

Detekcia poklesov zemského povrchu v Mexico City pomocou SAR interferometrie s využitím dát družice Sentinel-1

Bc. Alex Babják

Školiteľ: doc. Mgr. Michal Gallay, PhD.

Adresa: Ústav geografie, PF UPJŠ, Jesenná 5, 080 01 Košice, e-mail: ug@upjs.sk

Abstract: *Detection of land surface subsidence in Mexico City using SAR interferometry by data from the Sentinel-1 satellite: The extraction of underground water in some areas of the world causes serious subsidence of the territory, which results in endangerment of the local population or damage to the infrastructure. One such place is Mexico City, where the subsidence of the earth's surface caused the water to be drained from the former lake, which in turn caused the instability of the soil in the area. This work uses radar interferometry (InSAR) to monitor subsidence in Mexico City using European Space Agency (ESA) Sentinel-1 radar data and SNAP software.*

Keywords: *SAR interferometry, land subsidence, Mexico city, Sentinel-1, SNAP*

1. Úvod

V súčasnosti čelíme globálnemu fenoménu poklesu zemského povrchu, ktorý má významný dopad na mnohé regióny po celom svete. Tento pokles je často spojený s extrakciou podzemnej vody, pôsobením mora, alebo je dôsledkom ťažobnej činnosti. Hoci vo svete dochádza k neočakávaným náhlym zrúteniam zemského povrchu alebo banským katastrofám, väčšina poklesov zemského povrchu prebieha kontinuálne a na veľkých plochách. Tieto zmeny boli historicky zaznamenané vďaka posunu referenčných bodov, ktoré slúžia ako kľúčové indikátory regionálnych deformácií. Špecifickým typom poklesov sú tie spojené s odčerpávaním podzemnej vody, ktoré si vyžadujú podrobný výskum. Mnohé mestá v súčasnosti, ako Benátky, Jakarta a Mexico City dlhoročne čelia tomuto problému (Chaussard, et al. 2021).

Na detekciu a mapovanie deformácií zemského povrchu sa používa technológia známa ako Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). InSAR využíva radarové snímky získané zo satelitov na obežnej dráhe Zeme, ktoré umožňujú identifikovať a monitorovať poklesy a vzostupy zemského povrchu s vysokou presnosťou, čo prispieva k lepšiemu porozumeniu samotných procesov vedúcich k poklesom zemského povrchu. Správne pochopenie týchto procesov v kombinácii so starostlivým manažmentom prírodných zdrojov môže takisto výrazne zmierniť negatívne dôsledky ľudskej činnosti na pôdu a vodné zdroje. Satelitné misie ako Sentinel-1 sú špeciálne navrhnuté na monitorovanie deformácií zemského povrchu pomocou InSAR. Táto technológia je najefektívnejšia, keď sa snímky získavajú z konzistentného bodu vo vesmíre v pravidelných intervaloch. Cieľom tejto práce je analyzovať a vizualizovať zmeny zemského povrchu v Mexico City a jeho okolí v období rokov 2017 až 2023. S využitím softvéru SNAP od Európskej vesmírnej agentúry (ESA) boli odvodené fázové interferogramy a následne kvantifikované samotné deformácie zemského povrchu, ktoré sú následne prezentované v aplikácii Google Earth Pro pre vizualizáciu miery poklesu zemského povrchu.

2. Prehľad problematiky

Mexico City sa rozprestiera v uzavretej kotline, ktorá kedysi tvorila časť rozsiahleho jazerného systému bez priameho odtoku, situovanej vo výške 2 200 metrov nad morom. Tento región je obklopený horskými reťazcami patriacimi do Mexického vulkanického pásma, kde niektoré vrcholy dosahujú výšky nad 5 000 metrov (Chaussard, 2021). Voda z dažďov a prameňov stekajúca z týchto vyšších polôh sa akumulovala v tejto nížine, kde sa v dôsledku intenzívneho vyparovania stala zdrojom slanej vody, čím vzniklo historické jazero Texcoco. Aztékovia založili na tomto mieste okolo roku 1325 mesto Tenochtitlán, ktoré bolo neskôr v roku 1521 dobyté Hernánom Cortézom, čo znamenalo pád Aztéckej ríše. Španielska koloniálna vláda následne iniciovala projekty na reguláciu záplav, ktoré viedli k postupnému odvodneniu jazera pomocou systému kanálov a hrádzí. Do začiatku 20. storočia bolo údolie Mexico City kompletne odvodnené prostredníctvom 40-kilometrového kanála a tunela prechádzajúceho cez okolité hory. Dnes sa odpadová a dažďová voda odvádza z regiónu rozsiahlym systémom kanálov a tunelov, pričom 30 % pitnej vody pre mesto sa importuje cez podobnú infraštruktúru. Zvyšných 70 % vody pochádza z podzemných zdrojov, kde studne dosahujú priemernú hĺbku 600 metrov a v niektorých prípadoch až 3 000 metrov. Nadmerné čerpanie z týchto zdrojov vedie k významnému poklesu pôdy, fenoménu, ktorý je v Mexico City zaznamenaný od skorého 20. storočia. Tento pokles zvyšuje riziko záplav a poškodzuje infraštruktúru vodovodov a kanalizácie, čo má za následok úniky a kontamináciu vody. Tieto problémy prispievajú k sociálnej segregácii, keďže prístup k čistej pitnej vode sa stáva hlavným rozlišovacím faktorom medzi rôznymi sociálnymi vrstvami a ovplyvňuje kvalitu života obyvateľov (Cigna a Tapete, 2021; Poreh, Pirasteh, Cabral, 2021).

