM Instrument Summary (after (G-REALM, 2018))	12
Tabelul 1-3	Principalele caracteristici ale misiunilor SAR finalizate sau operaționale (modificat și actualizat după (Metternicht, et al., 2005))	15
Tabelul 2-1	Clasificarea zonelor urbane afectate de subsidență (modificat după (Chaussard, et al., 2013))	25
Tabelul 2-2	Caracteristici ale seturilor de date procesate pentru Bruxelles (după (Declercq, et al., 2017b))	28
Tabelul 2-3	Rezultate comparative privind utilizarea a diferite metode InSAR (după (Herrera, et al., 2009))	31
Tabelul 2-4	Comparație între diversele metode de monitorizare a subsidenței (modificat după Karila și colab.,(2013))	39

1 Surse de date de teledetecție pentru managementul apelor subterane

Ca principală sursă de apă dulce ușor disponibilă și accesibilă pentru activitățile umane, apa subterană are un rol semnificativ în circuitul apei în natură (Meijerink, 2007). Procesele prezente în circuitul apei în natură sunt complexe și dificil de monitorizat, făcând managementul apelor subterane un proces extrem de dificil și complex (NOAA, 2018). Domeniul Observării Pământului cu ajutorul senzorilor satelitari, poate ajuta la îmbunătățirea managementului apelor subterane, furnizând date și analize cu privire la diferite fenomene și procese care sunt incluse în circuitul apei în natură. Tehnicile de teledetecție oferă posibilitatea de a studia areale foarte extinse într-un timp foarte scurt și cu resurse financiare reduse, comparativ cu resursele necesare pentru efectuarea unor analize in-situ.

Circuitul apei în natură poate fi rezumat sub forma ecuației bilanțului apei:

$$S=P-Q-E \quad (1.1)$$

unde

S reprezintă cantitatea de apă stocată, P reprezintă precipitațiile, Q reprezintă scurgerile de suprafață, iar E reprezintă evapotranspirația.

Fiecare dintre termenii ecuației poate fi analizat pentru a se identifica misiunile de monitorizare a unor parametri specifici (ex. misiuni pentru monitorizarea precipitațiilor, misiuni privind monitorizarea umidității solului, etc.) și misiuni generale care utilizează senzori optici sau radar, care pot achiziționa date disponibile pentru diverși parametri sau aplicații, care pot fi utilizate și pentru monitorizarea parametrilor incluși în ecuația bilanțului hidric (ex. utilizarea/ acoperirea terenului, monitorizarea inundațiilor, cartarea deplasărilor verticale ale suprafeței terenului).

1.1 Precipitațiile

Cantitatea și distribuția spațială a precipitațiilor și a ninsorilor pot avea o variație majoră într-un anumit interval de timp. Prin utilizarea instrumentelor radar active și a celor bazate pe microunde, au fost lansate misiuni pentru observarea precipitațiilor la nivel regional și global (NASA GPM, 2017).

1.1.1 TRMM- Misiunea satelitară pentru măsurarea precipitațiilor tropicale

TRMM este prima misiune lansată pentru cercetări climatice și meteorologice, cu scopul de a studia căderile de precipitații din zonele tropicale și subtropicale ale Terrei, cu ajutorul senzorului radar activ (Meijerink, 2007); (PMM, 2015). Lansat în 1997, aceasta este o misiune comună a Administrației Naționale pentru Aeronautică și Spațiu a S.U.A (NASA) și a Agenției de Explorări Aerospațiale Japoneze (JAXA). Misiunea a fost activă timp de 17 ani, până în aprilie 2015 (PMM, 2015). Ploile tropicale produc 75% din energia care este utilizată în circulația atmosferică globală, acest lucru arătând importanța misiunii. Două dintre instrumentele principale ale misiunii TRMM sunt Radarul de Precipitații **PR** (Precipitation Radar) și senzorul pasiv cu microunde **TMI (TRMM Microwave Imager)**. PR a furnizat informații intersectând coloana de precipitații și a ajutat la înțelegerea structurii și intensificării furtunilor tropicale (PMM, 2015). Coloana de precipitații este un model utilizat pentru prognozele meteorologice numerice și pentru modelări climatice (Davies, et al., 2013). TMI a fost utilizat pentru cuantificarea vaporilor de apă, a apei acumulate în nori și a intensității precipitațiilor în atmosferă

(PMM, 2015). Ca un exemplu al utilizării datelor de la misiunea TRMM, Srinivasan (2013) prezintă datele înregistrate în timpul furtunii tropicale Ingrid, din 13 septembrie 2008. Interpretarea datelor înregistrate a semnalat intensificarea unui ciclon tropical, cunoscându-se faptul că un astfel de fenomen meteorologic poate fi însoțit de alunecări masive de teren și inundații. În afară de prognozarea ciclonului tropical, această misiune a furnizat informații cruciale pentru prognoze meteorologice numerice și pentru climatologia precipitațiilor (PMM, 2015). În această direcție, în Iran a fost condus un studiu care a analizat date preluate cu TRMM la intervale de trei ore, pentru perioada 1998-2013. Acestea au fost utilizate pentru estimarea variațiilor diurne ale precipitațiilor sezoniere (Kiany, et al., 2018). TRMM a fost precursorul actualei misiuni pentru măsurarea globală a precipitațiilor (Global Precipitation Measurement).

1.1.2 GPM- Misiunea pentru măsurarea globală a precipitațiilor

Coordonată de NASA și JAXA, organizațiile care au fost implicate și în misiunea TRMM, misiunea GPM a inclus, de asemenea, implicarea Centrului Național de Studii Spațiale Francez (CNES), a Organizației Indiene de Cercetare Spațială (ISRO), a Administrației Naționale Oceanice și Atmosferice (NOAA), a Organizației Europene pentru Exploatarea Sateliților Meteorologici (EUMETSAT) și a altor organizații. Această misiune a fost lansată pe 27 februarie 2014, cu un an înainte de încheierea misiunii TRMM (PMM, 2015). Spre deosebire de misiunea TRMM, GPM este o misiune care utilizează ca date inițiale informații de la o constelație internațională de sateliți, deținută de agențiile menționate mai sus. Scopul principal al misiunii este de a mări acoperirea de monitorizare temporală și spațială a precipitațiilor (Rodell, 2015; Srinivasan, 2013; NASA GPM, 2017). Astfel, GPM măsoară precipitațiile globale la fiecare trei ore, incluzând atât aversele de ploaie cât și căderile de zăpadă. Această misiune operează până la latitudini mai ridicate față de TRMM, având un interval cuprins între 65° latitudine sudică și 65° latitudine nordică (NASA GPM, 2017; Rodell, 2015). Satelitul principal al misiunii poartă denumirea de "Core Observatory" și este utilizat pentru armonizarea măsurătorilor de precipitații de la toți sateliții constelației internaționale GPM. Acest lucru este posibil prin utilizarea a două instrumente foarte importante aflate la bordul acestui satelit: senzorul pasiv cu microunde **GMI** (GPM Microwave Imager) și radarul pentru precipitații cu dublă frecvență **DPR** (Dual-frequency Precipitation Radar). Intensitatea precipitațiilor și caracteristicile orizontale sunt înregistrate de GMI, iar DPR furnizează observații cu privire la structura tridimensională a particulelor (NASA GPM, 2017).

1.2 Evapotranspirația

Evapotranspirația reprezintă fenomenul de îmbinare a două procese diferite prin care apa se transformă în vapori, pe de o parte, la nivelul învelișului vegetal și la suprafața solului prin evaporare, iar pe de altă, în învelișul vegetal, prin transpirația plantelor (Allen, et al., 1998). Estimarea la scară largă a acestui parametru este un proces dificil, considerând variabilitatea sa foarte ridicată, atât spațială cât și temporală. Utilizarea lizimetrelor permite o estimare precisă, dar instalarea și întreținerea pentru suprafețe extinse implică un efort financiar și uman extrem de ridicat (RODELL, et al., 2015). Ținând cont de acest aspect, Meijerink (2007) menționează că evapotranspirația reală (E_r) se poate determina și prin date satelitare prin utilizarea metodei de echilibrare a energiei de suprafață, cu date

minime din teren- SatSEB. Sunt utilizate atât date optice cât și date radar. În aceeași lucrare se menționează că acuratețea acestei metode nu este foarte bine cunoscută.

Cea mai utilizată abordare pentru estimarea evapotranspirației la momentul actual, este reprezentată de ecuația Penman- Monteith. Este general acceptat că aceasta este cea mai potrivită metodă pentru calculul evapotranspirației potențiale și a evapotranspirației normale a culturilor (Allen, et al., 1998; Meijerink, 2007). Această ecuație prognozează PET prin utilizarea de date meteorologice măsurate în mod uzual, incluzând radiația solară, temperatura aerului, conținutul de vapori de apă și viteza vântului (Allen, 2005).

Un produs de evapotranspirație globală, bazat pe date satelitare, este disponibil prin intermediul sateliților Terra și Aqua. Terra (EOS AM) este o misiune internațională lansată în 1999 (Thome, 2018), iar Aqua (EOS PM) este o misiune NASA lansată în 2002 (Parkinson, 2018). Acești sateliți au la bord multiple instrumente de observare a Pământului, proiectate pentru a colecta diverse seturi de date globale care sunt utilizate pentru caracterizarea sistemelor Pământului (ex. umiditatea solului, gheața marină, gheața de la nivelul suprafeței de uscat a Pământului, apă, aer, uscat, temperatura apei, nori, vapori de apă atmosferici, reflectanța și energia suprafeței) (Thome, 2018; Parkinson, 2018). Există două instrumente comune care operează la bordul sateliților Terra și Aqua. Este vorba de MODIS (Spectroradiometrul cu formare de imagine de rezoluție medie) și CERES (Sistemul de energie radiantă al norilor și al Pământului) (Maccherone, 2018; Parkinson, 2018; Thome, 2018). MODIS înregistrează date care sunt utilizate pentru dezvoltarea unor produse specifice pentru atmosferă, uscat, criosferă și oceane, incluzând diverse componente ale circuitului apei în natură (Maccherone, 2018). Terra MODIS și Aqua MODIS acoperă întreaga suprafață terestră la un interval de o zi sau două, achiziționând date într-un interval de 36 de benzi spectrale, sau grupuri de lungimi de undă.

Produsul care conține setul de date globale privind evapotranspirația este **MODIS Evapotranspiration Data Set (MOD16)**. În afară de setul de date globale de evapotranspirație (ET), produsul MOD16 conține și seturi de date pentru: fluxul de căldură latentă (Q), evaporația potențială (E_p) și căldura latentă potențială (C_L) (Mu, et al., 2012). Caracteristicile de bază ale produsului sunt:

- Rezoluția spațială: 1 km²;
- Rezoluția temporală: 1 zi;
- Datele sunt disponibile în: mm/8zile, mm/lună, mm/an.

Produsele operaționale cuprinzând datele sunt generate printr-un algoritm îmbunătățit prezentat de Mu și alții (2011), care are la bază ecuația Penman-Monteith (Monteith, 1965). O analiză privind încrederea variabilelor utilizate în algoritmul lui Mu și alții (2011) este realizată în lucrarea (Jovanovic, et al., 2015), având ca zonă de studiu Africa de Sud.

1.3 Caracterizarea stratului de zăpadă

Zăpada reprezintă una dintre sursele de precipitații de realimentare a rezervelor de apă subterană. De aceea, caracterizarea stratului de zăpadă reprezintă un proces important al managementului apelor subterane.

Una dintre principalele misiuni satelitare care furnizează produse privind stratul de zăpadă este misiunea MODIS, care a fost prezentată în secțiunea 1.2. Produsele cartografice MODIS cu acoperire

globală pentru caracterizarea stratului de zăpadă au o rezoluție spațială de 500 X 500 m, o rezoluție temporală de 5 minute (cu date preluate în coloane de 500 m) și sunt disponibile la 1 zi/8 zile/1 lună. Misiunea MODIS furnizează și seturi de date care caracterizează acoperirea cu gheață (extinderea stratului de gheață și temperatura gheții), precum și diverși parametri parametrizării a zăpezii (dimensiunea granulei de zăpadă, stratul de zăpadă, morfologia suprafeței, echivalentul de apă al zăpezii, adâncimea zăpezii) https://nsidc.org/data/modis/data_summaries.

În afară de misiunea MODIS, produse privind caracterizarea stratului de zăpadă și a gheții se mai obțin și prin utilizarea senzorilor radar activi, cum ar fi misiunile europene ERS-1, ERS-2 (Piesbergen, et al., 1995), ENVISAT ASAR (Pepe, et al., 2005), Sentinel 1 (Marbouti, et al., 2017). Misiunea Sentinel 1 face parte din programul Uniunii Europene de Observare a Pământului, Copernicus. Toate produsele de la misiunea Sentinel 1, precum și produsele de la celelalte misiuni Sentinel din cadrul Copernicus pot fi descărcate de pe ESA Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

1.4 Indici de vegetație și temperatura suprafeței terenului

1.4.1 Indexul de vegetație

Cu ajutorul indexului de vegetație se urmărește detectarea și inventarierea zonelor cu vegetație verde (green vegetation). Acesta este unul dintre parametrii care pot fi obținuți prin utilizarea datelor optice. Luând în considerare modul în care datele de teledetecție cu ajutorul senzorilor optici sunt înregistrate, indexul de vegetație poate fi definit ca o combinație matematică sau transformarea informațiilor înregistrate în benzile spectrale care pun în evidență proprietățile spectrale ale plantelor verzi, astfel încât să poată fi distinse de celelalte caracteristici ale imaginii (Sutton, 2012). Combinația sau transformarea ia în considerare în principal benzile spectrale roșu și infraroșu apropiat, aceste benzi putând oferi cele mai bune rezultate în a face distincție între diversele zone cu vegetație și solul fără vegetație sau alte caracteristici ale imaginii. Acest lucru se datorează faptului că vegetația verde reflectă mai multă lumină în banda de infraroșu apropiat, dar nu atât de multă în banda de roșu (JACKSON & HUETE, 1991). Meijerink (2007) prezintă câteva aplicații luând în considerare interesele hidrogeologiei în determinarea indexului de vegetație:

- Estimarea suprafețelor care este necesar a fi irigate prin pompare a apei subterane;
- Absența sau prezența apei subterane în craturile din zonele aride, presupunând că există un răspuns al vegetației ca urmare la prezența apei;
- Rolul vegetației în bugetul umidității solului și în realimentarea acviferelor;
- Descoperirea prin intermediul vegetației a zonelor cu căderi abundente de precipitații și prezența apelor subterane în zone slab echipate cu pluviometre;
- Prin urmărirea schimbării valorilor indicelui de vegetație date de modificările care apar în dezvoltarea vegetației, se pot studia în anumite situații probleme legate de fluctuația apelor subterane.

Vegetația verde poate fi clasificată considerând diverși indecși de vegetație privind abundența și activitatea relativă a vegetației verzi, cum ar fi (Sutton, 2012): indicele suprafeței foliare (LAI), procentul de acoperire cu vegetație, conținutul de clorofilă, biomasa, radiația fotosintetică activă absorbită de acoperirea vegetală (APAR).

Unul dintre cei mai utilizați indecși de vegetație este indicele de vegetație diferențiată normalizată (NDVI) (JACKSON & HUETE, 1991; Meijerink, 2007; Sutton, 2012) care ia valori în intervalul [-1,1]:

$$NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red) \quad (1.2)$$

Unde NIR este banda spectrală infraroșu apropiat, iar Red este banda spectrală roșu.

1.4.2 Temperatura suprafeței terenului

Temperatura suprafeței terenului reprezintă un alt parametru biofizic care poate fi util în managementul apelor subterane, iar acesta se obține prin combinarea diverselor benzi spectrale, banda infraroșu termal având un rol foarte important. Din diverse studii care au fost efectuate s-a evidențiat faptul că între parametrul biofizic al vegetației NDVI și temperatura suprafeței terenului există o corelație negativă: valori reduse ale NDVI corespund unor valori ridicate ale temperaturii (Dupigny-Giroux & Lewis, 1999).

1.4.3 Date multispectrale de teledetecție utilizate pentru determinarea indicilor de vegetație și a temperaturii suprafeței terenului

Așa cum a fost menționat anterior, misiunile satelitare cu senzori optici pot furniza date care se folosesc în determinarea anumitor parametri care pot fi utilizați pentru caracterizarea ciclului apei în natură. Începând cu anii '70, diverse misiuni au fost lansate. Vor fi prezentate în continuare programul cu cea mai lungă durată de viață și misiunea europeană curentă care achiziționează date multispectrale de teledetecție.

i) Programul Landsat

Cel mai longeviv program prin care au fost achiziționate în mod continuu date de teledetecție ale suprafeței terestre de rezoluție medie este programul **Landsat**. Acesta reprezintă o inițiativă comună între Institutul Geologic al S.U.A. (USGS) și NASA. Primul satelit al programului, Landsat-1, a fost lansat în iulie 1972 (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1>), iar ultimul, Landsat-8, a fost lansat în februarie 2013 (<https://landsat.usgs.gov/landsat-8-mission>), toți sateliții programului acoperind un interval de timp de mai mult de 40 de ani. Ținând seama de instrumentele montate la bordul fiecărei misiuni, sunt disponibile date care au fost achiziționate în diverse benzi spectrale cu rezoluții spațiale diferite și diverse dimensiuni ale scenei înregistrate. Astfel, Landsat 1-5 au avut la bord Scannerul Landsat Multispectral (MSS), cu imagini achiziționate în patru benzi spectrale, rezoluție spațială de 60 m, iar dimensiunea aproximativă a scenei achiziționate fiind de 170 km pe direcția N-S și 185 km pe direcția E-V (<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>).

Misiunile Landsat 4 și 5 au avut la bord un alt senzor cu achiziționare de imagini în șase benzi spectrale cu o rezoluție spațială de 30 m și o bandă termală. Este vorba de senzorul Landsat Thematic Mapper (TM), care are o dimensiune aproximativă a scenei de 170 km pe direcția N-S și 183 km pe direcția E-V (<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>).

Satelitul Landsat-7 a purtat senzorul Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), cu imagini achiziționate în șapte benzi spectrale cu rezoluția spațială de 30 m și o bandă în pancromatic, cu

rezoluția spațială de 15 m. Dimensiunea aproximativă a scenei înregistrare este aceeași ca pentru senzorul TM.

Ultimul satelit lansat din seria Landsat este Landsat-8, care a fost echipat cu senzorul Operational Land Imager (OLI) și senzorul pentru infraroșu termal- Thermal Infrared Sensor (TIRS). Împreună, cele două instrumente operează în 11 benzi spectrale, cu rezoluții spațiale diferite. Dimensiunea scenei achiziționate, la fel ca și în cazul instrumentului MSS, este de 170 km x 185 km (<https://landsat.usgs.gov/landsat-8-mission>). Un studiu privind indicii de vegetație calculați de date Landsat-8 este prezentat în (Ganie & Nusrath, 2016), iar o comparație între continuitatea indicilor de vegetație obținuți din date de la instrumentul OLI al misiunii Landsat-8 și de la instrumentul ETM+ al misiunii Landsat-7 poate fi găsit în (She, et al., 2015).

O nouă lansare din seria Landsat este planificată pentru septembrie 2021, cu satelitul Landsat-9.

ii) Programul european Copernicus- misiunea Sentinel 2

Misiunea actuală europeană de Observare a Pământului cu senzori optici este Sentinel-2. Aceasta reprezintă cea de-a doua misiune lansată în cadrul programului Copernicus. Primul satelit din constelație, Sentinel-2A, a fost lansat în iunie 2015, iar cel de-al doilea, Sentinel-2B, a fost lansat în martie 2017. Această misiune reprezintă o continuare a misiunilor SPOT și Landsat. A fost proiectată să aibă o frecvență de revizitare de 10 zile pentru un satelit și de 5 zile la ecuator, pentru ambii sateliți ai misiunii.