V tomto prípade je pokles pôdy zvyčajne spôsobený extrakciou veľkého objemu podzemnej vody z jemnozrnných sedimentov, ktoré sú čiastočne zodpovedné za udržiavanie štruktúry pôdy. Keď sa voda odstráni, dochádza k zhutneniu hornín. V praxi to znamená, že keď sa voda odčerpá, zrná sedimentu sa posunú a zmenšia svoj objem. Pokles pôdy v Mexico City, ktorý je dôsledkom čerpania podzemnej vody, sa začal v 40. rokoch 19. storočia a v nasledujúcich desaťročiach sa tento problém ešte zvýraznil (Cigna a Tapete, 2021).

Pre mapovanie takýchto deformácií sa využíva Interferometrický SAR (InSAR) s využitím aj voľne dostupných radarových satelitných dát, ktorý využíva fázový rozdiel medzi dvoma komplexnými radarovými SAR pozorovaniami tej istej oblasti z mierne odlišných polôh senzorov a získava informácie o vzdialenosti zemského terénu. Kombináciou fázy týchto dvoch snímok po spoločnej registrácii možno vygenerovať interferogram, kde fáza vysoko koreluje s topografiou terénu a možno zmapovať deformačné vzory. Ak sa z interferogramov odstráni fázový posun súvisiaci s topografiou, rozdiel medzi výslednými produktmi ukáže vzory povrchovej deformácie, ktoré sa vyskytli medzi dvoma dátumami získania. Táto metóda sa nazýva diferenciálna interferometria (DInSAR) (Sentinel Online, 2024).

V posledných desaťročiach sú čoraz prístupnejšie pre monitorovanie deformácií povrchu aj voľne dostupné radarové satelitné dáta, ako dáta z misie Sentinel-1 od ESA, ktoré použitím vyššie zmienenej metódy SAR interferometrie dokážu monitorovať jemné pohyby zemského povrchu. Vďaka globálnemu pokrytiu misia Sentinel-1 umožňuje nepretržité monitorovanie veľkých území. Misia Sentinel-1 je súčasťou iniciatívy Copernicus a pozostáva z konštelácie dvoch polárne orbitujúcich satelitov. Tieto satelity pracujú deň a noc a využívajú C-pásmové syntetické radarové snímanie, čo im umožňuje získavať obrazy bez ohľadu na počasie.

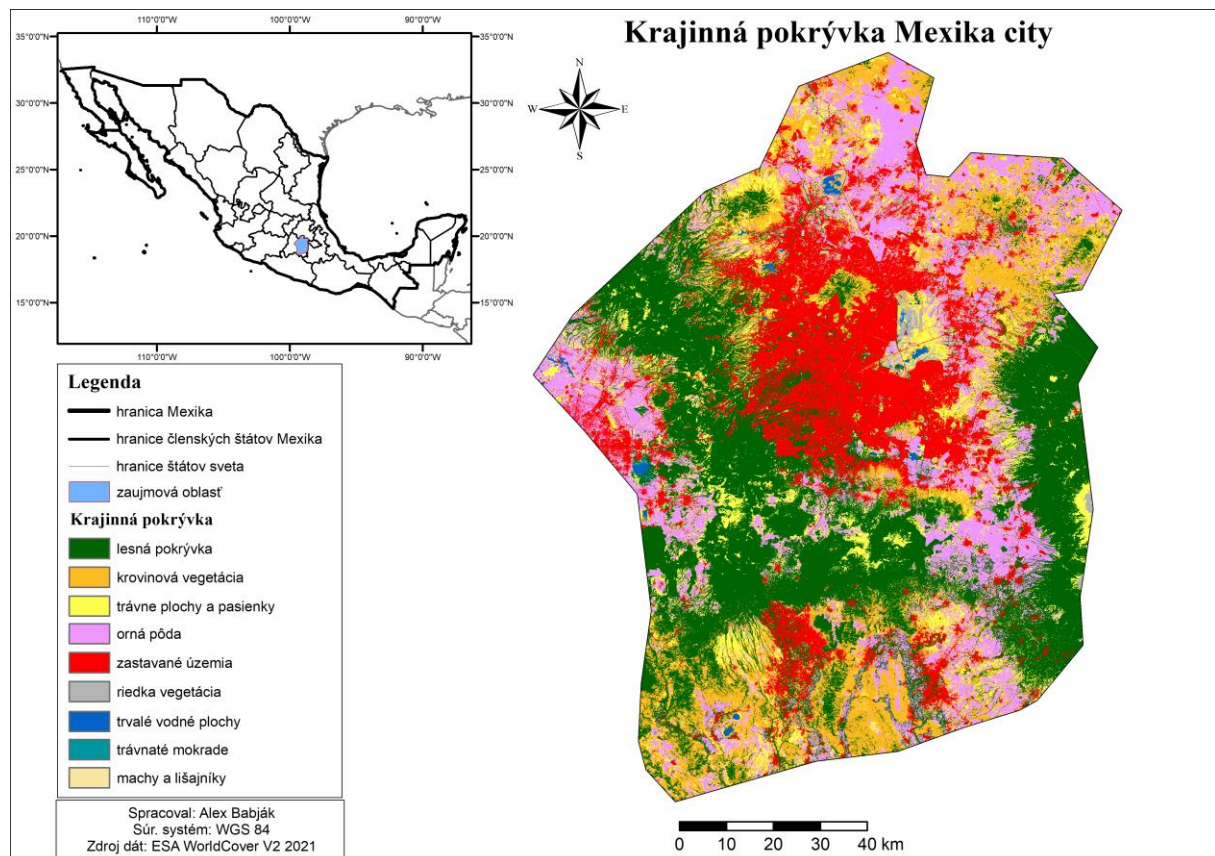
Sentinel-1 je navrhnutý tak, aby pracoval v predprogramovanom režime prevádzky, sníma všetky globálne pevninské masy, pobrežné zóny a lodné trasy vo vysokom rozlíšení a pokrýva globálny oceán. Misia je charakterizovaná veľkým množstvom opakovanými pozorovaniami, systematickou produkciou a politikou voľného a otvoreného prístupu k dátam (Sentinel Online, 2024).