Instrumentul de Imagistica Multispectrală (MSI- Multispectral Imager Instrument) are o lățime a benzii de preluare de 290 km și acoperă 13 benzi spectrale cu diferite rezoluții (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>):

- 4 benzi cu rezoluția de 10 m,
- 6 benzi cu rezoluția de 20 m și
- 3 benzi cu rezoluția spațială de 60 m.

Sentinel-2 oferă date pentru diferite servicii, unul dintre acestea fiind monitorizarea suprafeței terenului, care poate furniza informații cu privire la acoperirea terenului. Câteva dintre aceste aplicații includ: planificarea teritorială, managementul forestier, managementul apelor, agricultura și siguranța alimentară. Una dintre variabilele specifice care pot fi obținute din datele Sentinel-2 este starea de dezvoltare a vegetației (Suhet, 2015).

Toate produsele de la această misiune și de la alte misiuni Sentinel pot fi descărcate de pe pagina web ESA Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

1.5 Umiditatea solului

Umiditatea solului reprezintă o variabilă importantă care guvernează transferul de apă și energie termică dintre suprafața terenului și atmosferă. Conținutul de umiditate al solului influențează temperatura solului, scăzând diferențele dintre temperaturile diurne și nocturne ale solului (Al-Kayssi, et al., 1990). În același timp, schimbările de utilizare și/sau acoperire a terenului pot afecta considerabil conținutul de umiditate al solului (Deng, et al., 2016). În 2010, umiditatea solului a fost recunoscută ca o

variabilă climatică esențială (ECV- Essential Climate Variable) (ESA, 2012). Începând cu mijlocul anilor '70, diverși sateliți operând în domeniul optic, infraroșu termal, precum și senzori activi sau pasivi din domeniul microundelor au fost utilizați pentru estimarea diverselor caracteristici ale solului. Wang și Qu (2009) au întocmit un rezumat cu diferențele principale dintre aceste tehnici, luând în considerare regiunile de lungimi de undă utilizate din spectrul electromagnetic, sursa de energie electromagnetică, precum și răspunsul spectral înregistrat de senzor și relația dintre răspunsul spectral și conținutul de umiditate al solului. Aceiași autori fac un rezumat al tehnicilor de teledetecție pentru estimarea umidității solului aproape de suprafață (vezi Tabelul 1-1).

Tabelul 1-1 Rezumatul tehnicilor de teledetecție utilizate pentru estimarea umidității solului aproape de suprafață (modificat după Wang și Qu (2009))

Domeniul spectral	Proprietățile observate	Avantaje	Limitări	Exemple de instrumente și senzori
Optic	Reflexia solului	Rezoluție spațială fină; Acoperire largă	Penetrare limitată a solului; Contaminare noroasă; Multe alte surse de zgomot; Perturbări din cauza condițiilor meteorologice și a vegetației	Misiunile Landsat 1-5, 7, 8 Sentinel-2
Infraroșu termal	Temperatura suprafeței terestre	Rezoluție spațială fină; Acoperire largă; Mărime fizică bine înțeleasă	Penetrare limitată a solului; Contaminare noroasă; Perturbări din cauza condițiilor meteorologice și a vegetației	Landsat 4-5, Landsat 7, Landsat 8
Microunde pasiv	Temperatura de strălucire Proprietățile dielectrice; Temperatura solului	Zgomot atmosferic redus; Penetrare moderată a suprafeței; Mărime fizică bine înțeleasă	Rezoluție spațială redusă; Perturbări din cauza rugozității suprafețelor și a vegetației	SMMR (Nimbus-7), SSM/I (DMSP), TMI (TRMM), AMSR-E (Aqua),
Microunde active	Coeficientul de retrodispersie; Proprietăți dielectrice	Zgomot atmosferic redus; Penetrare moderată a suprafeței; Rezoluție spațială ridicată; Mărime fizică bine înțeleasă	Lățime de bandă limitată; Perturbări din cauza rugozității suprafețelor și a vegetației	AMI (ERS-1/2) Altimetrele Seasat Altimetrele Jason-1/2 Misiunile SAR: ERS-1/2, SIR series, Radarsat-1/2, Envisat, Sentinel-1A, -1B

O parte dintre acești senzori s-au aflat la bordul unor misiuni având drept scop monitorizarea altor fenomene. Un exemplu este utilizarea instrumentului TMI care s-a aflat la bordul misiunii TRMM pentru estimarea precipitațiilor (vezi secțiunea 1.1.1).

Acuratețea determinărilor privind umiditatea solului poate fi îmbunătățită printr-o abordare comună cu utilizare de informații atât de la senzori activi cât și de la senzori pasivi. Este cazul misiunilor lansate SMOS și SMAP (WANG & QU, 2009), care vor fi descrise în secțiunile următoare.

1.5.1 SMOS- Umiditatea solului și salinitatea oceanului (Soil Moisture and Ocean Salinity)

SMOS este o misiune europeană lansată de ESA în noiembrie 2009, având ca principal scop realizarea de observații globale privind umiditatea solului în zonele de uscat și salinitatea în zonele acoperite cu oceane. La bordul satelitului SMOS se află un nou radiometru interferometric care operează în banda L din domeniul microundelor și care captează imagini cu "temperatura de strălucire" (https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS și radiometrul de imagistică cu microunde utilizând apertură sintetică (MIRAS). Principalele caracteristici ale senzorului SMOS sunt:

- Acuratețea de estimare a umidității volumetrice a solului la nivel global: $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- Rezoluția spațială: 35-50 Km;
- Rezoluția temporală: 1-3 zile;

Această misiune furnizează produse pentru diferite aplicații (ex. umiditatea solului, adâncimea optică a vegetației, produse auxiliare privind suprafața terestră) și cu diferite nivele de procesare (ex. rezoluții spațiale diferite ale celulelor cadrului geografic utilizat, rezoluția temporală a produsului) (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>).

1.5.2 SMAP- Umiditatea solului determinată cu senzori activi și pasivi (Soil Moisture Active Passive)

SMAP este o misiune americană lansată de NASA în ianuarie 2015 pentru cartarea umidității solului și a înghețului/dezghetului din spațiu. Printre instrumentele aflate la bordul acestei misiuni se află un radiometru și un radar cu apertură sintetică care sunt utilizate pentru a efectua măsurători concurente ale emisiilor de suprafață și ale retrodifuziunii. Principalul scop al acestei misiuni este de a achiziționa date care să ajute la creșterea nivelului de cunoaștere a proceselor care conectează apa, energia și ciclurile de carbon și pentru a mări capacitățile modelelor de predicție a vremii și climatului (<https://www.nasa.gov/smap/overview>). Caracteristicile sale sunt:

- Acuratețea de estimare a umidității volumetrice a solului la nivel global: $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
- Rezoluția spațială: 10 Km;
- Rezoluția temporală: 3 zile.

1.6 Monitorizarea nivelului rezervoarelor globale/ lacurilor (G-REALM)

G-REALM este un proiect inițiat de Serviciul Agricol Extern al Departamentului de Agricultură S.U.A (USDA-FAS), în cooperare cu NASA și Universitatea Maryland. Scopul său este de a monitoriza în mod regulat variațiile lacurilor și a înălțimilor rezervoarelor multor lacuri de dimensiuni foarte mari din jurul lumii. Variațiile sunt obținute utilizând datele de la altimetrul radar NASA/CNES/ESA/ISRO utilizat pentru corpuri de apă interioară. Produsele corespunzătoare sunt reprezentate de cote de suprafață care sunt generate prin procese semiautomate (G-REALM, 2018; Rodell, 2015). Validarea diferitelor date ale altimetrului radar satelitar a fost realizată prin utilizarea de date din teren. Tabelul 1-2 prezintă lista sateliților care oferă date radar altimetrice, începând cu 1978. Produsele privind cotele suprafețelor sunt disponibile în funcție de perioada de revizitare a satelitului.

Tabelul 1-2 G-REALM Instrument Summary (after (G-REALM, 2018)

Satelitul	Timpul de operare	Perioada de revizitare
Topex/Poseidon	1992-2002	10 zile
Jason-1	2002-2008	10 zile
Jason-2/OSTM	2008-2016	10 zile
Jason-3	2016-	10 zile
HY-2A	2011-Prezent	14 zile
Seasat	1978	17 zile
Geosat	1985-1989	17 zile
GFO	2000-2008	17 zile
Sentinel-3A	2016- 2023	27 zile
Sentinel-3B	2017- 2024	27 zile
ERS-1	1992-1993, 1995-2000	35 zile
ERS-2	1995-2003	35 zile
ENVISAT	2002-2010	35 zile
SARAL	2013-2016	35 zile
ICESat-1 (laser)	2003-2009	90 zile
Cryosat-2	2010-Prezent	365 zile
ICESat-2 (laser)	2018-	variabilă
Jason-CS/Sentinel-6	2020- 2026	variabilă
SWOT	2020-	variabilă

Înălțimea mării este măsurată cu acuratețe între 10 și 2 cm, în funcție de misiunea satelitară.

1.7 Diminuarea globală a resurselor de apă subterană

Ca principală sursă de apă dulce utilizată pentru multe activități umane, supraexploatarea apelor subterane poate duce la probleme serioase în ceea ce privește managementului apei (Auvinet, et al., 2017; Bawden, et al., 2012; Poland, 1984; Erkens, et al., 2015; Sato, et al., 2006). Considerând importanța unui bun echilibru între pomparea apei subterane și realimentarea acviferelor, ar trebui luat în considerare un plan de gestionare a utilizării apei subterane pompate (Meijerink, 2007). Gravimetria satelitară poate fi utilizată pentru a determina diminuarea resurselor de apă subterană la nivel regional și la nivel global, luând în considerare variațiile câmpului gravific al Pământului. Luând în considerare topografia și compoziția geologică, modele câmpului gravific ale Pământului prezintă variațiile de densitate ale planetei, atât la interior, cât și la suprafața sa (Pail, et al., 2010).

1.7.1 Misiunea GRACE- Gravity Recovery and Climate Experiment

GRACE este prima misiune satelitară privind câmpul gravific care măsoară transportul de masă din spațiu. Este o misiunea a NASA care a fost lansată în 2002 și care constă în două vehicule spațiale care zboară la o distanță de aproximativ 220 km una față de alta, pe o orbită polară aflată la 500 km deasupra Pământului (GRACE, 2012).

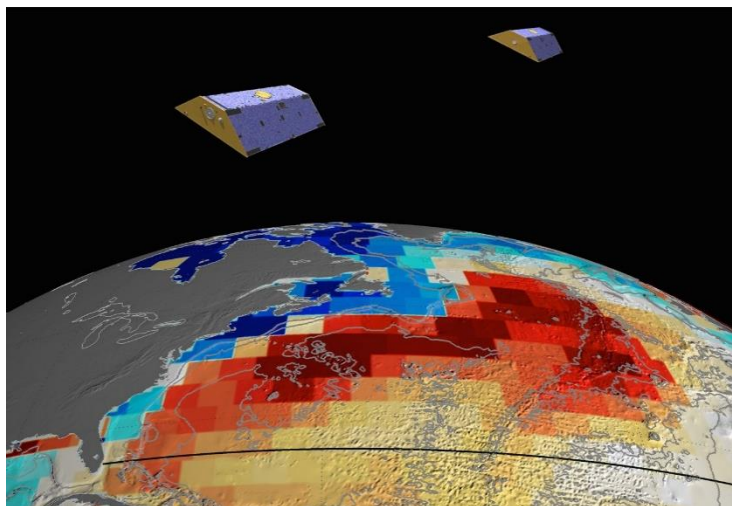


Figura 1-1 Sateliții GRACE, NASA. Credite: NASA/JPL-Caltech

Principalul senzor al misiunii este un sistem în intervalul de bandă K (K-Band Ranging system) pentru măsurarea cu precizie a variațiilor de distanță intersatelitare (Hashemi Farahani, et al., 2014; GRACE, 2012). În mai 2008 a fost lansat un succesor al misiunii GRACE. Este vorba de misiunea GRACE-FO (Continuarea misiunii GRACE- GRACE- Follow-up) care a fost realizată în urma unui parteneriat dintre NASA și Centrul German de cercetare pentru Geoștiințe (GFZ). GRACE-FO continuă să urmărească mișcările apei de la nivelul Terrei pentru a monitoriza schimbările în depozitele de apă subterană, cantitățile de apă din marile râuri și lacuri, umiditatea solului, stratul de gheață și ghețarii și nivelul apei determinat de adăugarea de apă la nivelul oceanului (GRACE-FO, 2018). Hashemi Farahani, și alții (2014) prezintă un studiu al tendințelor de variație a masei pentru o perioadă de aproximativ 5 ani, pentru câteva regiuni la nivel mondial, pe baza datelor GRACE procesate cu o metodologie dezvoltată de Universitatea tehnică din Delft (TU Delft): tendință lineară a masei în Eurasia, tendință pozitivă a masei în zona lacului Ladoga, tendință negativă a masei în zona Mării Aral. Din aceeași lucrare s-a putut concluziona că rezoluția spațială poate ajunge la 200 km sau mai înaltă.

1.7.2 Misiunea GOCE- Exploratorul câmpului gravific și al circulației oceanice în stare stabilă

GOCE este o misiune a Agenției Spațiale Europene pentru explorarea Pământului, care a fost lansată în anul 2009, orbitând la o altitudine de 250 km. GOCE a cartat variațiile câmpului gravific ale Pământului la un nivel extrem de detaliat și cu o acuratețe foarte ridicată, rezultând un model unic al "geoidului", care reprezintă suprafața de egal potențial gravitațional definit de câmpul gravific. Acest model poate fi utilizat pentru toate aplicațiile care implică măsurători de câmp gravitațional (GOCE, 2015). Modele de câmp gravific au fost estimate pe baza datelor GRACE și GOCE (Pail, et al., 2010). Toate datele GOCE sunt disponibile gratuit pentru scopuri științifice și sunt utilizate în continuare după finalizarea misiunii în 2013 (GOCE, 2015).

1.7.3 Misiuni satelitare radar cu apertură sintetică (SAR)

Dacă apa subterană este intens exploatată, supraexploată sau realimentată în mod intens, efectele acestor fenomene pot ajunge să fie observate la nivelul suprafeței terestre sub forma deplasărilor pe verticală displacements (Galloway & Hoffmann, 2006). Interferometria SAR oferă o modalitate potrivită de a măsura extinderea spațială și magnitudinea deformării suprafeței asociate compactării sistemului acvifer (Galloway, et al., 1998).

Prima misiune cu radar cu apertură sintetică (SAR) a fost misiunea americană SEASAT (1978) care a furnizat câteva perechi interferometrice SAR bine selectate. Prima misiune satelitară care a avut la bord un SAR cu formare de imagine și care a furnizat suficiente date pentru interferometrie a fost satelitul european ERS-1 (Bamler & Hartl, 1998). Lansat în iulie 1991, ERS-1 este primul satelit de Observare a Pământului a Agenției Spațiale Europene (Ferretti, et al., 2007). Acest satelit a operat în bandă C, cu un interval de revizitare de 35 de zile (ESA, 2017). Această misiune a fost urmată de lansare în 1995 a unui satelit identic, ERS-2. Din august 1995 până în mai 1996 cei doi sateliți ERS au realizat prima misiune în "tandem" (Ferretti, et al., 2007). Începând cu 1991, ESA a avut aproape în permanență o misiune SAR pe orbită, un interval de pauză existând între finalizarea misiunii ENVISAT- ASAR în 2012 și lansarea misiunii Sentinel-1 în 2014. Tabelul 1-3 prezintă un rezumat al misiunilor SAR finalizate și curente, așa cum au fost prezentate în (Metternicht, et al., 2005; ESA, 2017; ESA, 2018; ESA eoPortal Directory, 2018; KARI & SIIS, 2015; Jaxa, 2007; e-geos, 2018).

Tabelul 1-3 Principalele caracteristici ale misiunilor SAR finalizate sau operaționale (modificat și actualizat după (Metternicht, et al., 2005))

Satelit	ERS-1	ERS-2	JERS-1	Radarsat-1	Radarsat-2	Envisat	ALOS 1	ALOS 2	TerraSAR-X	TanDEM-X	Cosmo-SkyMed	Kompsat-5	Sentinel-1
Senzor SAR	AMI	AMI	SAR	SAR	SAR	ASAR	PALSAR	PALSAR 2	TSX-1	TDX		SAR	SAR
Agentia Spațială	ESA	ESA	NASDA (JAXA)/ MITI/ STA	CSA	CSA/MDA	ESA	JAXA	JAXA	DLR/Airbus GmbH	DLR/Airbus GmbH	ASI/MoD	KARI	ESA
Lansare	1991	1995	1992	1995	2007	2002	2006	2014	2007	2010	2007	2013	S-1A: 2014 S-1B: 2016
Misiune finalizată	2000	2011	1998	2013	Operațional	2012	2011	Operațional	Operațional	Operațional	Operațional	Operațional	Operațional
Banda	C	C	L	C	C	C	L	L	X	X	X	X	C
Lungime de undă (cm)	5.7	5.7	23.5	5.6	5.5	5.7	23.6	22.9	3	3	3.1	3.2	5.54
Moduri de operare	SAR Image mode/ wave mode	SAR Image mode/ wave mode	SAR image mode	Single Beam/ ScanSAR/ On-board recorder	Single Beam/ ScanSAR/ Spotlight	Stripmap (SM)/ ScanSAR	Stripmap/ ScanSAR	Stripmap/ ScanSAR/ Spotlight	Spotlight/ Stripmap/ ScanSAR	Spotlight/ Stripmap/ ScanSAR	Spotlight/ Stripmap/ ScanSAR	Standard/ Wide Swath/ High Resolution	IWS/ Wave-Mode/SM / Extra wide-swath
Polarizare	VV	VV	HH	HH	Polarizare completă	HH,VV, VV/HH, HV/HH, VH/VV	Toate	Toate	Simplă, duală, completă	Simplă, duală, completă	VV, HH, HV, VH	VV, HH, HV, VH	Simplă și duală
Unghi de incidență(°)	23	23	35.21	20-49	20-49	15-45	8-60	8-70	15-60	20-55	Variabil	20-45	Variabil
Rezoluție spațială (m)	10-30	10-30	18	25x28	25x28	28x28, 150x150	7-100	1-100	1.1-40	1.1-40	1-100	0.85-20	5-20
Lățimea de bandă (km)	100	100	75	100	100	100	40-350	350	15-60	30	10-200	5-120	80- 250
Perioada de revizitare (zile)	35	35	44	24	24	35	46	14	11	11	16	28	6 cu doi sateliți
Altitudinea orbitei (km)	785	785	568	798	798	783	691.65	628	514	514	620	550	693

2 Monitorizarea deplasărilor în mediul urban la nivel internațional

Subsidența reprezintă una dintre formele de degradare care afectează suprafața terenului (Bawden, et al., 2003; Burkett, et al., 2003; Sneed, et al., 2014; Bitelli, et al., 2015). Generat de cauze naturale sau antropice, acest fenomen este caracterizat prin scufundarea sau tasarea suprafeței terestre (Allaby, 2013) și poate afecta atât suprafețe atât la nivel local cât și la nivel regional (USGS, 2017).

Conform Dicționarului Oxford pentru Mediu și Conservare, în geologie, subsidența este definită ca fiind o "tasare a suprafeței terestre ca un rezultat al unei prăbușiri a unei formațiuni poroase din care a fost extrasă o cantitate foarte mare de apă" (Park & Allaby, 2017).

California Water Science Center al Institutului de Geologie al S.U.A menționează că subsidența este unul dintre cele mai variate fenomene de degradare ale terenului, acoperind de la prăbușiri locale sau de dimensiuni mici, până la areale regionale vaste (USGS, 2017).

Societatea Geologică precizează că subsidența "poate fi privită ca o mișcare a suprafeței terestre care are loc din cauza extracției de resurse minerale din mediul subteran, fie că este vorba de resurse solide, lichide sau gazoase" (The Geological Society, 2018).

În afara definițiilor în care cauza subsidenței este legată de extracția de diferite materiale din subteran, Dicționarul de Geologie și Științe ale Pământului oferă și alte definiții:

- "O depresiune progresivă a scoarței terestre, care permite acumularea și conservarea sedimentelor. Subsidența apare ca o cauză a convecției mantalei și de încărcarea sedimentelor. Rata subsidenței va controla proporția de sedimente depozitate care vor fi păstrate în zona de subsidență"
- "Scufundarea sau tasarea suprafeței terenului din cauze naturale sau antropice. Materialul de suprafață fără latură liberă este deplasat vertical în jos fără deplasare în plan orizontal sau cu o ușoară deplasare în plan orizontal" (Allaby, 2013).

Una dintre sursele antropice ale subsidenței terenului în zonele urbane este reprezentată de extragerea intensivă a apei subterane necesară pentru a asigura diversele nevoi și funcționalități urbane, care conduce la compactarea sistemelor acvifere predispuse la acest fenomen (Galloway & Burbey, 2011). Acest lucru vine în contextul creșterii rapide a populației și a dezvoltării industriale (Poland, 1984). Astfel apa subterană pompată este utilizată pentru scopuri industriale, pentru irigarea suprafețelor agricole ale orașelor și ale zonelor verzi, pentru alimentarea cu apă și pentru menținerea funcționalității diverselor infrastructuri subterane. Deoarece, de obicei această degradare a suprafeței terestre are loc într-un ritm lent, problema nu este prea des observată până când apare un efect vizibil (UNESCO, 2015). Totuși, Galloway (2011) menționează că subsidența suprafeței terestre poate avea loc și ca o scufundare bruscă a unor diferite secțiuni de sol. Efectele acestui fenomen pot afecta infrastructurile antropice (drumuri, căi ferate, poduri, conducte, clădiri) sau sisteme naturale (zone umede, suprafețe de drenaj, schimbări de cursuri de apă, eroziuni) (USGS, 2017; UNESCO, 2015).

Fenomenele de subsidență asociate pompării de apă subterană au fost recunoscute în primele decenii ale secolului trecut, pe baza cercetărilor lui O. E. Meinzer de la USGS (USGS, 2017). Printre primele zone în care fenomenele de subsidență care au fost observate înainte de 1920 se numără: Debrecen (Ungaria), Tokyo (Japonia), Mexico City (Mexic), Alabama (S.U.A.) și Santa Clara Valley (S.U.A.) (Poland,

1984). Despre Mexico City este menționat că este afectat de subsidență începând cu 1891 (Poland, 1977; Poland, 1984).

Cu toate că de-a lungul timpului au fost utilizate diferite tehnici și metode pentru a monitoriza fenomenele de subsidență a terenului, precum și pentru a contracara efectele sale de-a lungul timpului, acest fenomen este încă de actualitate, noi tehnici și discuții ajungând în centrul atenției.

2.1 Metode de monitorizare a deplasărilor verticale ale terenului

Mai multe metode au fost utilizate de-a lungul timpului pentru monitorizarea subsidenței, în întreaga lume. Pornind de la tehnica clasică de nivelment geometric de precizie, continuând cu extensometrele pentru foraje, tehnicile GNSS (pornind de la observațiile GPS) și finalizând cu interferometria satelitară SAR, fiecare metodă prezintă avantaje și dezavantaje luând în considerare mai multe criterii (Bitelli, et al., 2015), cum ar fi: ordinul de mărime înregistrat, efortul financiar, suprafața acoperită și resursele umane necesare. Metodele de monitorizare a subsidenței pot fi completate cu alte metode asociate monitorizării apei subterane, pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor studiate. În categoria metodelor asociate pot fi incluse: măsurători piezometrice, studii geotehnice, studii hidrogeologice, măsurători seismice, date geologice, date stratigrafice, date LIDAR, date de gravimetrie absolută, date meteorologice, precum și alte tipuri de măsurători relevante (Samsonov, et al., 2014; Castellazzi, et al., 2014; Solari, et al., 2017; Raspini, et al., 2014; Ruiz-Armenteros, et al., 2016; Bakon, et al., 2016; Parcharidis, et al., 2006).

2.1.1 Nivelment de precizie

Cea mai precisă metodă pentru măsurarea diferențelor de altitudine la suprafața terenului este nivelmentul geometric de precizie (Karila, et al., 2013). Această metodă constă în determinarea altitudinilor în punctele unei rețele de reperi de nivelment, aflată la suprafața terenului. Prin măsurători repetate la diferite interval de timp, se poate determina dacă au apărut deplasări pe verticală, față de un reper de control al rețelei (Poland, 1984). Reperele de control sunt amplasate în zone stabile cu roci consolidate, în afara zonei afectate de deplasări. Acuratețea măsurătorilor de nivelment depinde de echipamentele și de echipamentele utilizate (Karila, et al., 2013). De aceea, conform lui Poland (1984), cea mai precisă metodă de nivelment este nivelmentul geometric de ordinul I. Același autor specifică faptul că pentru nivelmentul geometric de ordinul I se realizează o dublă parcurgere a drumuirii, între cele două treceri fiind acceptată o diferență de $3\sqrt{k}$ mm, unde k este lungimea traseului drumurii în km. Pentru nivelmentul geometric de ordinul II precizia de închidere a rețelei trebuie să fie mai mică de $6\sqrt{k}$ mm, unde k este lungimea traseului drumurii în km (Galloway & Burbey, 2011). Diferența esențială dintre cele două metode este legată de costuri, pentru nivelmentul geometric de ordinul II fiind necesar jumătate din efortul financiar necesar pentru realizarea nivelementului de ordinul I (Poland, 1984). Ținând seama de metodele actuale de nivelment de precizie, abaterea standard este sub $\frac{1 \text{ mm}}{\sqrt{km}}$ (Karila, et al., 2013; Bitelli, et al., 2015). Aceste standarde pot fi diferite în funcție de particularitățile rețelelor naționale de nivelment și de standardele stabilite de fiecare țară în parte.

Această metodă de monitorizare a subsidenței este încă foarte utilizată în zone unde există rețele de nivelment și sunt disponibile date istorice (Galloway & Burbey, 2011), precum și pentru calibrarea rezultatelor obținute cu alte metode de măsurare a subsidenței.

Unul dintre primii reperi de nivelment a fost amplasat în San Jose, S.U.A., în 1912. După măsurători repetate, pentru perioada 1923-1933 a fost observată o deplasare verticală negativă de 1.2 m pentru acel reper punctual (Poland, 1984). În Niigata, Institutul Geologic Japonez a efectuat măsurători în rețele de nivelment de ordinul I în câțiva ani începând cu 1898, dar subsidența a devenit vizibilă în acea zonă începând cu 1955 (Hirano, 1969). Rețeaua de nivelment cuprinde atât linii de nivelment de ordinul I, cât și linii de nivelment de ordinul II, în funcție de gravitatea fenomenului de subsidență (Poland, 1984).

2.1.2 Extensometrie pentru foraje

Extensometrele verticale de foraj sunt utilizate pentru a măsura deplasarea sau modificarea distanței verticale dintre baza unui foraj și suprafața terenului, considerând grosimea stratului de pământ sau de roci (Poland, 1984; Galloway & Burbey, 2011; Riley, 1984). Există mai multe tipuri de extensometre care au fost proiectate de-a lungul timpului, în funcție de zonele în care fenomenele de subsidență au fost studiate. Astfel, primele extensometre despre care se menționează că au fost utilizate au fost proiectate în Japonia în anii 1930 (Poland, 1984; Riley, 1984). Aceste instrumente sunt de două tipuri, cu un tub sau cu două tuburi. Gradul de compactare apărut în argile moi se înregistrează prin cât iese în afară tubul față de nivelul terenului. Din cauza rezistenței sporite la frecare o dată cu creșterea adâncimii, extensometrele cu un singur tub nu pot fi folosite pentru adâncimi mai mari de 50 până la 100 m (Poland, 1984), de aceea au fost proiectate extensometrele cu dublu tub, cu ajutorul cărora să se poată măsura cu acuratețe compactarea. Forajul cu tub dublu constă într-un sistem de două tuburi concentrice, dintre care numai tubul exterior are contact cu sedimentele și este influențat de presiunea laterală. În felul acesta, tubul interior poate fi utilizat pentru a indica gradul corect de compactare în punctul de măsurare (Poland, 1984).

În afară de instrumentele japoneze, în literatura științifică mai sunt menționate și extensometre americane și din Mexic (Poland, 1984; Galloway & Burbey, 2011; Riley, 1984). Extensometrele cu cablu ancorat și extensometrele cu tub au fost utilizate de U.S.G.S. cu succes pentru diferite investigații de subsidență. Primul extensometru american utiliza un cablu tensionat pentru măsurarea variației de distanță dintre suprafața terenului și ancora fixată la baza inferioară a forajului, lângă baza sistemului de pompare a acviferului (Riley, 1984). Tensiunea din cablu era menținută prin utilizarea unor contragreutăți de la suprafața terenului, iar mișcarea relativă a cablului produsă de compactarea sistemului acvifer era înregistrată de un sistem standard de monitorizare cu sondă (Poland, 1984). Echipamentul a suferit diverse modificări pentru a îmbunătăți acuratețea de înregistrare a deplasărilor verticale, Poland (1984) menționând că echipamentul poate înregistra variații ale grosimii sistemului acvifer de ordinul 0.1 până la 0.2 mm. O altă metodă pentru eliminarea frecării dintre cablu și carcasă a fost proiectarea extensometrului cu tub liber, care utilizează principii similare cu cele ale extensometrului japonez cu dublu tub (Galloway & Burbey, 2011; Poland, 1984).

În unele zone investigate au fost semnalate diverse probleme legate de forțele de compresie, evidențiind și limitările pe care această metodă de măsurare le are în anumite condiții (Poland, 1984).

2.1.3 Utilizarea sistemelor GNSS

Începând cu anii 1980, când prima constelație de sateliți de poziționare globală GNSS a fost lansată- sistemul american de poziționare globală prin satelit, GPS - o nouă tehnică de determinare a deplasărilor orizontale și verticale ale suprafeței terenului a devenit disponibilă. Tehnicile GNSS au la bază utilizarea a cel puțin patru sateliți de navigație cu ajutorul cărora se determină coordonatele absolute ale unui punct (X,Y,Z), într-un sistem global de referință bine definit (Zerbini, et al., 2007). Actualmente, în afară de GPS mai sunt disponibile observații de la sistemul global rusesc GLONASS, sistemul global european Galileo și sistemul global chinezesc BEIDOU (GSA, 2018). Pornind de la puncte de referință aflate la suprafața terenului, pot fi dezvoltate rețele GNSS pentru a realiza măsurători la diverse intervale de timp în zonele de interes. Stațiile GNSS permanente care au coordonate (X,Y,Z) cunoscute pot fi utilizate pentru a genera corecții GNSS diferențiale care permit estimarea poziției 3D a unui receptor rover (Galloway & Burbey, 2011). Bitelli (2015) precizează că prin utilizarea tehnologiilor actuale de măsurare și compensare , stațiile GNSS permanente sunt capabile să furnizeze determinări de deplasări pe verticală cu acuratețe de până la 1 mm/an, după mai mult de 3 ani de achiziție de observații GNSS. Cu toate că sunt răspândite la nivel global, rețele GPS geodezice au fost realizate în Antelope Valley, California, în Albuquerque, New Mexico, în Las Vegas, Nevada (Galloway & Burbey, 2011). La momentul actual, tehnicile GNSS nu sunt folosite doar pentru determinarea deplasărilor pe verticală, dar și pentru validarea rezultatelor de determinare a subsidenței cu ajutorul altor metode, cum ar fi tehnicile de interferometrie Radar cu Apertură Sintetică (SAR) (Armas, et al., 2016; Zerbini, et al., 2007).

2.1.4 Interferometria Radar cu Apertură Sintetică (SAR)

Deoarece mediul urban este caracterizat de aspecte sociale, economice și de mediu complexe (Vazquez- Sune, et al., 2005), pentru o planificare spațială durabilă ar fi necesar să fie utilizate noi metode pentru monitorizarea și cuantificarea efectelor proceselor subterane (CCIAS, 2015). În ultimele decenii, teledetecția, prin achizițiile calitative și cantitative realizate în mod repetitiv și cu o largă acoperire spațială, au oferit oportunitatea de depistare timpurie a subsidenței terenului în zonele urbane. Tehnicile Radar cu Apertură Sintetică (SAR) sunt utilizate în mod deosebit, ținând cont de capabilitățile lor de detecție și estimare a fenomenelor fine de degradare a terenului (Poenaru, et al., 2015). Prin corelații cu nivelul piezometric sau cu alte măsurători la nivelul terenului (Bell, et al., 2008; Declercq, et al., 2006), seriile temporale de date interferometrice SAR au început să fie utilizate pentru a arăta diverși parametri caracteristici ai dinamicii apei subterane (ex. răspunsul sezonier sau pe termen lung al sistemului acvifer, proprietățile de curgere, identificarea barierelor din stratul acvifer) (Chen, et al., 2016; Galloway & Hoffmann, 2006).

2.1.4.1 Tehnici InSAR

Interferometria SAR este o tehnică de măsurare datând din anii 1970, dar care a devenit populară în anii 1990, o dată cu lansarea de către ESA a misiunii ERS-1 (Bamler & Hartl, 1998). Achiziția datelor se realizează cu senzori activi coerenți, care utilizează ca sursă de energie radarul, care operează în domeniul microundelor. Acești senzori au capabilități operaționale zi și noapte, indiferent de condițiile meteorologice (Ferretti, et al., 2007; Declercq, et al., 2006). Sistemele SAR achiziționează informații atât

în amplitudine cât și în fază. Interferometria SAR exploatează diferența de fază dintre două achiziții preluate asupra aceleiași zone la momente diferite de timp, cu aproximativ același unghi de preluare, generând o interferogramă (Chelbi, et al., 2011; Bamler & Hartl, 1998). Distanța dintre punctele de pe orbită de pe care au fost preluate achizițiile este o distanță cunoscută, denumită bază de preluare (Bamler & Hartl, 1998). În interferometria radar, prima imagine din perechea interferometrică este denumită scenă principală (în *engleză master*), iar ea de-a doua imagine este scenă secundară (în *engleză slave*) (Chelbi, et al., 2011), iar interferograma SAR este generată prin multiplicarea primei imagini SAR cu conjugata complexă a celei de a doua imagini (Ferretti, et al., 2007). Faza interferometrică reprezintă diferența de fază dintre cele două imagini, iar amplitudinea interferogramei reprezintă amplitudinea primei imagini înmulțită cu amplitudinea celei de a doua imagini (Ferretti, et al., 2007). Diferența lor de fază reprezintă franjele interferometrice care pot fi utilizate pentru generarea modelului digital al terenului (DEM), prin aplicarea mai multor pași de procesare (Rocca, et al., 1997). Faza interferometrică ($\Delta\phi$) poate fi scrisă ca o sumă a următorilor parametri:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha + t + noise \quad (2.1)$$

unde ΔR reprezintă deplasarea în distanță înclinată a țintei radar, inclusiv informațiile despre eroarea orbitală; α reprezintă efectul atmosferic; t este distorsia topografică provenind de la unghiurile de preluare ușor diferite; noise- zgomotul- este factorul la care contribuie efectele de decorelare (RiskNET, 2012; Ferretti, et al., 2007). Așa cum a fost menționat anterior, o interferogramă SAR poate fi utilizată pentru generarea unui DEM, dar, în general, prezența distorsiunii topografie și a efectelor atmosferice în faza interferometrică nu permit estimarea deformațiilor de la suprafața terenului (Ferretti, 2007).

Dintre limitările tehnicilor interferometrice SAR (InSAR) fac parte: decorelarea pentru suprafețele de teren acoperite cu vegetație, incoerența cauzată de diferențele mari de orbită dintre cele două achiziții (denumită și baza de preluare), diferențele mari de timp între cele două achiziții, zgomotul sistemului, penetrarea radarului prin mediul de difuzie (Chelbi, et al., 2011; Ferretti, et al., 2007; Poenaru, et al., 2015). Atunci când caracteristicile suprafeței rămân neschimbate pentru ambele achiziții, zona monitorizată este coerentă (Poenaru, et al., 2015). Cu toate acestea, un exemplu de pereche interferometrică cu coerență bună care poate fi utilizată pentru estimarea deplasărilor verticale ale terenului este dat de Galoway și alții (1998) într-un studiu cu privire la Antelope Valley, Mojave Desert, California. Rezoluția deplasărilor terenului a fost în intervalul +/-10mm.

2.1.4.2 Tehnica DInSAR

Dacă pentru o anumită zonă studiată sunt disponibile mai multe scene SAR achiziționate cu aceeași geometrie la momente diferite de timp, efectele componente topografice și a altor factori poate fi eliminată și se poate măsura componenta de deplasare a terenului. Acest lucru este valabil și dacă se folosește un model digital al terenului extern pentru a elimina componenta topografică a fazei interferometrice (Ferretti, 2007). Această tehnică poartă denumirea de Interferometrie SAR Diferențială (DInSAR). Faza diferențială interferometrică poate fi scrisă într-o formă simplificată ca (RiskNET, 2012):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha \quad (2.2)$$

unde ΔR reprezintă deplasarea în distanță înclinată a țintei radar, iar α este efectul atmosferic.

Una dintre limitările acestei tehnici este legată de faptul că încă este prezent în rezultatul final o parte din efectul atmosferic (Wasowski, 2014). Acest lucru face ca DInSAR să nu fie fezabil pentru măsurători precise de deplasări dintre două puncte (RiskNET, 2012).

Prin evoluția de la tehnicile InSAR la tehnicile DInSAR, au apărut de asemenea multiple studii de caz de monitorizare a subsidenței terenului prin utilizarea DInSAR. Câteva dintre aceste exemple prezintă utilizarea tehnicilor DInSAR pentru monitorizarea subsidenței urbane în orasul Napoli, Italia (Tesauro, et al., 2000), în Murcia, Spania (Herrera, et al., 2009; Tessitore, et al., 2013), în Paris, Franța (Fruneau, et al., 2004), sau în Delhi, India (Kala, 2015).