3. Zájmové územie

Ako bolo uvedené, hlavné mesto Mexika, Mexico City, sa rozprestiera v údolí obklopenom horskými pásmami, známom ako Valle de México. Tento reliéf je charakteristický svojou rozmanitosťou, vrátane horských masívov, dolín, sopečných vrcholov ako napríklad Popocatepetl, ktorý sa nachádza východne od Mexika city, a rovinatých oblastí, na ktorej leží samotné mesto.

Rozloha skúmaného územia je približne 2 400 km². Vzhľadom na rozsiahlosť skúmaného územia a veľkosť administratívnych hraníc bolo územie záujmu na mape prispôbené rozsahu nášho výskumu. Podľa ESA Worldcover dát reprezentovaných na obrázku č.1, dominuje krajinej pokrývke lesná vegetácia, zobrazená tmavozelenou farbou, ktorá sa nachádza predovšetkým na svahoch hôr. Na druhom mieste podľa rozlohy je urbanizovaná oblasť, ilustrovaná červenou farbou. Ďalšie typy krajinej pokrývky zahŕňajú krovinaté porasty (oranžová farba), ornú pôdu (ružová farba) a iné kategórie, ktoré sú v území zastúpené v menšej miere (ESA Worldcover 2021).

Problém s poklesom zeme sa v rámci zájmového územia vyskytuje najmä v zastavanom území mesta.

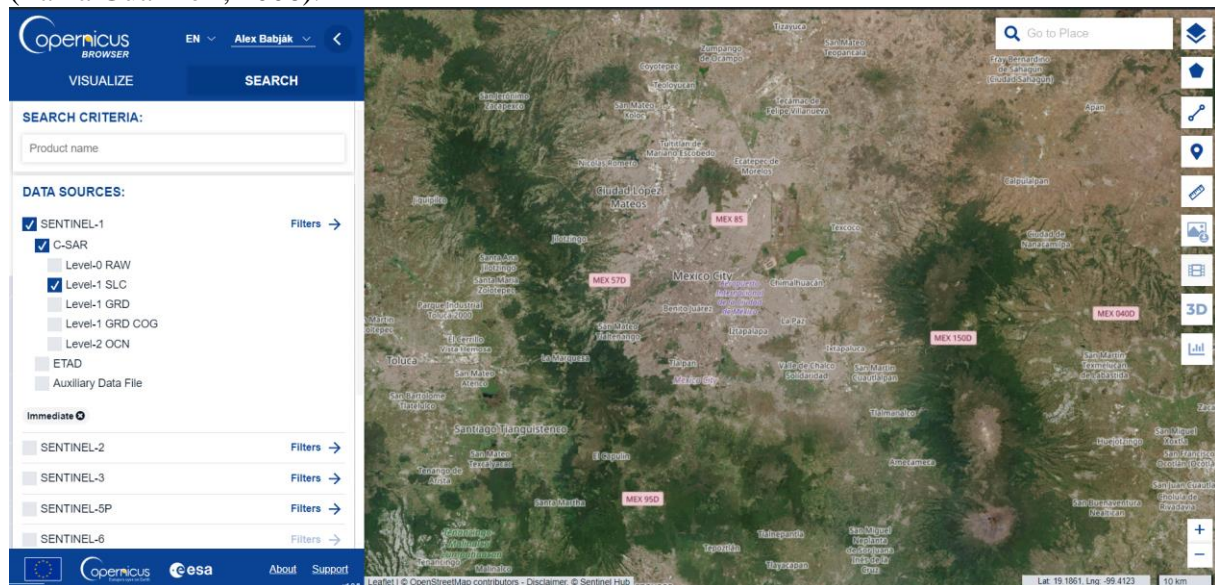


Obr. 1. Poloha zájmového územia v rámci štátu Mexiko + krajinná pokrývka
Zdroj: ESA Worldcover V2 2021 (vlastné spracovanie)

4. Dáta

Dáta potrebné pre analýzu poklesov zemského povrchu boli získané zo stránky Dataspace Copernicus (ESA, <https://dataspace.copernicus.eu/>). Pre analýzu boli zvolené 4 scény z družice Sentinel-1 produktu level 1 – Single Look Complex (skr. SLC) Európskej vesmírnej agentúry (ESA). Využité boli dáta v režime Interferometric Wide (IW), ktorý je hlavným režimom snímania v rámci tejto misie a získava údaje s 250 km záberom pri priestorovom rozlíšení 5 m x 20 m (jeden pohľad). Režim IW zachytáva tri tzv. subswaths (podriadky) pomocou techniky

pozorovania terénu s progresívnym skenovaním SAR (TOPSAR). Pri technike TOPSAR je lúč smerovaný v rozsahu a elektronicky riadený zozadu dopredu v azimutálnom smere pre každú dávku, čím sa zabráni vrúbkovaniu a výsledkom je homogénna kvalita obrazu v celom riadku (Zan a Guarnieri, 2006).



Obr. 2. Stránka Copernicus browser – voľba územia a typu satelitu

Zdroj: <https://dataspace.copernicus.eu/>

Dáta produktu SLC majú zvyčajnú veľkosť okolo 7 GB, práca s takýmito dátami preto vyžaduje tiež zvýšené požiadavky na výkon počítača a grafiku.

Tab. 1. Produkty Sentinel-1stiahnuté zo stránky Copernicus použité pre analýzy v rámci práce

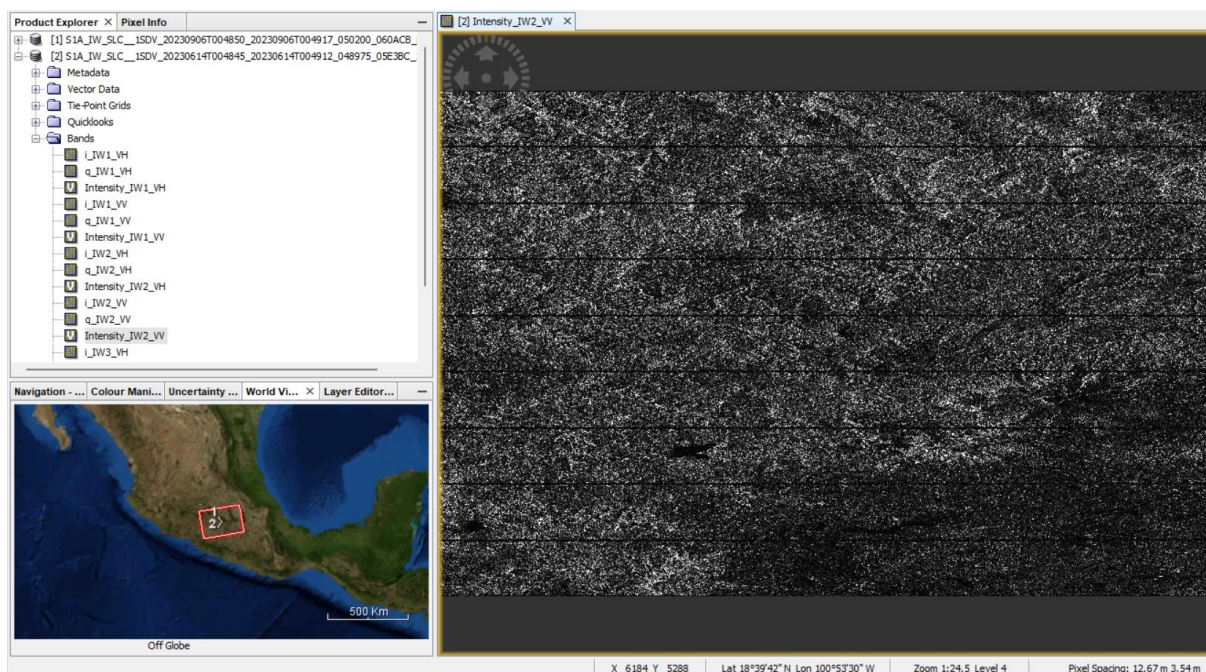
Názov produktu	Misia	Úroveň	Nástroj	Dátum snímky
S1A_IW_SLC__1SDV_20230906T004850_20230906T004917_050200_060ACB_D4DD.SAFE	Sentinel-1	SLC	SAR	6.9.2023
S1A_IW_SLC__1SDV_20230614T004845_20230614T004912_048975_05E3BC_2DAF.SAFE	Sentinel-1	SLC	SAR	14.6.2023
S1A_IW_SLC__1SDV_20170609T004809_20170609T004836_016950_01C369_0AF6.SAFE	Sentinel-1	SLC	SAR	9.6.2017
S1A_IW_SLC__1SDV_20170925T004815_20170925T004841_018525_01F37C_8FED.SAFE	Sentinel-1	SLC	SAR	25.9.2017

Zdroj: <https://dataspace.copernicus.eu/>

Pre spracovanie údajov bol využitý voľne dostupný softvér SNAP od ESA. Treba podotknúť, že odporúčané je využiť počítač, ktorý ma minimálne 16 GB RAM, optimálne 32 GB.