2.1.4.3 Tehnici InSAR multi-temporale (MTI)

Pentru estimarea și corectarea fazei atmosferice reziduale, a erorilor de model digital al terenului, a decalărilor de fază legate de poziția țintei la nivel de sub-pixel și a pierderii de coerenței (CCIAS, 2015; Wasowski & Bovenga, 2014), noi tehnici InSAR au fost dezvoltate, luând în considerare serii temporale lungi de date SAR (Wasowski & Bovenga, 2014). Aceste tehnici poartă denumirea de tehnici InSAR multi-temporale (MTI). Cele două categorii principale ale MTI sunt:

- **Interferometria cu Ținte Permanente (PSI)** (the Persistent Scatterers Interferometry (PSI)) (Ferretti, et al., 2001) și alte abordări similare. Principala diferență dintre această metodă și cele prezentate anterior este faptul că pentru această metodă se bazează pe formarea de interferograme SAR multiple, numărul minim fiind de 12 scene SAR, conform (CCIAS, 2015), 15 scene SAR conform (RiskNET, 2012) și mai mult de 30 de scene conform (Galloway & Hoffmann, 2006). Aceste interferograme sunt utilizate pentru identificarea și utilizarea de detalii naturale din teren, stabile și foarte reflectorizante, caracterizate de amplitudine fiabilă și fază a semnalului coerentă în toate scenele SAR (Ferretti, et al., 2001; Wasowski & Bovenga, 2014). These are the permanent or persistent scatterers (PSs). Conform (Heleno, et al., 2011), coerența reprezintă "o măsură a gradului de potrivire a modelului cu observațiile, care poate lua valori între 0 și 1". Măsurătorile PSI sunt efectuate în lungul liniei de vizare (*engl. line-of-sight*), una dintre particularitățile acestei metode fiind aceea că toate seturile de date sunt registrate la aceeași scenă principală (CCIAS, 2015). Țintele permanente arată deplasările care apar în zona de studiu pentru care sunt disponibile seriile temporale, relativ față de un punct de referință (Ferretti, et al., 2007). Harta deplasărilor se obține prin calculul secvențial al deplasărilor relative dintre o țintă radar individuală și punctul de referință, pe întreaga perioadă de analiză (RiskNET, 2012).

Câteva dintre avantajele acestei metode sunt: eliminarea contribuțiilor fazei atmosferice, utilizarea tuturor datelor radar disponibile indiferent de geometria bazei de preluare, obținerea unei coerențe bune a fazei utilizând datele disponibile (Bell, et al., 2008), și a unei acurateți de ordin milimetric (Ferretti, et al., 2007). În următoarele secțiuni vor fi prezentate alte abordări similare, care au fost folosite în diverse studii.

- Tehnica **Small Baseline Subset (SBAS)** și metodele conexe. Aceste metode se concentrează pe perechi de interferograme caracterizate prin baze spațiale de preluare scurte (Berardino, et al., 2002) pentru a utiliza informații mai bine distribuite spațial. Metodele SBAS se concentrează pe

ținte distribuite, deoarece acestea au o sensibilitate mai mare la decorelațiile temporale și de volum, față de țintele permanente PS (Wasowski & Bovenga, 2014).

Armas și colab. (2016) prezintă un studiu asupra orașului București în care sunt utilizate ambele tehnici MTI.

2.2 Monitorizarea InSAR a zonelor urbane afectate de fenomene de subsidență ca rezultat al pompării apei subterane

Pornind de la avantajele tehnicilor InSAR menționate în secțiunea anterioară, o multitudine de studii realizate în ultimele decenii cu privire la fenomenele de subsidență, s-au concentrat pe utilizarea acestor tehnici. Cu toate acestea, pentru rezultate mai bune sau pentru validare, tehnicile InSAR sunt utilizate împreună cu alte metode de monitorizare. Date relevante din diverse domenii sunt utilizate, de asemenea, în completare. Un rezumat al mai multor studii cu privire la subsidența din zonele urbane, prin utilizarea tehnicilor InSAR, având în general ca principală cauză a subsidenței pomparea apei subterane a fost realizat. Chiar dacă pentru unele zone au fost efectuate mai multe studii de-a lungul timpului, în acest rezumat sunt cuprinse în principal cele mai noi studii, care folosesc cele mai noi tehnici InSAR, dar în care se face trimitere și la studiile efectuate anterior în acele zone. Din rezumatul lucrărilor sunt mai multe aspecte care pot fi identificate și care pot fi tratate, în funcție de domeniul de interes. Astfel:

- Din punct de vedere geografic, ar putea fi de interes răspândirea geografică a orașelor afectate de subsidență, localizarea acestora (zona costieră, zonă continentală, etc.), dimensiunea zonelor afectate, alte particularități ale zonelor studiate;
- Din punct de vedere al teledetecției ne putem uita la: senzorii satelitari;
- Din punct de vedere geologic: care este geologia zonelor afectate;
- Din punct de vedere al managementului hidrologic: resursele de apă existente în zonă, scopul pentru care utilizată apa pompată din subteran;
- Din punct de vedere hidrogeologic: modelarea hidrogeologică, structura acviferelor, tipurile de acvifere prezente în zona de studiu.

Analizele pot fi și mai complexe, deoarece subsidența nu apare ca o cauză a unui singur factor ci ca o îmbinare de mai mulți factori.

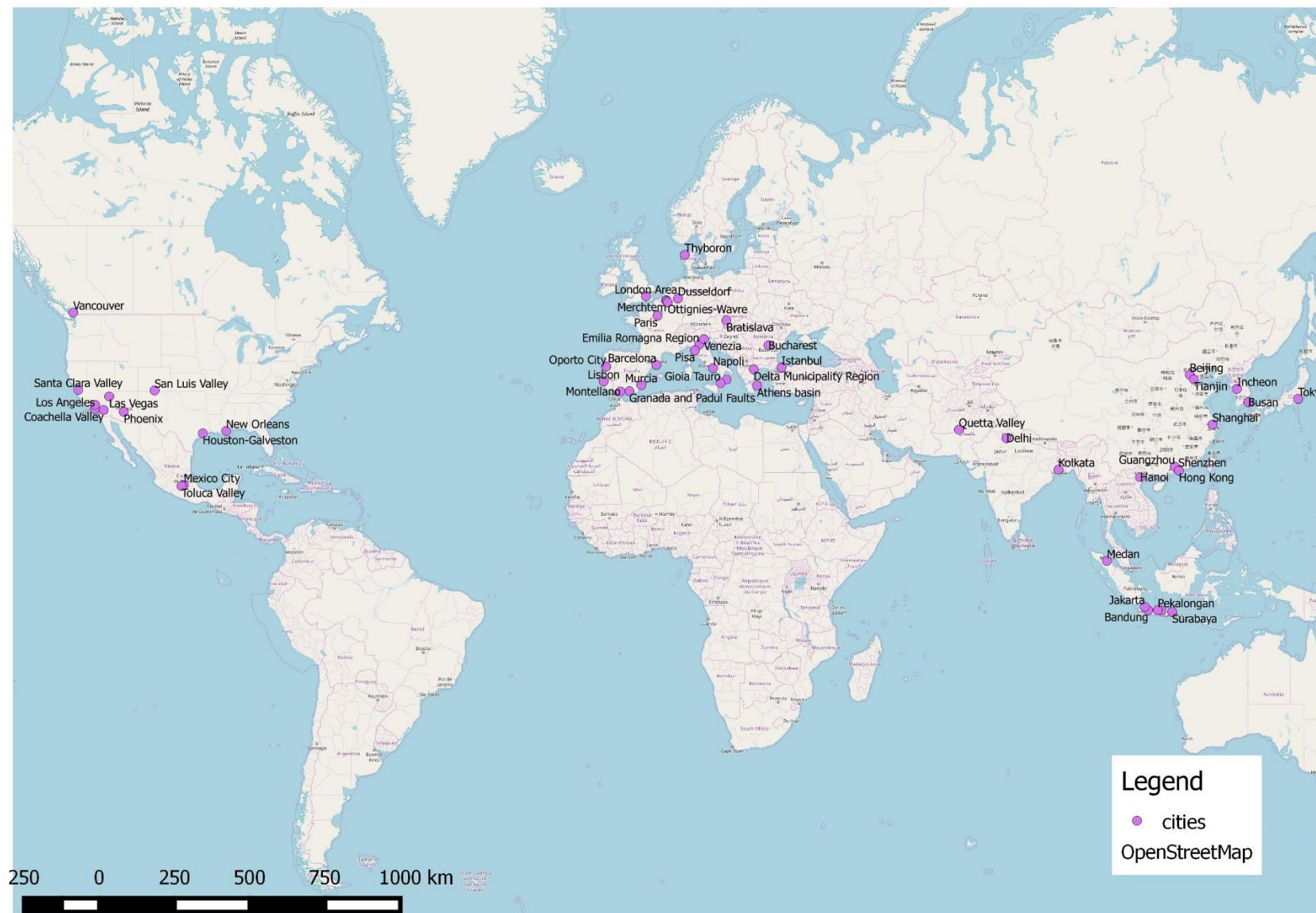


Figura 2-1 Privire de ansamblu a zonelor urbane afectate de fenomene de deplasări vertical

2.2.1 Analiza distribuției geografice și istoricul apariției fenomenelor de subsidență urbană

Figura 2-1 arată că zonele pentru care au fost efectuate studii privind prezența fenomenelor de subsidență sunt răspândite pe toată suprafața globului pământesc. În lucrarea de față au fost incluse studii din mai mult de 20 de țări și din peste 50 de zone urbane. S.U.A. este una dintre țările în care sunt întâlnite fenomene de subsidență în multe zone urbane din state diferite, atât de pe coasta de est, cât și de pe coasta de vest, printre care California, Nevada, Arizona, Louisiana, Texas și Colorado. Această țară este cunoscută și prin faptul că există un lung istoric privind subsidența, apariția acestora fiind recunoscută încă de la începutul secolului XX. U.S.A is one of the countries with many subsiding areas in different states, from both eastern and western coast, such as California, Nevada, Arizona, Louisiana, Texas, and Colorado. It is also known for having a long **history of land subsidence**, starting from the beginning of 20th century. Cu privire la longevitatea apariției fenomenelor de subsidență, Mexico City și zonele învecinate reprezintă un alt exemplu de zonă urbană cu o lungă istorie de subsidență. În 1995, zona metropolitană Mexico City a consumat peste 65 m³/s de apă, principala sursă de apă (70%) fiind apele subterane, nivelul apei subterane scăzând cu valori de până la 1.5 m/an (Cabral-Cano, et al., 2008). O altă zonă cu un lung istoric al subsidenței, dar cu o evoluție diferită în ultimii 40 de ani, este orașul Tokyo. Pentru că la sfârșitul anilor '60 volumul total de apă subterană pompată era de ordinul 1500000 m³/zi, iar suprafața afectată de subsidență cu o cotă sub nivelul mării era de 80km² (Rokugawa & Nakamura, 2015; Poland, 1984), în anii '70, Guvernul Metropolitan Tokyo a demarat diverse proiecte pentru atenuarea efectelor subsidenței care duceau la inundații și la deteriorarea conductelor subterane (Sato, et al., 2006). Măsurile privind atenuarea au constat în: (a) construirea de rezervoare și canale pentru importul apei de suprafață; (b) reducerea exploatării apei subterane (prin intermediul câtorva legi specifice privind utilizarea apei subterane pentru scopuri industriale și în alte scopuri decât pentru băut); (b) proprietarilor de clădiri li s-a cerut să întocmească planuri de mediu pentru instalații de infiltrare a apei de ploaie și pentru apa uzată (Poland, 1984; Erkens, et al., 2015; Sato, et al., 2006). Aceste măsuri au dus la reducerea drastică a pomparei apei subterane și a subsidenței, un studiu din 2015 arătând că media ratei subsidenței în Tokyo este aproape zero (Erkens, et al., 2015).

Cu toate că rezultatele nu sunt încă vizibile ca în cazul metropolei Tokyo, guvernul Shanghai-ului investește mult efort în atenuarea efectelor subsidenței terenului. Acest lucru poate fi observat din reducerile progresive ale magnitudinii și extinderii subsidenței terestre în perioada 2000-2010 (Perissin, et al., 2012).

O tendință generală poate fi trasată privind evoluția exploatării apei subterane, a fenomenelor de subsidență și a metodelor de monitorizare utilizate în zonele urbane, din secolul trecut. Astfel, cea de-a doua revoluție industrială (1870-1914) reprezintă prima etapă a exploatării intensive a apei subterane, precum și a apariției subsidenței terestre și a utilizării nivelmentului geometric pentru monitorizarea acestui fenomen (Poland, 1984). Acest lucru este valabil pentru Mexico City, pentru zonele urbane din S.U.A. și pentru Tokyo. Apogeul supraexploatării apei subterane a avut loc la finalul expansiunii economice postbelice, la începutul anilor '70 (Poland, 1984). În această categorie pot fi incluse majoritatea orașelor europene care sunt cuprinse în acest studiu, precum și orașele din China. Între cele două momente istorice, pentru monitorizarea deplasărilor pe verticală, au fost inventate extensometrele (Riley, 1984). Acești pași în istoria industrială au fost însoțiți și de creșterea populației în zonele urbane, precum și de creșterea necesităților de furnizare a apei. Acest lucru a dus la continuarea

supraexploatării apei subterane și la accentuarea subsidenței terenului în anumite zone urbane până în zilele noastre, în ciuda finalizării epocii industriale (Sato, et al., 2006). În această cea de-a treia etapă, au început să fie utilizate pentru monitorizarea subsidenței observațiile GNSS și tehnicile InSAR. Orașele și Indonezia, India, Pakistan, București sunt câteva exemple de orașe care s-au confruntat cu fenomene de subsidență în această etapă.

Considerând localizarea geografică, se disting câteva tipuri de relief care au o influență majoră în producerea fenomenelor de subsidență:

- Zone costiere (ex. Coachella Valley, Los Angeles, New Orleans, Houston-Galveston, Porto, Lisabona, Barcelona, Veneția, Napoli, Istanbul, Thyborøn, Medan, Jakarta, Surabaya, Tokyo),
- Zone deltaice (ex. Kolkata, Tianjin, Municipality Delta din Grecia, delat Po (zona Emilia-Romagna), Vancouver), sau
- Zone costiere cu pământ recuperat din mare (ex., Incheon, Busan, Shenzhen, Hong Kong),

Efectele pompării apei subterane fiind corelate cu eroziunea și cu creșterea nivelului mării. Un alt efect poate fi și salinizarea apei subterane.

Chaussard și colaboratorii (2013), realizează un studiu în care zonele afectate de subsidență pot fi clasificate pe baza mai multor criterii: rata de deformare, extinderea spațială și utilizarea terenului. Pornind de la acești parametri, Tabelul 2-1 prezintă distribuția zonelor incluse în acest studiu.

Tabelul 2-1 Clasificarea zonelor urbane afectate de subsidență (modificat după (Chaussard, et al., 2013))

Parametru	Descriere	Criteriu	Orașe
Rata de deformare	Lentă	<5cm/an	Lisabona, Porto, Montellano, Atena, Murcia, Barcelona, Municipality Delta- Grecia, Bratislava, Londra, Veneția, Pisa, Emilia Romagna, Gioi Tauro, Ottignes-Wavre, Brussels, Merchtem, Düsseldorf, Thyborøn, Paris, Istanbul, Kolkata, Incheon, Busan, Shanghai, Tianjin, Guangzhou, Shenzhen, Surabaya, Antelope Valley, Las Vegas, Santa Clara Valley, San Luis Valley, Los Angeles, Houston, New Orleans, Coachella Valley, Phoenix, Vancouver
	Rapidă	≥ 5cm/an	Napoli, Delhi, Quetta Valley, Toluca Valley, Mexico City, Hanoi City, Hong Kong, Beijing, Medan, Jakarta, Bandung, Pekalongan, Semarang,
Extindere spațială	Scară largă	≥100 km ²	Londra, Veneția, Emilia Romagna, Gioi Tauro, Quetta Valley, Mexico City, Shanghai, Tianjin, Guangzhou, Beijing, Jakarta, Bandung, Pekalongan, Antelope Valley, Las Vegas, Los Angeles, Houston Galveston,
	Scară locală	10-100 km ²	Faliile Granada & Padul, Murcia, Atena, Municipality Delta- Grecia, Istanbul, Delhi, Kolkata, Toluca Valley, Incheon, Hanoi, Medan, Semarang, San Luis Valley, Coachella Valley,
	Neuniform	1- 10km ²	Lisabona, Porto, Montellano, Barcelona, Pisa, Napoli, Brussels, Düsseldorf, Thyborøn, Busan, Hong Kong, Shenzhen, New Orleans,
	Punctual	< 1 km ²	Bratislava, Paris
Utilizarea terenului		Agricultură	Montellano, Municipality Delta- Grecia, Gioi Tauro, Pekalongan, Santa Clara Valley, Coachella Valley, Quetta Valley

Raport Științific Nr.1- Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban

Parametru	Descriere	Criteriu	Orașe
		Urban	Mexico City, Tokyo, Montellano, Pisa, Istanbul, Quetta Valley, Hanoi, Shanghai, Santa Clara Valley, Lisabona, Porto
		Industrial	Lisabona, Porto, Municipality Delta- Grecia, Gioi Tauro, Brussels, Toluca Valley, Shenzhen, Surabaya, Medan, Jakarta, Bandung, Semarang, Antelope Valley, Santa Clara Valley

Ținând de cont de rata de deformare, 75% din zonele analizate au valori ale subsidenței mai mici de 5cm/an. Unele dintre aceste zone, cum ar fi San Luis Valley, Los Angeles, Houston, New Orleans, s-au confruntat în trecut cu rate ale subsidenței de peste 5cm/an, dar datorită măsurilor de atenuare utilizate, valorile negative ale deformației verticale ale terenului sunt în scădere. De cealaltă parte, 25% dintre zonele analizate sunt afectate de subsidențe rapide cu valori mai mari 5cm/an. Cele mai multe zone urbane cu subsidență rapidă care se găsesc în aceeași țară, sunt orașele din Indonezia. Se poate face o comparație între țările cu un lung istoric al pompării de apă subterană și în care zonele de subsidență încep să aibă valori tot mai scăzute (ex. Tokyo, Japonia), și țările cu o istorie recentă a pompării apei subterane. Deplasările negative pe verticală ale terenului se produc mai rapid în zonele cu un istoric mai recent de subsidență, din cauza cantităților foarte mari de apă subterană care sunt pompate pentru satisfacerea nevoilor de apă pentru populație și pentru industrie (ex. Indonezia). Multe din orașele care au un istoric de pompare al apei subterane începând cu cea de-a doua revoluție industrială, și-au schimbat scopul utilizării apei subterane utilizate care în trecut era în principal pentru industrie și agricultură, către utilizare municipală și nevoi ale populației (ex Santa Clara Valley) (Galloway & Hoffmann, 2006). Dacă ne referim la Mexico City, cu toate că este o zonă cu un lung istoric de pompare a apei subterane și de apariție a fenomenelor de subsidență, din cauza lipsei apelor de suprafață, apa subterană este în continuare pompată la volume foarte mari, provocând fenomene de subsidență cu valori de până la 38 cm/an (Auvinet, et al., 2017; Yan, et al., 2012).

Cu toate că rata anuală a subsidenței are valori mai mici de 1 cm, pentru unele zone de studiu, cum ar fi San Luis Valley sau Los Angeles, deformațiile sezoniere pot ajunge până la valori de 10 cm. Acest lucru se petrece din cauza precipitațiilor sezoniere, precum și a aspectelor geologice și hidrogeologice (Bawden, et al., 2001; Bawden, et al., 2003).

Analizând criteriul de extindere spațială, 36% dintre zonele studiate fac parte din categoria zonelor cu extindere a subsidenței de scară largă, urmate de zonele cu extindere de scară locală cu un procent de 32%, zonele cu extindere spațială neuniformă în procent de 28% și zonele cu subsidență punctuală, cu un procent de 4%. Zonele cu subsidență punctuală sunt asociate de cele mai multe ori cu lucrări la infrastructuri subterane din zonele urbane (ex. pod construit în Bratislava) (Bakon, et al., 2016).

Dacă luăm în considerare criteriul de utilizare a terenului, cele mai multe orașe sunt caracterizate de o combinație de cel puțin două tipuri de utilizare a terenului pentru care apar fenomene de subsidență. Utilizarea terenului pentru scopuri agricole este cel mai puțin prezentă în acest studiu, deoarece sunt aduse în discuție zonele urbane, cu toate că agricultura a fost principalul scop pentru care se pompa apă subterană la începutul secolului XX (ex, Phoenix-Arizona, Santa Clara Valley) (Miller & Shirzaei, 2015). Considerând mediul urban, o categorie specială este ocupată de orașele în care apa subterană este principala sursă de apă dulce pentru toate nevoile urbane. A fost deja menționat Mexico City, unde în

1995, 70% din apa utilizată în zona metropolitană era apă subterană pompată ($65 \text{ m}^3/\text{s}$) was pumped groundwater, din cauza lipsei de ape de suprafață (Auvinet, et al., 2017). Un alt exemplu este Tokyo, unde reducerea consumului de apă subterană pompată a fost posibilă doar prin implementarea unor acțiuni extrem de riguroase, care au inclus importul de apă de suprafață din alte zone (Sato, et al., 2006).

În afară de utilizarea terenului, în multe cazuri se observă prezența unor lucrări specifice pentru construcția unor infrastructuri subterane sau de suprafață, cum ar fi:

- Tren subteran: Lisabona (Catalao, et al., 2016), Londra (Aldiss, et al., 2014), Napoli (Tesauro, et al., 2000), Shanghai (Perissin, et al., 2012),
- Stații de tren: Barcelona (Serrano-Juan, et al., 2016)
- Tuneluri de metrou: Atena (Parcharidis, et al., 2006), Londra (Aldiss, et al., 2014), Düsseldorf (Liu & Niemeier, 2014), Vancouver (Samsonov, et al., 2014), Shanghai (Perissin, et al., 2012), București (Gheorghe, et al., 2020)
- poduri: Bratislava (Bakon, et al., 2016)
- Construcții subterane: Paris (Fruneau, et al., 2004), Busan (Kim, et al., 2007), Beijing (Chen, et al., 2016), Surabaya (Aditiya, et al., 2017).

Toate aceste lucrări afectează și regimul de pompare a apei subterane, precum și apariția fenomenelor de subsidență.

2.2.2 Metode InSAR folosite pentru monitorizarea deplasărilor și datele SAR utilizate

Pentru multe dintre zonele prezentate în **Error! Reference source not found.**, mai multe studii au fost efectuate de-a lungul timpului, luând în considerare evoluția metodelor inSAR și a datelor SAR disponibile la fiecare moment de timp. **Error! Reference source not found.** ia în considerare în principal cele mai noi studii care au fost realizate pentru acele zone, având în vedere că seriile temporale de date satelitare pot acoperi mai mult de 25 de ani de achiziții SAR. Procesarea datelor este realizată în cele mai multe cazuri cu cele mai noi tehnici SAR, care permit obținerea unor precizii mai bune decât în cazul metodelor anterioare.

2.2.2.1 Date SAR utilizate

Când privim la acest aspect legat de datele SAR care au fost utilizate, multe studii se bazează pe datele de la sateliții europeni ERS-1 și ERS-2, urmate de datele de la misiunea ENVISAT. Acest lucru se petrece datorită faptului că ERS-1 este prima misiune cu senzor SAR la bord, care a achiziționat serii temporale de date SAR care pot fi utilizate pentru interferometrie și pentru determinarea hărților de deplasare verticală a terenului (vezi Tabelul 1-3). Un alt aspect este legat de accesul la datele SAR, ESA punând la dispoziție datele în mod gratuit pentru multe proiecte. În acest moment toate seriile temporale SAR ale sateliților ERS și ENVISAT sunt disponibile în mod gratuit. Următorul senzor utilizat este TerraSAR-X. Ținând cont de rezoluția și de capacitățile sale (luând în considerare toți sateliții care operează în bandă X), această misiune a adus noi provocări legate de acuratețea rezultatelor și de tipul de aplicații pentru care să fie utilizate (ex. studiile locale privind deplasările zgârie-norilor) (Solari, et al., 2017; Perissin, et al., 2012). Senzorii canadieni RADARSAT sunt următorii ca incidență de utilizare, urmați de

misiunea Sentinel-1. Sentinel 1 este succesorul misiunilor ERS și ENVISAT, datele de la acest senzor fiind disponibile în mod gratuit împreună cu datele de la celelalte misiuni Sentinel care fac parte din Programul European de Observare a Pământului, Copernicus, pe platforma <https://scihub.copernicus.eu/>. Numărul redus de studii în care sunt utilizate date Sentinel are drept cauză perioada încă recentă de lansare, acesta fiind satelitul SAR cel mai recent lansat (2014), până la finalul lui 2018, când această lucrare a fost scrisă. Următorii senzori de la care au fost utilizate date SAR sunt sateliții japonezi ALOS și JERS, urmați de senzorii din misiunea CosmoSkyMed. Un aspect important legat de utilizarea datelor este legat de accesul la date și de costul acestora. Astfel, misiunile europene pentru care a existat întotdeauna un acces facil pentru datele utilizate în scopuri științifice sunt cele mai utilizate date. Pentru completarea seriilor de date temporale începând cu anul 1992 și până în prezent, se utilizează în mod uzual date de la sateliții ERS, ENVISAT și Sentinel-1, cu o completare de la sateliții TerraSAR-X sau RADARSAT pentru perioada în care nici o misiune SAR europeană nu a fost pe orbită (2012-2014). Cu toate acestea, CosmoSkyMed, pentru că este un proiect atât cu componentă militară cât și civilă, se adresează în general altor domenii specifice, cum ar fi aplicațiile de management de risc, aplicațiile de apărare și securitate, furnizarea de servicii de imagistică în scopuri comerciale (ESA eoPortal Directory, 2018). Considerând răspândirea geografică a datelor utilizate, dacă datele de la misiunile europene sunt folosite pentru aproape toate zonele geografice la nivel global, senzorii japonezi sunt utilizați în special pentru zona sudică și estică a Asiei.

În același timp, dacă analizăm rezoluția spațială și temporală (înainte de lansarea misiunii Sentinel-1), sateliții în bandă L și X (vezi Tabelul 1-3), cum ar fi ALOS sau TerraSAR-X sau CosmoSkyMed, au o rezoluție mai bună, care duce la o mai mare densitate de ținte permanente, în cazul în care se utilizează metode PSI de determinare a deplasărilor pe verticală ale terenului. Ca exemplu, pentru studiul de caz al orașului Bruxelles, s-a putut observa că densitatea de ținte permanente generate din date TSX a fost de peste 10 ori mai mare pe kilometru pătrat, decât pentru misiunile europene ERS și ENVISAT (vezi Tabelul 2-2) (Declercq, et al., 2017b). Cu cât densitatea este mai mare, cu atât se pot realiza analize mai complexe în zona studiată.

Tabelul 2-2 Caracteristici ale seturilor de date procesate pentru Bruxelles (după (Declercq, et al., 2017b))

Satelit	Orbita	Trecere	Număr de scene	Perioada de achiziție	Scena master	Densitatea medie de ținte (PS/km ²)
ERS-1/2	423	Descendentă	78	1992–2006	18.02.1998	181
Envisat	423	Descendentă	73	2003–2010	15.08.2007	203
TerraSAR-X	48	Descendentă	74	2011–2014	13.05.2013	2713
Sentinel-1	37	Descendentă	64	2014–2017	27.10.2016	250

2.2.2.2 Tehnici InSAR de monitorizare

Privind la tehnicile InSAR care sunt utilizate pentru monitorizarea deplasărilor verticale ale terenului, în cele mai multe studii sunt utilizate tehnici din familiile PSI și SBAS, iar în unele cazuri sunt folosite combinații dintre aceste două metode. În subcapitolul 2.1.4, PSI și SBAS au fost definite ca tehnici MTI, care mai sunt cunoscute în literatura de specialitate și ca Advanced Differential SAR Interferometry Remote Sensing Techniques (A-DInSAR). În cele ce urmează sunt prezentate tehnicile care au fost

utilizate în studii și care nu se încadrează în categoria tehnicilor clasice PSI și SBAS, ci sunt în cele mai multe cazuri combinații sau cazuri particulare ale acestor metode.

Din categoria metodelor A-DinSAR, Parcharidis și colab., (2006), a utilizat pentru monitorizarea subsidenței din zona bazinului Atenei tehnica **Stacked Interferometric Technique**. Această tehnică implică însumarea a multiple interferograme diferențiale într-o singură interferogramă, pentru zone în care lipsesc interferograme temporale coerente. Interferograma singulară care este generată este o pseudo-interferogramă în mai multe interferograme cu coerență bună, dar pentru perioade scurte de timp, sunt utilizate pentru generarea unei interferograme temporale continue pentru o perioadă îndelungată de timp. Această tehnică ajută la monitorizarea unei zone de interes pentru o perioadă mai lungă de timp, trecând peste impedimentele legate de coerență (Parcharidis, et al., 2006).

O altă abordare din seria tehnicilor MTI care ia în considerare pentru coregistrare aceeași imagine master pentru un set mai mare de imagini SAR, este **WabInSAR (Wavelet Based InSAR)**. Particularitatea acestei metode constă în aplicarea unui cadru statistic pentru identificarea unor pixeli de elită (care au un zgomot mai redus) în locul țintelor permanente (PS). Pixelii de elită se obțin prin estimarea zgomotului complex de fază pe baza analizei undelor setului de date SAR procesat (Miller & Shirzaei, 2015). Ulterior, prin utilizarea diverselor filtre de unde, se corectează datele SAR (Shirzaei & Bürgmann, 2012; Miller & Shirzaei, 2015), seriile temporale LOS uniforme se obțin prin inversiunea setului de date interferometric. Această abordare a fost utilizată în studiul realizat pentru Phoenix, Arizona (Miller & Shirzaei, 2015).

În studiul de caz al orașului Lisabona, Portugalia, Heleno și colab., (2011) au propus utilizarea a două tehnici MTI pentru monitorizarea deplasărilor verticale ale terenului: abordarea clasică PSI și tehnica **SPN (Stable Point Network)** (Duro, et al., 2005). Principalele diferențe între cele două metode sunt legate de criteriul utilizat pentru selectarea țintelor permanente și procedurile specifice de filtrare utilizate pentru componenta atmosferică (Heleno, et al., 2011; Herrera, et al., 2009).

Herrera și colab., (2009), propune o altă comparație între tehnica SPN și tehnica **CPT (Coherent Pixels Technique)** (Mora, et al., 2003). Se menționează că în afară de criteriul de selectare al pixelilor, pot apărea diferențe între cele două metode privind rezoluția spațială dintre cele două tehnici. Pentru criteriul de selectare a pixelilor, pentru tehnica CPT, care se bazează pe interferograme aduse în proiecție distanță orizontală, pixelii trebuie să aibă o valoare a coerenței mai mare decât un anumit prag stabilit (Herrera, et al., 2009). Comparația dintre cele două tehnici a arătat o similaritate a performanțelor rezultatelor obținute.

Un caz particular al tehnicii CPT este **CPT-TSC (Coherent Pixel Technique- Temporal Sublook Coherence (CPT-TSC))**, unde pragul de coerență se aplică nu numai spațial, dar și temporal (Cigna, et al., 2016). Această tehnică a fost utilizată în situl arheologic Capo Colonna, Italia, împreună cu tehnica PSInSAR, tehnica SBAS și alte două tehnici particulare ale PSI și SBAS, denumite **PSP-DIFSAR (Persistent Scatterer Pairs Differential InSAR)** și **ISBAS (Intermittent SBAS)** (Cigna, et al., 2016). Abordarea PSP-DIFSAR se bazează pe utilizarea atât a caracteristicilor temporale cât și spațiale a datelor pentru îmbunătățirea densității și acurateții măsurărilor (Sassa & Canuti, 2008). ISBAS este o tehnică prin care se pot obține rezultate mai bune pentru zonele non-urbane și rurale, acolo unde coerența poate fi mai ușor pierdută din cauza lipsei de coerență a pixelilor de-a lungul întregii perioade de timp pe care se realizează

procesarea. Astfel, se utilizează pixeli cu coerență numai pentru subseturi ale perioadei totale de timp procesate (Bateson, et al., 2015; Souter, et al., 2013).

Divizia de Geomatică a Centrului Tehnologic de Telecomunicații Catalonia (CTTC) a dezvoltat o altă abordare PSI, denumită **PSIG**. Inovația acestei abordări constă în utilizarea așa-numiților "veri de ținte permanente" (*engl. cousins PSs*)- CPS- care sunt ținte permanente cu o variație spațială moderată a fazei, asigurând o desfășurare adecvată a fazei (Devanthéry, et al., 2014). Pe baza acestei abordări, Serrano-Juan și colab., (2016) a realizat monitorizarea deplasărilor verticale din timpul construcției stației subterane de tren, La Sagrera, din Barcelona.

O tehnică binecunoscută din familia PSI este tehnica **STAMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers)** (Hooper, et al., 2012), care se bazează pe identificarea pixelilor cu variație scăzută a fazei, exploatând corelația spațială a fazei interferogramelor (Hooper, et al., 2007). Tehnica poate fi utilizată pentru monitorizarea deformațiilor non-lineare, deoarece nu se bazează pe modele de deformație prestabilite (Liu & Niemeier, 2014). Ținând cont de acest avantaj, mai multe dintre studiile de caz incluse în **Error! Reference source not found.** au șa bază această abordare, cum ar fi excavările pentru tunelul din Düsseldorf (Liu & Niemeier, 2014), studiul de caz din Istanbul (Aslan, et al., 2018), din Kolkata (Biswas, et al., 2015), sau din Beijing (Deng, et al., 2017).

O versiune extinsă a tehnicii STAMPS este **STAMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers-Multi-Temporal InSAR)**, această tehnică premittând combinarea tehnicii PSI cu SBAS (Hooper, et al., 2018), ceea ce permite obținerea unei evaluări regionale riguroase a deformațiilor (Sousa, et al., 2014). Metoda se bazează pe determinarea țăintelor permanente și a pixelilor cu fază filtrată cu decorelare lentă (SDFP) (Sousa, et al., 2012; Sousa, et al., 2014).

Pornind de la lanțul de prelucrare a tehnicii clasice PSInSAR, Ferretti și colab., (2011) au dezvoltat o nouă tehnică interferometrică în care sunt utilizate atât Ținte Permanente (PS) cât și Ținte Distribuite (DS-Distributed Scatterers). Dacă țintele permanente sunt ținte cu o stabilitate ridicată a fazei în timpul intervalului de procesare, țintele distribuite sunt caracterizate printr-o coerență moderată și, în general, au aceleași valori ale reflectivității ca și vecinii lor, ținând cont că aparțin aceluiași obiect. Această nouă tehnică, denumită **SqueeSAR**, procesează împreună cele două tipuri de ținte, ținând cont de comportamentul lor statistic diferit (Ferretti, et al., 2011; Bitelli, et al., 2015). Studiul de caz al regiunii Emilia-Romagna, Italia, a fost analizat utilizând această metodă (Bitelli, et al., 2015).

Un instrument care poate fi utilizat pentru procesarea unei game largi de tehnici SAR este SARPROZ (Perissin, 2021). Acesta cuprinde module pentru procesare InSAR, DInSAR, SDInSAR, PSI, Non-linear PSI, Quasi-PSI, precum și pentru alte tehnici din familia SAR. Studiile de caz din Bratislava (Bakon, et al., 2016), zona Merchtem, Belgia (Declercq, et al., 2017a), Buxelles (Declercq, et al., 2017b) și Shanghai (Perissin & Wang, 2010) sunt câteva exemple de studii în care SARPROZ a fost utilizat.

Peste 40% dintre studiile descrise în **Error! Reference source not found.** au utilizat tehnici PSI de procesare a datelor SAR, cu utilizarea a diferite software-uri, cum ar fi STAMPS sau SARPROZ (Perissin & Wang, 2010; Liu & Niemeier, 2014).

Herrera și colab., (2009), prezintă un tabel comparativ luând în considerare câteva dintre metodele SAR menționate, precum și o parte dintre celelalte metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală ale terenului, utilizate pentru validare (vezi Tabelul 2-3). Sunt luate în considerare: eroarea de determinare a deplasărilor, eroare absolută și eroarea de diferență dintre seriile temporale.

Tabelul 2-3 Rezultate comparative privind utilizarea a diferite metode InSAR (după (Herrera, et al., 2009))

Reference	Site	Technique	Temporal span	Velocities (mm/year)	Geodetic technique	Benchmarks		Velocity difference error (mm/year)	Time series			
						num.	Maximum separation (km)		Absolute difference error (mm)	%	Difference error (mm)	%
Present study	Murcia (Spain)	SPN CPT	95-05	7	Extensometer	15	5		(0; 5.3)	69	(-3.0; 3.0)	49
(Crosetto et al., 2008)	Barcelona (Spain)	SPN	98-04	13	Optical levelling	15	5	1	(0; 5.7)	68	(-4.6; 4.6)	60
(Casu et al., 2006)	Napoli bay (Italy) Los Angeles (California)	SBAS	93-03	29	Optical levelling continuous GPS	44	40	0.9		60	(-4.7; 4.7)	60
(Colesanti et al., 2003)	Los Angeles (California) Ancona (Italy)	PS	96-02 96-00	6 10	Optical levelling	38 11	90	1	(1; 3)	50	(-6.9; 6.9)	50
(Strozzi et al., 2001)	Euganean Basin (Italy)	DInSAR	92-00 92-96	6 4	Optical Levelling	4 17	2.5 6	(-0.8; 1.2)	(1; 3)			

2.2.2.3 Praguri de coerență la selectarea țintelor permanente în procesarea PSI

Pornind de la definiția coerenței din subcapitolul 2.1.4, dacă analizăm studiile de caz selectate, pragul de coerență utilizat pentru selectarea țintelor permanente necesare pentru fiecare metodă în parte a fost diferit. Acest lucru se datorează particularităților fiecărei metode, precum și a diferențelor de soft. Astfel, pragul de coerență a luat valori de la 0.36 pentru studiul din Lisabona unde a fost utilizată tehnica SPN (Heleno, et al., 2011) până la valori de 0.9 (Catalao, et al., 2016). Pragul de coerență poate fi stabilit diferit și în funcție de datele SAR utilizate, care pot proveni de la diverși sateliți, chiar dacă zona de studiu este aceeași, precum și softul de procesare. Astfel, în Thyborøn, Danemarca, pragul de coerență a fost stabilit la 0.7 pentru datele ERS și la 0.8 pentru datele Sentinel-1 (Levinsen, et al., 2016).

2.2.2.4 Metode de estimare a deplasărilor verticale din măsurătorile în lungul liniei de vizare (LOS)

Deoarece rezultatele privind deplasările terenului se obțin în urma prelucrării datelor SAR, în proiecție distanță înclinată, în lungul liniei de vizare (LOS), deplasarea verticală se estimează prin diferite abordări. As SAR processed data is obtained through Line of Sight (LOS), the vertical velocity is estimated considering different approaches.

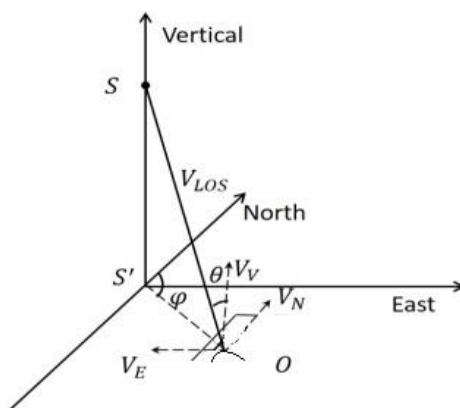


Figura 2-2 Componentele 3D ale deplasării (modificat după (Qin, et al., 2017))

Figura 2-2 prezintă componentele 3D ale deplasării, unde V_{LOS} este deplasarea în distanță înclinată, în lungul liniei de vizare, V_N este proiecția deplasării pe direcția nord, V_E este componenta deplasării pe direcția est, V_V este deplasarea pe verticală, θ este unghiul de incidență de preluare al datelor SAR, S reprezintă poziția satelitului, O este obiectul observat din teren, iar φ este unghiul azimutal al datelor SAR. is the azimuth angle for the SAR data.