4.1 Spracovanie údajov

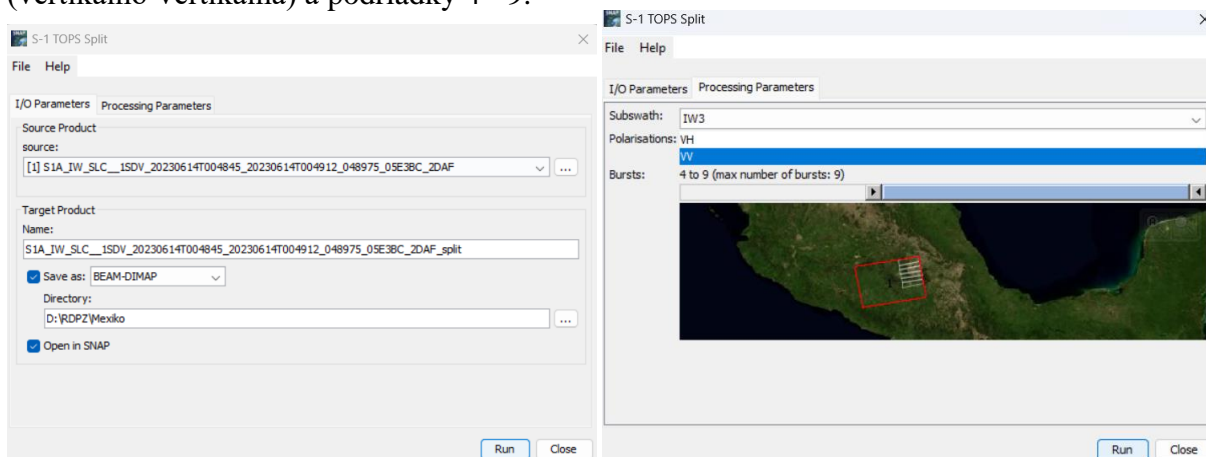
Stiahnuté produkty Sentinel-1 IW SLC boli importované do softvéru SNAP od ESA. Po otvorení sa produkty zobrazia v okne Product Explorer. V okne World View je možný prvotný náhľad na lokalizáciu produktov (obr.3).



Obr. 3. Program SNAP – Importované surové dáta produktu Sentinel-1 IW SLC

Sentinel-1 TOPS

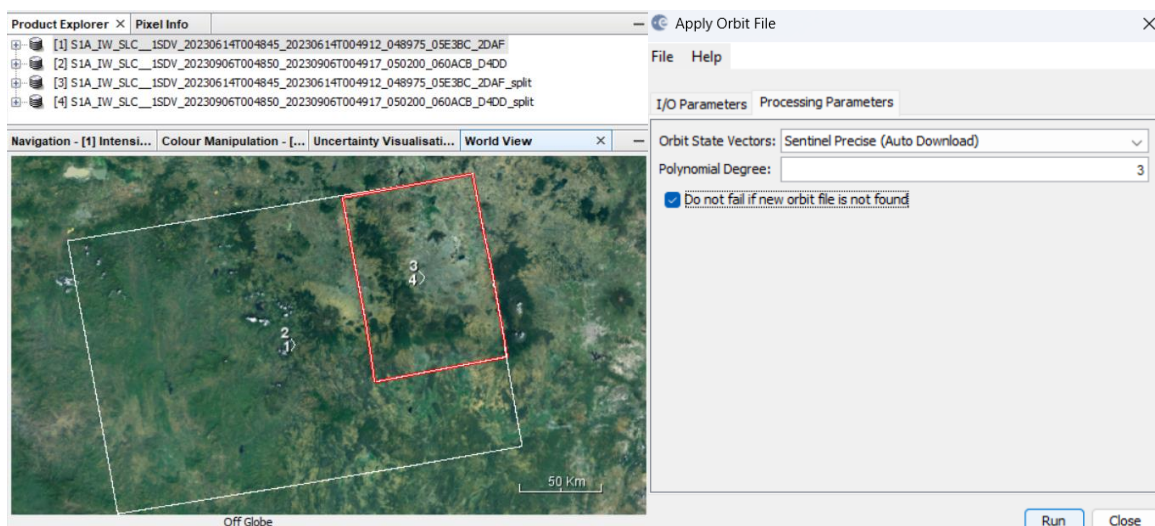
Nakoľko oblasť záujmu spadala do jedného z 3 podriadkov (tzv. bursts) snímky Sentinel-1, pre ďalšie spracovanie sme extrahovali už len je práve jeden takýto podriadok, ktorý zachytáva naše záujmové územie. Extrakciu sme uskutočnili pomocou nástroja Sentinel-1 TOPS Split pre každý zo štyroch produktov na čiastkový podriadok IW3. Pre naše účely IW3 predstavuje východnú časť snímky, ktorá je potrebná pre našu analýzu. Následne bola zvolená polarizácia VV (vertikálno-vertikálna) a podriadky 4 - 9.