Principala metodă pentru estimarea deplasării verticale din deplasarea LOS, ia în considerare ca prim pas neglijarea deplasării pe direcție orizontală, atât pe direcție est, cât și nord. Cel de-al doilea pas este ca deplasarea verticală să fie estimată prin proiectarea distanței în proiectei înclinată LOS pe direcție verticală, utilizând unghiul de incidență al achizițiilor SAR (Sousa, et al., 2014; Serrano-Juan, et al., 2016; Bakon, et al., 2016; Bock, et al., 2012; Declercq, et al., 2017b; Liu & Niemeier, 2014; Aslan, et al., 2018; Kala, 2015; Ahmad, et al., 2017; Castellazzi, et al., 2017):

$$V_v = \frac{LOS}{\cos(\theta)} \quad (2.3)$$

Unde V_v reprezintă estimarea deplasării pe direcție verticală, LOS este linia de vizare, iar θ este unghiul de incidență de preluare al datelor SAR.

Figura 2-3 prezintă aspectele geometrice ale ecuației 2.3, pentru cazul în care achizițiile SAR sunt preluate de pe o orbită ascendentă.

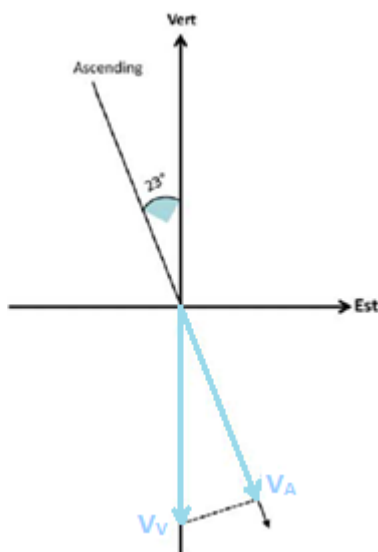


Figura 2-3 Distanța în lungul liniei de vizare și estimarea deplasării verticale pentru ENVISAT, în cazul achiziției de pe orbită ascendentă (modificat după (Raspini, et al., 2012))

Astfel, Catalao și colab., (2016), pentru studiul de caz din Lisabona, consideră că deplasarea orizontală este neglijabilă iar deplasările LOS sunt proiectate în pe direcție verticală (Catalao, et al., 2016). Heleno și colab., (2011) estimează deplasarea verticală reală ca fiind proiecția deplasării LOS, utilizând unghiul de incidență de achiziție al datelor SAR.

În cazul în care există achiziții SAR asupra aceleiași zone atât de pe orbită ascendentă, cât și de pe orbită descendentă, deplasarea verticală poate fi estimată utilizând observațiile de pe ambele orbite și se poate calcula și componenta orizontală a deplasării. Astfel, dintre studiile de caz amintite, în Phoenix,

Arizona, Miller și Shirzaei, (2015) au estimat deplasarea 3D (dx , dy , dz), pornind de la următoarea estimare a deplasării în lungul liniei de vizare:

$$\begin{aligned} LOS &= S_x dx + S_y dy + S_z dz, \\ S_x &= -\sin(\theta) \sin(\alpha - 270^\circ), \\ S_y &= -\sin(\theta) \cos(\alpha - 270^\circ), \\ S_z &= \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.4)$$

unde S_x , S_y , și S_z sunt vectori unitate ai LOS care sunt funcție de unghiul de direcție al satelitului (α) și unghiul de incidență (θ), proiectând câmpul de deplasare 3D pe direcția LOS. Unghiul de direcție la satelitului și unghiul de incidență sunt valori cunoscute din seriile de date SAR.

Componenta nord-sud este considerată neglijabilă, iar ecuația poate fi rescrisă simplificat ca:

$$\begin{aligned} LOS_A &= S_{x_A} dx + S_{z_A} dz, \quad \Omega_A \\ LOS_D &= S_{x_D} dx + S_{z_D} dz, \quad \Omega_D \end{aligned} \quad (2.5)$$

Unde Ω reprezintă matricea de varianță covarianță a observațiilor.

Considerând observațiile ascendente și descendente, prin inversarea seriilor temporale de deformații LOS, deplasările verticale și orizontale sunt calculate. Soluțiile sistemului se obțin prin rezolvarea unui model Gauss-Markov (Miller & Shirzaei, 2015; Hanssen, 2001).

Raspini și colab., (2012), propune o altă abordare, în care componenta nord-sud este considerată neglijabilă, iar

$$\begin{aligned} V_A &= V_V \cos\theta_A + V_E \sin\alpha_A \sin\theta_A \\ V_D &= V_V \cos\theta_D + V_E \sin\alpha_D \sin\theta_D \end{aligned} \quad (2.6)$$

unde V_A și V_D sunt estimările deplasărilor LOS de pe orbita ascendentă și descendentă, θ_A și θ_D sunt unghiurile de incidență pentru achizițiile de pe orbită ascendentă și descendentă, iar α_A and α_D sunt unghiurile de direcție ale satelitului de pe cele două tipuri de orbite.

Sunt și cazuri în care doar deplasările LOS sunt utilizate, iar deplasarea verticală este estimată ca având aceeași valoare ca LOS (Ruiz-Constan, et al., 2016; Solari, et al., 2017).

Cu toate că pentru cele mai multe studii deplasarea LOS este proiectată în direcție verticală, există și studii în care celelalte date sunt proiectate pe direcția liniei de vizare LOS, pentru a avea o referință comună. Astfel, în Murcia (Herrera, et al., 2009), seriile temporale de măsurători extensometrice au fost proiectate considerând deplasările în lungul liniei de vizare LOS, printr-o interpolare. Interpolarea a fost realizată prin intermediul unei regresii liniare cu un interval comun de timp dintre cele două seturi de date de la extensometru și de la sateliții SAR. Pentru studiul de caz din Veneția, Bock și colab., (2012) vine cu abordarea proiectării observațiilor GPS în pe direcția LOS.

Diversele studii își au propriile particularități în estimarea deplasărilor verticale, începând cu presuposițiile inițiale, precum și alte caracteristici ale zonelor de studiu și ale datelor utilizate pentru monitorizare.

2.2.3 Modelarea deplasărilor verticale

Conform lui Galloway și Burbey, (2011), analiza și simularea deplasărilor verticale ale terenului care preced deformarea sistemului acvifer din cauza pompării apei subterane, sunt de interes, sistemele aluviale neconsolidate sau sistemele acvifere poros-permeabile compuse din acvifere și acvitarde.

Modelarea se bazează pe relații dintre sarcina piezometrică, deformare, compresibilitate și curgerea apei subterane. Câteva abordări au fost utilizate de-a lungul timpului, modelul de bază fiind modelul Terzaghi. Acest model presupune că modificările care apar în efortul efectiv pot rezulta din schimbări ale efectului total sau schimbări ale presiunii apei din pori (Galloway & Burbey, 2011; Roy & Robinson, 2009). Pornind de la această teorie, două abordări au fost propuse: teoria curgerii convenționale a apei subterane și teoria liniară a poroelasticității (Biot, 1941). Prima dintre ele este mai folosită, deoarece ia în considerare doar deformațiile verticale ale matricei scheletice a acviferului și este mai ușor de implementat. Teoria Biot descrie deformația 3D a matricii (Biot, 1941; Galloway & Burbey, 2011).

Modelul elementelor finite este unul dintre cele mai utilizate modele atât pentru condiții de deformare 1D și cât și 3D. Astfel, Catalao și colab., (2016), utilizează pentru studiul asupra orașului Lisabona, pentru simularea procesului de consolidare, codul PLAXI2D de elemente finite cu un domeniu geometric pentru procesele de compactare compus din trei strate (Catalao, et al., 2016). Doar stratul median a fost considerat ca deformabil, rezultatele compactării fiind în concordanță cu datele de monitorizare a suprafeței terenului, obținute cu ajutorul InSAR și a nivelmentului geometric. Atât testele în teren cât și cele în laborator au fost realizate pentru determinarea proprietăților geotehnice ale substratului, fiind utilizate inclusiv teste de odometrie pentru pământurile prăfoase.

PLAXI2D a fost utilizat și pentru simulările și analizele care au fost efectuate în municipalitatea Delta din Grecia. Aici a fost utilizat pentru simularea unei secțiuni transversale tipice fără discontinuități orizontale. Modelul a fost dezvoltat ținând cont de profilurile geologice, de proprietățile geotehnice ale straturilor de pământ și de evoluția temporală a apei subterane (Raspini, et al., 2014). În modelul primar, o simulare a geomaterialului a fost inclusă, și anume modelul Mohr-Coulomb perfect elastic plastic, care s-a potrivit foarte bine cu valorile datelor PSI ale deformației (Raspini, et al., 2014).

În Barcelona, pentru stația subterană de tren, La Sagrera, modelul TRANSIN-IV (Serrano-Juan, et al., 2016). Pentru Murcia, codul hidro-mecanic de elemente finite, GEHOMADRID, dezvoltat de grupul M2i al Școlii de Inginerie Civilă din Madrid a fost utilizat împreună cu o lege constitutivă linear-elastică (Tessitore, et al., 2013). A fost simulată dependența temporală care leagă stratul de pământ cu fluidele interstițiale, prin rezolvarea ecuațiilor Biot (Herrera, et al., 2009). Luând în considerare datele disponibile pentru zona studiată, mai multe analize 1D au fost efectuate pentru diverse foraje geotehnice asociate cu datele piezometrice, în locul analizelor 3D. Sistemul acvifer a fost simulat utilizând 3 straturi: argilă (la bază), nisip (stratul median) și argilă (stratul superior) (Herrera, et al., 2009; Tessitore, et al., 2016).

Comportamentul elastic și plastic observat din subsidență sau din înălțarea terenului a fost estimat și pentru Beijing (Chen, et al., 2016).

Privind la utilizarea informațiilor geologice, un alt tip de model a fost utilizat pentru câteva studii. Aldis și colab., (2014) a utilizat modelul matematic al comportamentului crustal, de compensare glaciarioizostatică (GIA) pentru zona Londrei. GIS anticipează mișcările crustale în regiuni cu încărcătură de ghețari din perioada glaciară (NOAA, 2018). O comparație dintre GIA și observațiile continue ale sistemului de poziționare globală (CGPS) la momentul prezent, pentru mișcările crustale absolute, a fost realizată în zona Londrei. Datele PSI au fost corectate prin utilizarea măsurătorilor de gravimetrie absolută (AG) (Williams, et al., 2001), precum și prin observații GPS. Studiul a dovedit că tehnicile PSI pot fi utilizate pentru determinarea comportamentului mișcării terenului, în special când se corelează cu măsurători de mișcare absolută a terenului (Aldiss, et al., 2014). Modelul GIA a fost utilizat pentru

determinarea deplasărilor verticale din Thyborøn. În acest caz, măsurătorile de nivelment au fost corectate prin aplicarea modelului GIA. Când rezultatele PSI au fost comparate cu valorile de nivelment corectate, au fost observate mai multe diferențe, câteva dintre posibilele cauze fiind enumerate în studiul lui Levinsen și colab., (2016) (Levinson , et al., 2016).

În Montellano, Spania, a fost folosită o abordare prin care zona de deplasare a fost caracterizată printr-o abordare din punct de vedere geotehnic cu utilizarea efortului de preconsolidare. Această abordare a inclus studiul efortului de preconsolidare a mostrelor din acviferul Montellano, prin utilizarea testului uniaxial de umflare- contracție și a testului triaxial de permeabilitate, urmând procedurile internaționale ASTM D4546 și ASTM D 5084, precum și alre teste și proceduri internaționale relevante, cum ar fi UNE-AENOR (Ruiz-Constan, et al., 2016). Presiunea de preconsolidare reprezintă starea anterioară de tensiune efectivă suportată de un masiv de pământ (Chen, et al., 2016; Ruiz-Constan, et al., 2016; Kala, 2015) (Stanciu & Lungu, 2006). Aceasta ajută la modelarea tasării elastice și plastice a acviferului și acvitardului, luând în considerare diverși factori, cum ar fi grosimea acviferului, extinderea pe orizontală a stratelor impermeabile, porozitatea acviferului (Galloway & Burbey, 2011). Pe baza acestor teste, s-a putut observa că pământurile aflate în zona de studiu din Montellano intră în categoria pământurilor normal consolidate către cele ușor neconsolidate. Tasarea preconizată la unul dintre puțurile studiate are valori mult mai mari decât cele detectate prin tehnicile InSAR (Ruiz-Constan, et al., 2016).

Bazat pe teoria curgerii convenționale a apei subterane, care descrie doar deformațiile verticale ale matricei solide (Galloway & Burbey, 2011), Chen și colab., (2016), face o analiză a relațiilor dintre deformații și sarcina hidrolică. Tensiunea normală totală se consideră că rămâne constantă în timp, iar tensiunea normală efectivă se scrie astfel:

$$\Delta\sigma' = -\Delta p = -\rho g \Delta h \quad (2.7)$$

Unde $\Delta\sigma'$ este tensiunea normală efectivă, Δp este presiunea fluidului din pori, ρ este densitatea apei, g este accelerația gravitațională, iar Δh este schimbarea de sarcină hidrolică (Chen, et al., 2016; Galloway & Burbey, 2011; Bell, et al., 2008). Cunoscând presiunea de preconsolidare, coeficientul elastic de înmagazinare a scheletului, precum și coeficientul plastic de înmagazinare a scheletului acviferului se pot defini, făcând legătura între deformare și sarcina piezometrică. Coeficienții de înmagazinare ai scheletului mineral al acviferului caracterizează compresibilitatea scheletului acviferului. Astfel, coeficientul elastic de înmagazinare al scheletului este:

$$S_{k_e} = \frac{\Delta b_e}{\Delta h} \quad (2.8)$$

unde Δb_e este defomarea elastică totală, iar Δh reprezintă schimbarea de sarcină piezometrică (Chen, et al., 2016; Bell, et al., 2008),

iar coeficientul inelastic de înmagazinare este:

$$S_{k_v} = \frac{\Delta b_v}{\Delta h} \quad (2.9)$$

unde Δb_v este deformarea inelastică totală, iar Δh reprezintă schimbarea de sarcină piezometrică (Chen, et al., 2016; Bell, et al., 2008).

Considerând coeficientul de înmagazinare al scheletului mineral, Chen și colab., (2016) menționează că acesta poate fi estimat prin utilizarea testelor de acvifer propuse de Fetter, (2001), sau prin utilizarea

comună a măsurătorilor de sarcină piezometrică și a deplasărilor din aceleași puncte. Coeficienții specifici de înmagazinare ai scheletului acviferului pot fi calculați, luând în considerare grosimea acviferului și întârzierea temporală dintre schimbările de sarcină piezometrică, iar apariția subsidenței cauzată de proprietățile scheletului mineral poate fi de asemenea estimată (Galloway & Burbey, 2011; Chen, et al., 2016).

Galloway și Burbey, (2011), luând în considerare doar apariția deformației verticale, definesc înmagazinarea specifică astfel:

$$S_S = \rho_w g (\bar{\alpha} + n\beta_w) \quad (2.10)$$

unde

ρ_w este densitatea apei, g este accelerația gravitațională, $\bar{\alpha}$ este matricea verticală sau compresibilitatea scheletului, n este porozitatea, iar β_w este compresibilitatea apei.

Înmagazinarea specifică poate fi rescrisă ca suma înmagazinării specifice a scheletului ($S_{S_k} = \rho_w g \bar{\alpha}$) și a înmagazinării specifice a apei ($S_{S_k} = \rho_w g n\beta_w$) (Bell, et al., 2008). Pe baza presiunii efective de preconsoildare, înmagazinarea specifică elastică și plastică pot fi definite. Deoarece în acvitarde este considerată curgerea verticală, modelul de drenaj al acvitarului se bazează pe faptul că apa eliberată din înmagazinarea acvitarului este transmisă de acvifer către puțuri (Galloway & Burbey, 2011; Galloway, et al., 1998). În Antelope Valley a fost aplicat unul dintre cele mai extensiv modulate modele de curgere a apei subterane, și anume MODFLOW (Galloway, et al., 1998; Galloway & Hoffmann, 2006). Acesta este un model de curgere 3D bazat pe diferențe finite (Hanson, et al., 2004). MODFLOW a fost utilizat împreună cu pachetul IBS1 (Galloway, et al., 1998).

Coeficienții de compresibilitate elastică și plastică sunt calculați pentru studiul de caz din Las Vegas, schimbarea grosimii acviferului fiind dată de deplasările LOS determinate prin tehnici InSAR, iar schimbarea de tensiune efectivă fiind dată de schimbarea de sarcină piezometrică sau de schimbare a nivelului hidrostatic (Bell, et al., 2008).

Utilizând o abordare similară Kala, (2015) a calculat compactarea elastică și inelastică a acviferelor și acvitarilor în Delhi, considerând perioadele pre-musonice și post-musonice ale anului.

În Santa Clara Valley, pentru optimizarea maximizării pompării de apă subterană și minimizarea subsidenței terenului, a fost utilizat un model regional de curgere a apei subterane, utilizând date din perioada 1970- 1999. Acest model a fost constrâns utilizând date istorice, iar datele cele mai recente au fost utilizate pentru simularea unei bariere parțiale (Galloway & Hoffmann, 2006). Modelul de curgere al apei subterane a fost generat utilizând versiuni diferite ale modelului MODFLOW și a fost utilizat împreună cu alte pachete pentru simularea a diverse elemente in-situ, cum ar fi deplasările verticale ale terenului, barierele, curentul de curgere, și altele (Hanson, et al., 2004).

Modelul de drenaj al acvitarului a fost utilizat și în Phoenix, Arizona, răspunsul poroelastic fiind caracterizat de coeficienții elastici și plastici de înmagazinare a scheletului mineral (Miller & Shirzaei, 2015).

Pentru orașele din Indonezia, Chaussard și colab., (2013), propune o extrapolare liniară în timp a ratei de deplasare pe verticală, fără a lua în considerare modelarea hidrogeologică. Se menționează că modul de comportare al litologiei subterane precum și al acviferului poate accelera sau poate întârzia procesele de

deplasare verticală. Abodarea propusă arată că în 20 de ani linia de coastă va fi sub nivelul mării, luând în considerare o rată medie de deplasare de 10 cm/an.

În cazul orașului Shanghai, mai multe analize de modelare au fost realizate, la începutul anilor '90, pe baza metodei elementelor finite, rezultând într-un model 3D de curgere, urmat de un model cuplat nonlinear curgere-compactare (Dassargues & Li, 1991). Perisin și colab., (2012) utilizează doar un model liniar de deformare în timp, valorificând datele InSAR.

Așa cum s-a prezentat deja, în afară de metodele numerice care iau în considerare modelarea curgerii apei și modelarea geotehnică, modelarea statistică poate fi de asemenea utilizată pentru corelarea magnitudinii subsidenței cu schimbările de sarcină piezometrică. Deng și colab., (2017), propune utilizarea unui alt model, și anume teoria sistemului lui Grey care are capacitatea de a descrie șablonul de evoluție a unui sistem utilizând doar un set limitat de date. Dacă o fluctuație amplă afectează secvența inițială de date, modelul Grey-Markov poate fi utilizat ca o alternativă la metodele numerice și cele statistice (Deng, et al., 2017). Dacă în mod uzual se bazează pe măsurători punctuale de nivelment, în cazul orașului Beijing, același autor utilizează acest model pentru estimarea tendinței temporale de deplasare verticală pentru Țintele Permanente (PS), a căror validare a fost realizată utilizând observații GPS și măsurători de nivelment.

2.2.4 Comparații și corelații dintre diverse metode de monitorizare a deplasărilor pe verticală

În cazul în care nu sunt disponibili prea mulți parametri de natură hidrologică, hidrogeologică sau geotehnică pentru a se putea realiza o modelare, simple corelații dintre subsidență și unul sau doi parametri pot fi efectuate.

Este cazul studiilor din Belgia. Astfel, pentru zona Bruxelles a fost realizată o comparație privind evoluția nivelului apei subterane și seriile temporale ale mediilor deplasărilor verticale din jurul unor piezometre selectate pentru analize. S-a putut observa că deplasările verticale erau în același trend cu valorile nivelului apei subterane (Declercq, et al., 2017b). Au fost analizate atât perioade în care au fost pompate cantități mari de apă subterană, care au fost urmate de fenomene de subsidență, precum și perioade cu scăderi de pompare a apei subterane, regenerare a nivelului apei subterane și înălțare a terenului.

Un alt studiu din Belgia, din zona urbană Ottignies-Wavre, a studiat corelațiile dintre captările de apă și tendințele de deplasare ale suprafeței terenului. Astfel, prin suprapunerea hărții cu localizarea puțurilor pentru captarea apei subterane cu harta PSI a deplasărilor verticale, s-a evidențiat că multe dintre captările cu un volum mare de apă extrasă se află în zone de subsidență. Un alt aspect important în interpretarea rezultatelor privind subsidența este că zona urbană studiată se găsește pe depozite de sedimente aluvionare care pot duce la procese de compactare și au un rol important în procesele de deplasare verticală (Declercq, et al., 2006).

În cazul San Luis Valley, Colorado, zona este caracterizată de prezența a trei strate care formează sistemul acvifer sub presiune. Prin utilizarea InSAR, luând în considerare analize pentru 24 de puțuri, s-a putut evidenția o corelație temporală și spațială între deplasările verticale ale terenului și diferențele de sarcină piezometrică. Astfel, deplasările sezoniere au fost în jurul valorii de 7 cm, cu o subsidență maximă multi-anuală de sub 1 cm al subsidenței. Estimările de sarcină piezometrică din date InSAR au corespuns datelor piezometrice din puțuri. În acest context, estimările de sarcină piezometrică din date

InSAR au putut fi utilizate pentru îmbunătățirea și completarea datelor de sarcină piezometrică, pentru perioadele când lipsesc date pizometrice (Chen, et al., 2016).

O comparație între valorile înregistrate de extensometre, datele InSAR privind deplasarea verticală și datele din timpul campaniilor de nivelment a fost realizată în Antelope Valley, Mojave Desert, California (Galloway, et al., 1998). S-a putut observa o bună concordanță între aceste date când un fenomen de compactare a apărut în zona în care două extensometre de foraj erau amplasate.

În regiunea municipalității Delta din Grecia, o comparație între deplasările verticale ale țințelor permanente PS și datele de nivelment pentru câțiva reperi a fost realizată, arătând diferențe milimetrice, pentru deplasări anuale de aproape 4 cm (Raspini, et al., 2014).

Luând în considerare aceleași metode de monitorizare ca în studiul prezentat anterior, o comparație a fost realizată pentru studiul efectuat în timpul construcției stației de metrou din Barcelona, Spania. Din cauza faptului că reperatele de nivelment de control se aflau în interiorul zonei de influență în care apa subterană era pompată, valorile privind deplasarea verticală obținute prin metode InSAR au fost cu aproximativ 5 mm mai mari decât cele de nivelment. S-a putut concluziona că se pot obține rezultate mai bune prin combinarea celor două metode, deoarece InSAR folosește în special ținte care se află pe acoperișul clădirilor, iar nivelmentul folosește reperi care sunt amplasați la nivelul solului, împreună putând oferi o mai bună vedere de ansamblu (Serrano-Juan, et al., 2016).

Continuând cu analiza studiilor de caz în care construcțiile subterane și pomparea apei subterane au fost monitorizate în timpul anumitor lucrări, Liu și Niemeier, (2014), prezintă rezultatele din timpul monitorizării lucrărilor de construcție ale unui tunel. Comparația dintre deplasările verticale ale țințelor permanente PS și reperi de nivelment a arătat o bună corelație între cele două metode.

În regiunea Veneția, seriile temporale GPS de deplasări verticale au fost comparate cu deplasările în lungul liniei de vizare (LOS) din prelucrările PSI și s-au putut pune în evidență deformății anuale și deformății sezoniere semi-anoale, precum și deplasările verticale pe termen lung (Bock, et al., 2012). Incertitudinea dintre rezultatele combinate GSP/InSAR este de ordinul 0.1-0.2 mm/an.

În Pisa, a fost făcută o corelație între vârsta clădirilor și procesul și nivelul de deplasare verticală. Astfel, s-a putut evidenția că în diferite zone care au fost construite la sfârșitul anilor '80 și în anii '90, procesele de deplasare pe verticală au scăzut de-a lungul timpului. Există zone în care deplasările verticale au scăzut de la -13.4 mm/an în perioada 1992-2001, la -6.3 mm/an în perioada 2012-2014. Pentru alte zone în care deplasările verticale erau mai mari de -10 mm/an în perioada 1992-2001, s-a observat stabilizarea în ultima perioadă de monitorizare (2014) (Solari, et al., 2017). Pentru zonele cu clădiri construite recent, tendințele de deplasare pe verticală sunt aceleași ca cele înregistrate în anii '90 și 2000 pentru exemplele menționate anterior.

Se evidențiază că geologia are o importanță deosebită în procesele de compactare, pentru diversele zone de studiu. O tendință de stabilizare pornind de la valori mai ridicate în perioada 1995-1996 a putut fi observată în Lisabona. Subsidența a scăzut gradual până în perioada 1999-2000, iar în 2008-2010 s-a ajuns la o tendință de stabilizare (Catalao, et al., 2016). În acest context, Herrera și colab., (2009), precizează că dacă se analizează degradarea construcțiilor, nu se poate stabili o relație directă între valorile subsidenței și aceste degradări, ci intervin alți factori. Se pot menționa: calitatea lucrărilor de construcție, tipul fundației, precum și tipul de pământuri în care construcțiile sunt amplasate (Herrera, et al., 2009).

Perissin și colab., (2012), face o corelație între perioadele în care au fost deschise diversele linii de metrou din Shanghai și procesele de subsidență. S-a putut evidenția că liniile de metrou construite după 2009 sunt afectate de subsidență, în timp ce cele mai vechi încep să se stabilizeze. Aceeași autori au mai făcut o altă corelație între traiectoriile liniilor de metrou și construcțiile foarte înalte de la suprafața terenului. Studiul a arătat că în unele zone aflate deasupra unei linii de metrou se găsesc clădiri care au fost afectate de subsidență cu valori de până la 15 mm/an.

Chaussard și colab., (2013) ia în considerare o corelație între subsidență și geologia zonei afectate, subliniind că, în general, subsidența apare în depozite compresibile, cum ar fi depozitele de suprafață și depozitele mlăștinoase. Cu toate că geologia este unul dintre cei mai importanți factori atunci când se studiază fenomenele de subsidență, și depozitele compresibile pot fi prezente, este necesar să fie luați în considerare și alți factori (Chaussard, et al., 2013).

Dacă privim la diversele metode care sunt combinate sau utilizate pentru comparații, pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor de subsidență, se pot evidenția mai multe aspecte. O clasificare a metodelor de monitorizare a subsidenței se poate face și ținând cont de amplasamentul instrumentului cu ajutorul căruia se efectuează măsurătorile. Astfel nivelmentul de precizie și extensometria sunt metode care folosesc instrumente amplasate în teren (nivelmentul la suprafața solului, iar extensometria în forajele de monitorizare) care au fost dezvoltate înainte de era tehnologiilor spațiale. Observațiile GNSS și tehnicile InSAR sunt tehnologii spațiale, instrumentele de monitorizare aflându-se la bordul sateliților. Fiecare metodă de monitorizare prezintă avantaje și dezavantaje, atunci când sunt luate în considerare mai multe criterii, cum ar fi: acuratețea, efortul financiar, zona acoperită, aspecte temporale și resurse umane (Bitelli, et al., 2015). Tabelul 2-4 prezintă o comparație între diversele metode.

Tabelul 2-4 Comparație între diversele metode de monitorizare a subsidenței (modificat după Karila și colab.,(2013))

Metodă	Acuratețe	Zonă acoperită	Rezoluție temporală	Resurse umane
Nivelment de precizie	< mm	Rețea de puncte	Campanii lunare/anuale	3-4/ campanie
Extensometrie	< mm			2-3/ campanie
GNSS	mm			
InSAR	cm	>100km ²	Date disponibile la fiecare 6-46 de zile	1/ procesare
DInSAR	< cm			
MTI	mm			

Dacă ne referim la acuratețe, cu toate că este cea mai veche metodă de monitorizare, nivelmentul de precizie este în continuare cea mai precisă metodă de monitorizare a deplasărilor pe verticală. În cazul tehnicilor InSAR, există o evoluție privind precizia rezultatelor obținute, astfel că de la ordinul centimetric obținut cu ajutorul tehnicii InSAR, s-a ajuns la mărimea preciziei în cazul tehnicilor MTI

să fie de ordin milimetric. Analizând metodele disponibile dintr-o altă perspectivă, primele trei metode din Tabelul 2-4 realizează măsurători punctuale, care implică utilizarea a mai multor resurse umane și financiare, în comparație cu tehnicile InSAR care pot acoperi zone foarte întinse cu implicarea unei singure persoane pentru procesarea datelor. Considerând dezvoltările din cadrul misiunii satelitare europene Sentinel-1, care furnizează date SAR în mod gratuit, tehnicile InSAR pot implica și mai puține resurse financiare decât celelalte metode, fiind nevoie să se ia în considerare și cheltuielile de achiziționare a unui soft pentru prelucrarea datelor SAR, precum și mentenanța acestuia. Ca o concluzie privind aceste metode, cele mai bune rezultate pot fi obținute prin combinarea a diverse metode de monitorizare.

2.2.5 Inițiative europene pentru monitorizarea deplasărilor verticale în zone urbane urbane

O parte dintre datele SAR utilizate în diverse studii care au fost prezentate în secțiunile anterioare, reprezintă rezultatele a două inițiative europene pentru furnizarea de servicii de informare cu privire la deplasarea terenului pentru orașe europene relevante, și anume PanGEO și Terrafirma. Heleno și colab., (2011) au folosit date din investigațiile efectuate în cadrul Terrafirma pentru Lisabona, Declercq și colab., (2017b) și Declercq și colab., (2006) pentru studii din zona Ottignes-Wavre și Bruxelles, din Belgia, Parcharidis și colab., (2006), pentru regiunea Atena. Acestea sunt câteva dintre exemplele de orașe care au beneficiat de serviciile Terrafirma care au fost sprijinite de Agenția Spațială Europeană (ESA) în cadrul Programului European de Observare a Pământului (GMES), actualul program Copernicus. Deplasarea terenului a fost estimată cu ajutorul tehnicilor PSInSAR, care au fost aplicate pentru mai mult de 50 de scene radar, din arhivele sateliților ERS și ENVISAT, începând cu anul 1991. Acest serviciu a inclus interpretarea deplasărilor verticale pentru 14 orașe din Europa și a furnizat produse, luând în considerare diverse aspecte reprezentative zonelor, cum ar fi hidrogeologia, tectonica, subsidența zonelor joase costiere și apărarea împotriva inundațiilor (Heleno, et al., 2011; ESA & Terrafirma Partners, 2010).

O altă inițiativă de pe urma căreia au beneficiat mai mult de orașe europene a fost PanGEO-Facilitarea accesului la informații geologice în sprijinul GMES. În lista orașelor beneficiare ale acestei inițiative se află și orașele Bruxelles (Declercq, et al., 2017b) și București (Vijdea & Bindea, 2013). Zonele de instabilitate au fost denumite în cadrul acestui proiect ca zone de "geohazard". Definiția dată în PanGEO pentru aceste zone de geohazard sau de hazard geologic este de "zone cu condiții geologice care pot produce pagube sau pierderea unor bunuri sau chiar a vieții". Pentru fiecare dintre zonele incluse în proiect a fost realizată o analiză detaliată a datelor de geologie locală cu datele SAR (PANGEO, 2013).

În 2016 a început definirea Serviciului European de Deplasare a Terenului (EGMS- European Ground Motion Service), ca parte a portofoliului de produse a Serviciului Copernicus de Monitorizare a Terenului. Scopul EGMS este de a furniza informații uniforme, coerente, standardizate, armonizate și sigure privind fenomenele naturale și antropice de deplasarea terenului peste întreaga Europa, dincolo de granițele naționale, cu acuratețe milimetrică. EGMS va sprijini politicile la nivel european și național. Validarea serviciului este planificată pentru finalul anului 2021 (Programme, 2021).

3 Concluzii

Subsidența urbană provocată de supraexploatarea apei subterane este în continuare o problemă curentă. Atât tehnologiile in-situ, cât și tehnologiile spațiale sunt utilizate pentru monitorizarea acestui fenomen. Așa cum metodele clasice de monitorizare, cum ar fi nivelmentul de precizie sau extensometria, tehnicile InSAR dezvoltate în ultimii 20-30 de ani sunt încă în proces de îmbunătățire. Noile abordări și algoritmi de procesare a datelor SAR sunt dezvoltate ținând cont de cantitatea extrem de mare de date satelitare SAR (inclusiv date gratuite) disponibile la momentul actual, în comparație cu deceniile trecute. Odată cu apariția a mai multor tehnici de monitorizare, utilizarea de măsurători combinate poate furniza informații mai multe cu privire la subsidența urbană, ajutând în înțelegerea acestui fenomen, în ciuda limitărilor pe care fiecare dintre metode le are.

Bibliografie

- Sneed, M., Brandt, J. . T. & Solt, . M., 2014. *Land Subsidence, Groundwater Levels, and Geology in the Coachella Valley, California, 1993–2010: US Geological Survey*, s.l.: s.n.
- Aditiya, A., Takeuchi, W. & Aoki, Y., 2017. *Land Subsidence Monitoring by InSAR Time Series Technique Derived From ALOS-2 PALSAR-2 over Surabaya City, Indonesia*. s.l., IOP Publishing.
- Ahmad, W., Choi, M., Kim, S. & Kim, D., 2017. Detection of Land Subsidence 1 due to Excessive Groundwater Use Varying with Different Land Cover Types in Quetta valley, Pakistan Using ESA Sentinel Satellite Data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*.
- Aldiss , D. et al., 2014. Geological interpretation of current subsidence and uplift in the London area, UK, as shown by high precision satellite-based surveying. *Proceedings of the Geologists' Association*, Volume 125, pp. 1-13.
- Al-Kayssi, A., Al-Karaghoul, A. A., Hasson, A. & Beker, S., 1990. Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, January-April, Volume 45, pp. 241-252.
- Allaby, M., 2013. *A Dictionary of Geology and Earth Sciences*. 4th ed. s.l.:Oxford University Press.
- Allen, R., 2005. PENMAN–MONTEITH EQUATION. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, pp. 180-188.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Armas, I. et al., 2016. InSAR validation based on GNSS measurements in Bucharest. *International Journal of Remote Sensing*, 37(32), pp. 5565-5580.
- Aslan, G. et al., 2018. Analysis of Secular Ground Motions in Istanbul from a Long-Term InSAR Time-Series (1992–2017). *Remote Sensing*, 10(3)(408).
- Auvinet, G., Méndez, E. & Juárez, M., 2017. *Recent information on Mexico City subsidence*. Seoul, s.n.
- Bakon, M. et al., 2016. Multi-sensor InSAR deformation monitoring over urban area of Bratislava (Slovakia). *Procedia Computer Science*, Volume 100, pp. 1127-1134.
- Bamler, R. & Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, Volume 14, p. R1–R54.
- Bateson, L., Cigna, F., Boon, D. & Sowter , A., 2015. The application of the Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 34, pp. 249-257.
- Bawden, G., Sneed, M., Stork, S. & Galloway, D., 2003. *Measuring Human-Induced Land Subsidence from Space*, s.l.: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Bawden, G. W. et al., 2012. *Investigation of Land Subsidence in the Houston-Galveston Region of Texas By Using the Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, 1993–2000*, s.l.: U.S. Geological Survey.
- Bawden, G. W. et al., 2001. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, Volume 412.
- Bell, J. W. et al., 2008. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 44(2).

- Berardino, P., Fornaro, G. & Lanari, R., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 40(11), pp. 2375-2383.
- Biot, M. A., 1941. General Theory of Three-Dimensional Consolidations. *Journal of Applied Physics*, 12(2), pp. 155-164.
- Biswas, K., Misra, A., Chakravarty, D. & Mitra, P., 2015. *Study of Ground Deformation of Kolkata Area Using PSInSAR*. Ahmedabad: Space Applications Centre.
- Bitelli, G., Bonsignore, F., Pellegrino, I. & Vittuari, L., 2015. *Evolution of the techniques for subsidence monitoring at regional scale: the case of Emilia-Romagna region (Italy)*. s.l., Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences., pp. 315-321.
- Bock, Y. et al., 2012. Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13(3).
- Boukhemacha, M. et al., 2015. General Aspects on Urban Hydrogeology and Highlights from Bucharest (Romania). *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(6), pp. 1279-1285.
- Burkett, V. R., Zilkoski, D. B. & Hart, D. A., 2003. Sea-Level Rise and Subsidence: Implications for Flooding in New Orleans, Louisiana. In: *U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference: proceedings of the Technical Meeting, Galveston, Texas, November 27-29, 2001*. s.l.:U.S. Geological Survey, pp. 63-70.
- Cabral-Cano, E. et al., 2008. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *GSA Bulletin*, 120(11/12), p. 1556–1566.
- Castellazzi, P. et al., 2017. InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, Volume 63, pp. 33-44.
- Castellazzi, P. et al., 2014. *GROUNDWATER DEFICIT AND LAND SUBSIDENCE IN CENTRAL MEXICO MONITORED BY GRACE AND RADARSAT-2*. Quebec City, IEEE Xplore, pp. 2597-2600.
- Catalao, J. et al., 2016. Integration of InSAR Analysis and Numerical Modeling for the Assessment of Ground Subsidence in the City of Lisbon, Portugal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, April, 9(4), pp. 1663-1673.
- CCIAS, 2015. *Integrated service for urban subsidence phenomena based on space-borne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and hydrogeological-geotechnical hybrid modeling "SIRYS"- Final Summary Report*, s.l.: s.n.
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. & Hong, S.-H., 2013. Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, Volume 128, pp. 150-161.
- Chelbi, S., Khireddine, A. & Charles, J., 2011. *Interferometry process for satellite images SAR*. Bursa, TURKEY, s.n., pp. 180-184.
- Chen, J., Knight, R., Zebker, H. A. & Schreuder, W. A., 2016. Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations. *Water Resources Research*, Volume 52, p. 3623–3636.
- Chen, M. et al., 2016. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sensing*, 8(468).
- Cigna, F. et al., 2016. 25 years of satellite InSAR monitoring of ground instability and coastal geohazards in the archaeological site of Capo Colonna, Italy. *Proceedings of SPIE, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XVI*, , Volume 10003.