Obr. 4. Program SNAP – zvolené parametre nastavení v nástroji S-1 TOPS Split

Apply Orbit File

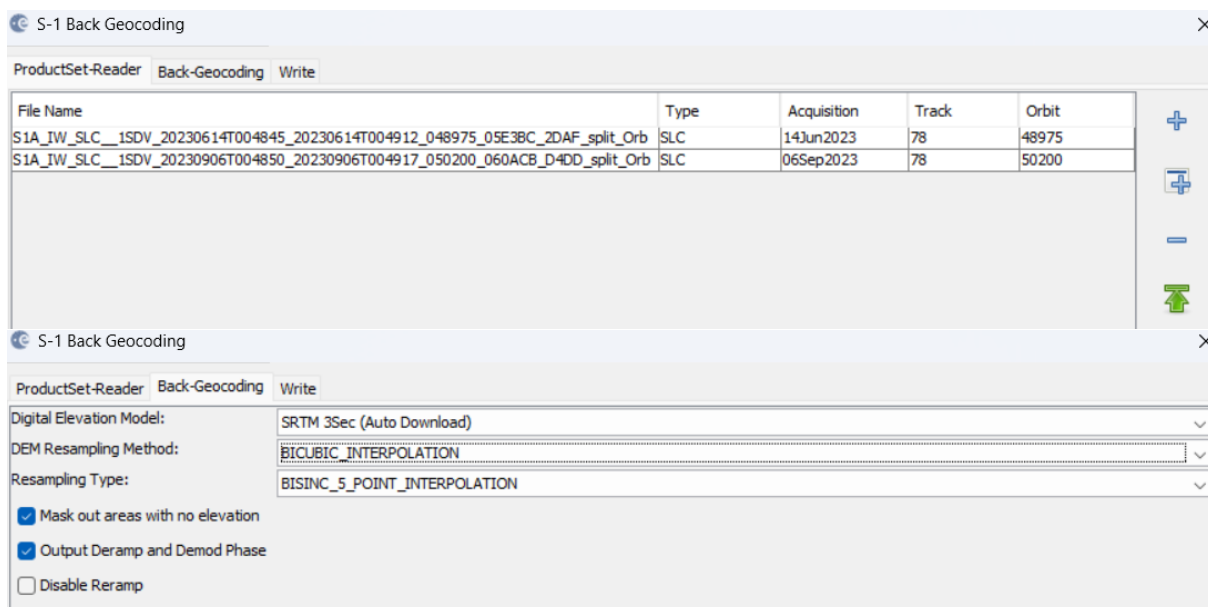
Ďalším krokom spracovania týchto produktov bolo aplikovanie dát o obežných dráhach scén Sentinel-1 s cieľom poskytnúť presné informácie o polohe a parametroch satelitu (obr. 5). Dráhy o polohe sú načítavané automaticky z produktu Sentinel-1 IW SLC a na základe knižnice softvéru SNAP.



Obr. 5. Program SNAP – priradenie parametrov o orbite pomocou nástroja Apply Orbit File

Back Geocoding

Nasledujúcim krokom bola spoločná koregistrácia dvoch produktov Sentinel-1 (pre rok 2023 a následne dvoch produktov aj pre rok 2017) (obr. 6). Druhý nastavený produkt (podriadený, tzv. slave) je spoluregistrovaný vzhľadom na prvý produkt (hlavný, tzv. master). Sentinel-1 Back Geocoding operátor následne spoluregistruje dva produkty S-1 (hlavný a podriadený) rovnakého podriadku pomocou obežných dráh týchto dvoch produktov a digitálneho výškového modelu (z angl. Digital Elevation Model, skr. DEM). Pre interpoláciu bola zvolená bikubicná metóda, pre resampling zvolená 5-bodová.