- Damoah-Afari, P., Ding, X., Lu, Z. & Li, Z., 2008. DETECTING GROUND SETTLEMENT OF SHANGHAI USING INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (INSAR) TECHNIQUES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B7).
- Dassargues, A. & Li, X., 1991. Computing the Land Subsidence of Shanghai by a Finite Element Method. *Land Subsidence (Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, May 1991) IAHS Publ*, Volume 200, pp. 613-624.
- Davies, L. et al., 2013. A single-column model ensemble approach applied to the TWP-ICE experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013 May, Volume 118, pp. 6544-6563.
- Declercq, P.-Y., Devleeschouwer, X. & Pouriel, F., 2006. Subsidence revealed by PSInSAR technique in the Ottignies-Wavre area (Belgium) related to water pumping in urban area. *ESA, Proceedings of Fringe 2005 Workshop*.
- Declercq, P.-Y. et al., 2017a. Subsidence related to groundwater pumping for breweries in Merchtem area (Belgium), highlighted by Persistent Scatterer Interferometry. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, Volume 63, pp. 178-185.
- Declercq, P.-Y. et al., 2017b. A Study of Ground Movements in Brussels (Belgium) Monitored by Persistent Scatterer Interferometry over a 25-Year Period. *Geosciences*, November.7(4).
- Deng, L., Yan, W., Zhang, Y. & Shanguan, Z., 2016. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China. *Forest Ecology and Management*, Volume 366, pp. 1-10.
- Deng, Z. et al., 2017. Land subsidence prediction in Beijing based on PS-InSAR technique and improved Grey-Markov model. *GIScience & Remote Sensing*, 54(6), pp. 797-818.
- Devanthery, N. et al., 2014. An Approach to Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*, Volume 6, pp. 6662-6679.
- Dupigny-Giroux, L.-A. & Lewis, J., 1999. A Moisture Index for Surface Characterization over a Semiarid. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(8), pp. 937-945.
- Duro, J. et al., 2005. *HIGH RESOLUTION DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY USING TIME SERIES OF ERS AND ENVISAT SAR DATA*. s.l., s.n.
- e-geos, 2018. *COSMO-SkyMed System Description & User Guide*. [Online] Available at: http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-user_guide.pdf [Accessed 6 November 2018].
- Erkens, G. et al., 2015. *Sinking coastal cities*. s.l., Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences, p. 189–198.
- ESA & Terrafirma Partners, 2010. *Terrafirma*. [Online] Available at: <http://www.terrafirma.eu.com/> [Accessed 28 November 2018].
- ESA eoPortal Directory, 2018. *eoPortal Directory: JERS-1*. [Online] Available at: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/j/jers-1> [Accessed 6 November 2018].
- ESA/MODIS, 2018. *ESA Earth Online Terra/Aqua MODIS*. [Online] Available at: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/3rd-party-missions/current-missions/terraaqua-modis>
- ESA, 2012. *ESA Soil Moisture-Climate Change Initiative*. [Online] Available at: <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/93>
- ESA, 2017. *Earth ESA: ERS-1 (European remote-Sensing Satellite-1)*. [Online] Available at: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-1>

Raport Științific Nr.1- Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban

- ESA, 2018. ESA Sentinel. [Online]
Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- Ferretti, A. et al., 2011. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), pp. 3460-3470.
- Ferretti, A. et al., 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007)*. s.l.:ESA Publications .
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 39(1), pp. 8-20.
- Fetter , C., 2001. *Applied Hydrogeology*. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Fruneau, B. et al., 2004. *CONVENTIONAL AND PS DIFFERENTIAL SAR INTERFEROMETRY FOR MONITORING VERTICAL DEFORMATION DUE TO WATER PUMPING: THE HAUSSMANN-ST-LAZARE CASE EXAMPLE (PARIS, FRANCE)*. Frascati, Italy, (ESA SP-550).
- Gaitanaru, S. D. et al., 2017. Bucharest city urban groundwater monitoring system. *Procedia Engineering*, Volume 209, pp. 143-147.
- Galloway, D. et al., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *WATER RESOURCES RESEARCH*, October, 34(10), pp. 2573-2585.
- Galloway, D. L. & Burbey, T. L., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, Volume 19, pp. 1459-1486.
- Galloway, D. L. & Hoffmann, J., 2006. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15(1), p. 133–154.
- Ganie, M. A. & Nusrath, A., 2016. Determining the Vegetation Indices (NDVI) from Landsat 8 Satellite Data. *International Journal of Advanced Research*, 4(31), pp. 1459-1463.
- GOCE, 2015. GOCE ESA. [Online]
Available at: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE
- Goel, K., Parizzi, A. & Adam , N., 2011. *SALT MINING INDUCED SUBSIDENCE MAPPING OF LUENEBURG (GERMANY)*. SALT MINING INDUCED SUBSIDENCE MAPPING OF LUENEBURG (GERMANY). s.l., ESA SP-697.
- GRACE, 2012. NASA GRACE. [Online]
Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/overview/index.html
- GRACE-FO, 2018. NASA GRACE-FO Mission. [Online]
Available at: <https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/overview/>
- G-REALM, U., 2018. USDA, IPAD, G-REALM. [Online]
Available at: https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/
- GSA, 2018. *European Global Navigation Satellite Systems Agency: What is GNSS*. [Online]
Available at: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>
[Accessed 6 November 2018].
- Guo, J., Zhou, L., Yao, C. & Hu, J., 2016. Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing. *Sensors*, 16(1495).
- Hanson, R., Li, Z. & Faunt, C., 2004. *Documentation of the Santa Clara Valley regional ground-water/surface water flow model, Santa Clara County, California: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004–5231, 75 p.*, s.l.: s.n.

- Hanssen, R., 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. NEW YORK, BOSTON, DORDRECHT, LONDON, MOSCOW: Kluwer Academic Publisher.
- Hashemi Farahani, H. et al., 2014. *Depletion of ground water stocks and other long-term mass trends observed with satellite gravimetry*. Hague, Netherlands, s.n.
- Heleno, S. I. et al., 2011. Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence. *Remote Sensing of Environment*, August, 115(8), pp. 2152-2167.
- Herrera, G. et al., 2009. Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data – modelling and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 9, pp. 647–661.
- Herrera, G. et al., 2009b. Validation and comparison of Advanced Differential Interferometry Techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 501-512.
- Hirono, T., 1969. Niigata ground subsidence and ground-water change. *Land subsidence, Internat. Assoc. Sci. Hydrology*, Volume 1, pp. 144-161.
- Hooper, A., Segall, P. & Zebker, H., 2007. Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 112(B7).
- Hu, R., Yue, Z., Wang, L. & Wang, S., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, Volume 76, pp. 65-77.
- Ivan, I. & Popa, I., 2012. Up-to-date hydrodynamic and hydrochemical state of the Fratesti deep aquifer system in the Bucharest area. *Seria HIDROTEHNICA, TRANSACTIONS on HYDROTECHNICS*, 57(71)(Fascicola1).
- JACKSON, R. & HUETE, A., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, Volume 1, pp. 185-200.
- Jaxa, 2007. *Jaxa: Advanced Land Observing Satellite "DAICHI" (ALOS)*. [Online] Available at: <http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos/index.html> [Accessed 6 November 2018].
- Jovanovic, N., Mu, Q., Bagan, R. & Zhao, M., 2015. Dynamics of MODIS evapotranspiration in South Africa. *Water SA*, 41(1).
- Kala, S., 2015. *Land subsidence modeling using spaceborne geodetic techniques and field based measurements*. Uttarakhand, India: Indian Institute of Remote Sensing.
- Karila, K. et al., 2013. A Comparison of Precise Leveling and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Building Subsidence Rate Measurement. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, Volume 2, pp. 797-816.
- KARI & SIIS, 2015. *KOMPSAT-5 PRODUCT SPECIFICATIONS- Standard Products Specifications*, s.l.: s.n.
- Kiany, M. S. K., Balling, R., Cervený, R. S. & Krahenbuhl, D. S., 2018. Diurnal variations in seasonal precipitation in Iran from TRMM measurements. *Advances in Space Research*, November, 62(9), pp. 2418-2430.
- Kim, J.-s. et al., 2007. Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR. *Geosciences Journal*, 11(1), pp. 59-73.
- Levinsen, J. et al., 2016. *Are we drowning? Urban land subsidence in Thyboron, Denmark, from ERS-2 and Sentinel-1 imagery and precision leveling*. Prague, ESA.
- Liu, D. & Niemeier, W., 2014. Process-related deformation monitoring by PSI using high resolution space-based SAR data: a case study in Düsseldorf, Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, Volume 2, p. 4813–4830.
- Long, J. & Ding, X., 2010. Monitoring Ground Subsidence in New Orleans with Persistent Scatterers Interferometry. *IEEE Xplore*, pp. 1-5.

Raport Științific Nr.1- Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban

- Maccherone, B., 2018. NASA MODIS. [Online] Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> [Accessed October 2018].
- Mann, J., 2012. *LANDSAT 1-5 MULTISPECTRAL SCANNER (MSS) IMAGE ASSESSMENT SYSTEM (IAS) RADIOMETRIC ALGORITHM DESCRIPTION DOCUMENT (ADD)*, s.l.: USGS.
- Marbouti, M. et al., 2017. A Study of Landfast Ice with Sentinel-1 Repeat-Pass Interferometry over the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(833).
- Meijerink, A., 2007. *Remote Sensing Applications to Groundwater*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Metternicht, G., Hurni, L. & Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, Volume 98, pp. 284-303.
- Miller, M. M. & Shirzaei, M., 2015. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Volume 120, p. 5822–5842.
- Monteith, J. L., 1965. Evaporation and environment. *Symposium of the society of experimental*, Volume 19, p. 205–234.
- Mora, O., Mallorqui, J. J. & Broquetas, A., 2003. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps From a Reduced Set of Interferometric SAR Images. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 41(10), pp. 2243-3353.
- Mu, Q., Zhao, M. & Running, S. W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, Volume 115, p. 1781–1800.
- Mu, Q., Zhao, M. & Running, S. W., 2012. Brief Introduction to MODIS Evapotranspiration Data Set (MOD16).
- NASA GPM, 2017. *Global Precipitation Measurement*. [Online] Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html
- NASA, 2014. *SMAP Handbook Soil Moisture Active Passive, Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space*. s.l.:s.n.
- Nguyen, M., Chang, C.-P. & Tseng, K.-H., 2018. *Using Sentinel-1 Tops SAR and SBAS for land subsidence monitoring in Hanoi, Vietnam*. Pyeongchang, Korea, International Symposium on Remote Sensing 2018.
- NOAA, 2018. *National Oceanic and Atmospheric Administration, Ocean Exploration*. [Online] Available at: https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/learning/7_water_cycle/water_cycle.html#slide
- Pail, R. et al., 2010. Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 37(L20314).
- Pandolfo, A., Antunes, P., Gong, X. & Gil, A., n.d. *Using Landsat TM data for soil moisture mapping*, s.l.: University of Leicester.
- PANGEO, 2013. PANGEO. [Online] Available at: <http://www.pangeoproject.eu/>
- Parcharidis, I. et al., 2006. Subsidence monitoring within the Athens Basin (Greece) using space radar interferometric techniques. *Earth Planets Space*, Volume 58, pp. 505-513.
- Park, C. & Allaby, M., 2017. *A Dictionary of Environment and Conservation*. 3 ed. s.l.:Oxford University Press.

Raport Științific Nr.1- Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban

- Parkinson, C., 2018. *Aqua Project Science*. [Online] Available at: <https://aqua.nasa.gov/> [Accessed October 2018].
- Pepe, M. et al., 2005. Snow cover monitoring in Alpine regions using ENVISAT optical data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(21), pp. 4661-4667.
- Perissin, D. & Wang, T., 2010. Time-Series InSAR Applications Over Urban Areas in China. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 4(1), pp. 92-100.
- Perissin, D., Wang, Z. & Lin, H., 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 73, pp. 58-67.
- Piesbergen, J., Holecz, F. & Haefner, H., 1995. *SNOW COVER MONITORING USING MULTITEMPORAL ERS-1 SAR DATA*. s.l., IEEE.
- PMM, N., 2015. *NASA Precipitation Measurement Missions TRMM*. [Online] Available at: <https://pmm.nasa.gov/TRMM>
- Poenaru, V., Badea, A., Cimpeanu, S. & Dana Negula, I., 2015. Synthetic aperture radar for assessing land degradation in a salt mining area – Ocnele. *Romanian Journal of Geography*, 59(2), pp. 117-127.
- Poland, J., 1977. Land subsidence stopped by artesian-head recovery, Santa Clara Valley,. *IAHS/AISH Pub. No. 121*, pp. 124-132.
- Poland, J. S., 1984. *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. s.l.:UNESCO.
- Qin, X., Liao, M., Zhang, L. & Yang, M., 2017. Structural Health and Stability Assessment of High-Speed Railways via Thermal Dilation Mapping With Time-Series InSAR Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6), pp. 2999 - 3010.
- Qu, F. et al., 2015. Mapping ground deformation over Houston–Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, Volume 169, p. 290–306.
- Radutu, A., Nedelcu, I. & Gogu, C. R., 2017. An overview of ground surface displacements generated by groundwater dynamics, revealed by InSAR techniques. *Procedia Engineering*, Volume 209, pp. 119-126.
- Raspini, F., Cigna, F. & Moretti, S., 2012. Multi-temporal mapping of land subsidence at basin scale exploiting Persistent Scatterer Interferometry: case study of Gioia Tauro plain (Italy). *Journal of Maps*, 8(4), pp. 514-254.
- Raspini, F. et al., 2014. Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 28, pp. 78-89.
- Riley, F., 1984. Developments in borehole extensometry. *Land subsidence. Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence*, pp. 169-186.
- RiskNET, 2012. *RiskNET project*, s.l.: s.n.
- Rocca, F., Prati, C. & Ferretti, A., 1997. *An overview of SAR Interferometry*. Florence, s.n.
- Rodell, M., 2015. *NASA Activities and Plans in Water Cycle Research*, s.l.: ESA Conference Bureau.
- RODELL, M. et al., 2015. The Observed State of the Water Cycle in the Early Twenty-First Century. *JOURNAL OF CLIMATE*, Volume 28.
- Rokugawa, S. & Nakamura, T., 2015. *Long-range ground deformation monitoring by InSAR analysis*. s.l., y Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences, p. 343–346.
- Roy, D. & Robinson, K. E., 2009. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering. *Engineering Geology*, Volume 107, p. 109–117.

- Ruiz-Armenteros, A. M. et al., 2016. *SUBSIDENCE MONITORING IN SEVILLE (S SPAIN) USING MULTI-TEMPORAL InSAR*. Prague, Czech Republic, ESA.
- Ruiz-Constan, A. et al., 2016. Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced. *Environ Earth Sci*, 75(242), pp. 1-16.
- Samsonov, S. V. et al., 2014. Rapidly accelerating subsidence in the Greater Vancouver region from two decades of ERS-ENVISAT-RADARSAT-2 DInSAR measurements. *Remote Sensing of Environment*, Volume 143, pp. 180-191.
- Sassa, K. & Canuti, P., 2008. *Landslides- Disaster Risk Reduction*. s.l.:Springer Science & Business Media.
- Sato, C., Haga, M. & Nishino, J., 2006. Land Subsidence and Groundwater. *International Review for Environmental Strategies*, 6(2), p. 403 – 424.
- Schmidt, D. A. & Burgmann, R., 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, September.108(B9).
- Serrano-Juan, A. et al., 2016. Leveling vs. InSAR in urban underground construction monitoring: Pros and cons. Case of la sagrera railway station (Barcelona, Spain). *Engineering Geology*.
- She, X. et al., 2015. Comparison of the Continuity of Vegetation Indices Derived from Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ Data among Different Vegetation Types. *Remote Sensing*, 7(10), pp. 13485-13506.
- Shirzaei, M. & Bürgmann, R., 2012. Topography correlated atmospheric delay correction in radar interferometry using wavelet transforms. *Geophysical Research Letters*, 39(1).
- Solari, L. et al., 2017. Combined Use of C- and X-Band SAR Data for Subsidence Monitoring in an Urban Area. *Geosciences*, 7(21).
- Sousa, J. J. et al., 2012. *DETECTION OF GROUND DEFORMATION IN THE OPORTO METROPOLITAN AREA*. Frascati, Italy, ESA SP-697.
- Sousa, J. J. et al., 2014. Multi-temporal InSAR for deformation monitoring of the Granada and Padul faults and the surrounding area (Betic Cordillera, southern Spain). *Procedia Technology*, pp. 886-896.
- Souter, A., Bateson, . L., Ambrose, K. & Fifik Syafiudin, M., 2013. DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields. *Remote Sens. Lett.*, 4(10), pp. 979-987.
- Srinivasan, M., 2013. *Hydrology from Space: NASA's Satellite Supporting Water Resources Applications*. s.l., s.n.
- Suhet, 2015. *Sentinel-2 User Handbook*, s.l.: ESA.
- Sutton, L., 2012. *Satellite Image Classification & Change Detection*. [Online] Available at: http://web.pdx.edu/~nauna/resources/8-2012_lecture1-vegetationindices.pdf [Accessed April 2018].
- Tesauro, M. et al., 2000. Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(13), pp. 1961-1964.
- Tessitore, S. et al., 2016. Comparison of water-level, extensometric, DInSAR and simulation data for quantification of subsidence in Murcia City (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, Volume 24, pp. 727-747.
- Tessitore, S. et al., 2013. *Subsidence numerical modeling due to ground water extraction integrating advanced*. Madrid, s.n.
- The Geological Society, 2018. *Coal Mining Diagnostic Characteristics*. [Online] Available at: http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/subsidence_geohazard/eng_geol_subsidence_coal_diag.htm

Raport Științific Nr.1- Stadiul actual al cercetărilor privind utilizarea tehnicilor de teledetecție în
monitorizarea mediului subteran urban

- Thome, K., 2018. *Terra: the EOS Flagship*. [Online] Available at: <https://terra.nasa.gov/> [Accessed October 2018].
- UNESCO, 2015. *Land Subsidence*. [Online] Available at: <http://landsubsidence-unesco.org/content/what-land-subsidence>
- USGS, 2017. *California Water Science Center*. [Online] Available at: URL: https://ca.water.usgs.gov/land_subsidence/california-subsidence-cause-effect.html
- Vazquez- Sune, E., Sanchez-Vila, X. & Carrera, J., 2005. Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of. *Hydrogeology Journal*, Volume 13, pp. 522-533.
- Vijdea, A. & Bindea, G., 2013. *D7.1.33 GeoHazard Description for Bucharest, Enabling Access to Geological Information in Support of GMES (PANGEO)*, s.l.: s.n.
- WANG, L. & QU, J. J., 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Sci. China*, 3(2), p. 237–247.
- Wasowski, J. & Bovenga, F., 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, Volume 174, pp. 103-138.
- Williams, S. D. P., Baker, T. F. & Jeffries, G., 2001. Absolute Gravity Measurements at UK tide gauges. *Geophysical Research Letters*, 28(12), pp. 2317-2320.
- Xu, B. et al., 2016. Coastal Subsidence Monitoring Associated with Land Reclamation Using the Point Target Based SBAS-InSAR Method: A Case Study of Shenzhen, China. *Remote Sensing*, 8(652).
- Yang, K. et al., 2016. Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation. *Sensors*, 16(12).
- Yan, Y. et al., 2012. Mexico City Subsidence Measured by InSAR Time Series: Joint Analysis Using PS and SBAS Approaches. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 5(4), pp. 1312 - 1326.
- Zerbini, S. et al., 2007. A Combination of Space and Terrestrial Geodetic Techniques to Monitor Land Subsidence: Case Study, the Southeastern Po Plain, Italy. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 112 (B05401).
- Zhao, Q. et al., 2009. A Study of Ground Deformation in the Guangzhou Urban Area with Persistent Scatterer Interferometry. *Sensors*, Volume 9, pp. 503-518.
- Zhou, C. et al., 2017. InSAR Time-Series Analysis of Land Subsidence under Different Land Use Types in the Eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, 9(380).