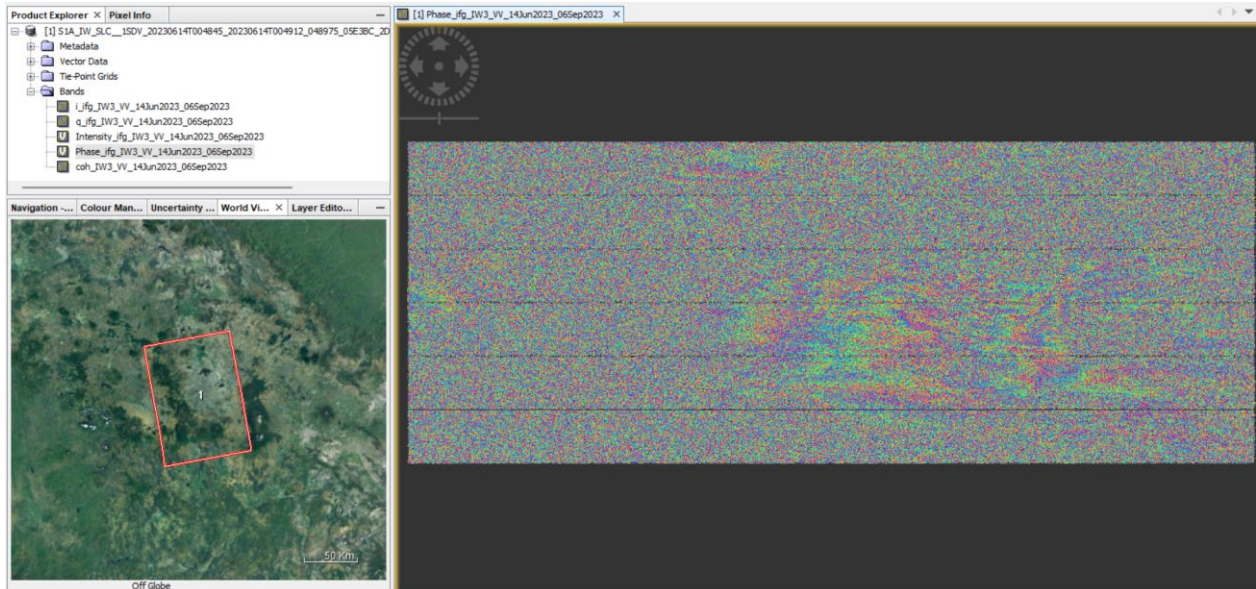
Obr. 6. Program SNAP – S-1 Back-Geocoding – nastavené parametre pre spracovanie

Enhanced Spectral Diversity

Nasledovalo využitie metódy Enhanced Spectral Diversity (ESD), ktorá využíva údaje z prekryvajúcich sa oblastí susedných zhukov a vykonáva korekcie rozsahu a azimutu pre každý zhuk. Nastavenia boli ponechané na predvolené hodnoty.

Tvorba interferogramu

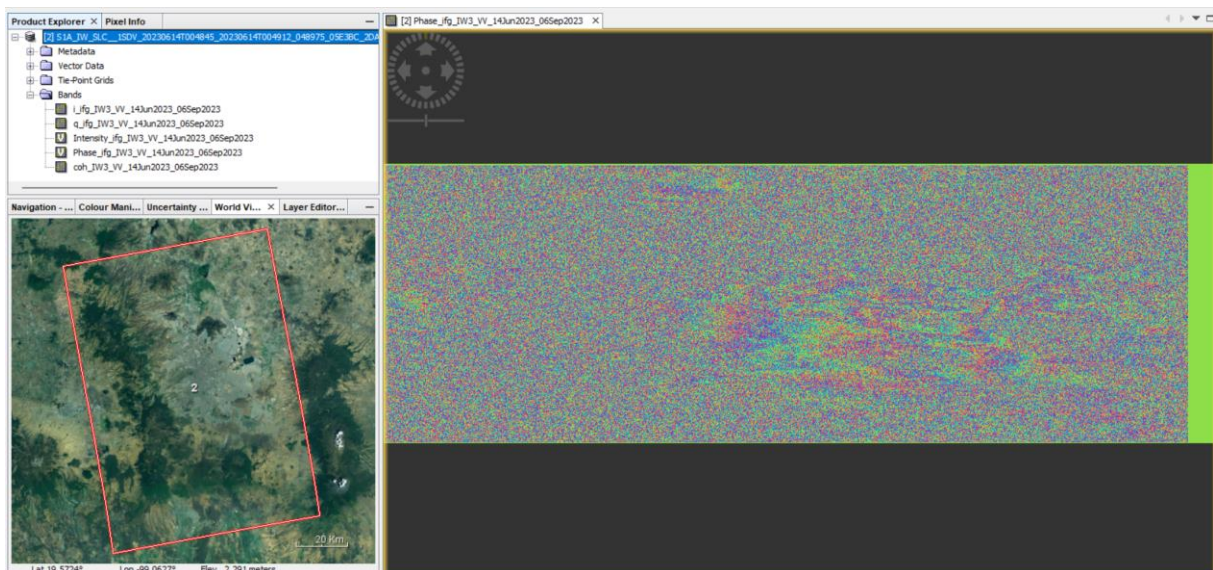
Prvotný interferogram bol vytváraný pomocou interferometrického páru (hlavný a podriadený), pričom je zahrnutý odhad koherencie obrazu zo zásobníka spoločne registrovaných komplexných obrazov. Boli nastavené parametre pre spracovanie: Coherence Range Window Size: 20 a Coherence Azimuth Window Size: 5 (obr. 7).



Obr. 7. Program SNAP – prvotný interferogram

Debursting

Ďalší krok interferometrického spracovania zahŕňa tzv. debursting alebo zlúčenie zhlukov – kde zaostrené komplexné zhukové snímky sa zostavujú v azimut-časovej sekvencii, aby vytvorili jednotný podriadkový obraz s okrajmi, ktoré ich oddeľujú. Medzi susednými zhlukmi a podriadkami je dostatočné prekrytie, aby sa zaistilo kontinuálne pokrytie (obr. 8).

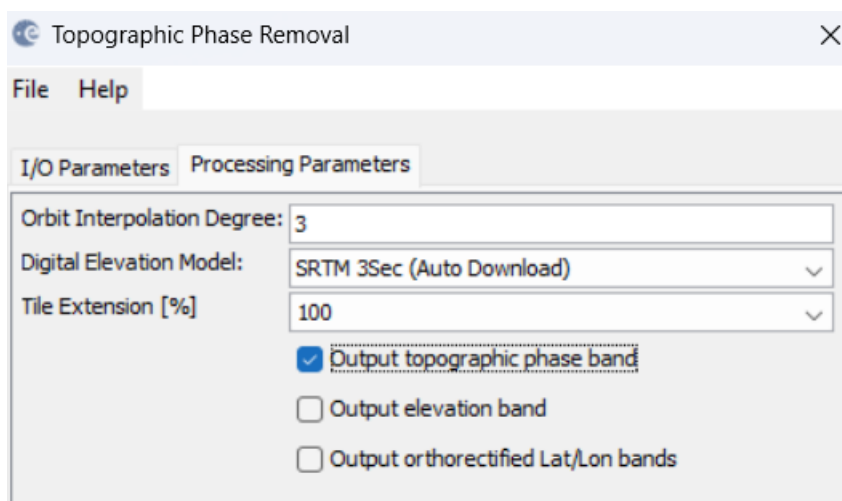


Obr. 8. Program SNAP – Debursting

Ako je možné vidieť na obrázku č. 8, pri tomto kroku môže nastať, že vniknú na okrajoch snímky prázdne pixely (zelené okraje na snímke) a je nutné ich odstrániť, aby nedošlo k skresleniu výsledkov. Snímku môžeme orezať pomocou funkcie Subset.

Topographic Phase Removal

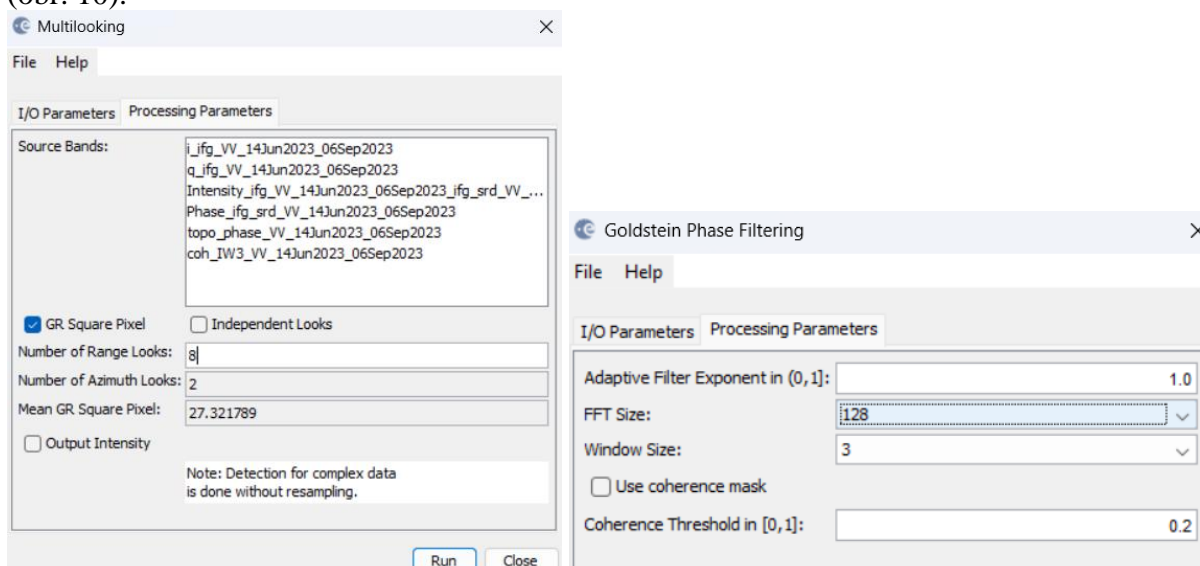
V ďalšej fáze vyextrahujeme topografickú fázu pomocou Digitálneho modelu reliéfu (DEM) (obr. 9).



Obr. 9. Program SNAP – Topographic Phase Removal

Multilooking a filtrácia

V ďalšej fáze sme pomocou dvoch metód minimalizovali šum v interferograme: využité boli Multi-looking a Goldstein Phase filtrovanie. Prvý zmieneny Multi-looking zahŕňa spriemerovanie niekoľkých pixelov v každom smere. To vedie k väčším pixelom a má potenciál výrazne znížiť šum. Rozsah požadovaného viacnásobného priemerovania závisí od požadovaného priestorového rozlíšenia a rozmiestnenia pixelov. V parametroch bol nastavený parameter „Number of Range Look“ na hodnotu 8. Následne sme využili filtrovanie pomocou nástroja Goldstein Phase Filtering, kde sme pri „FFT Size“ zvolili hodnotu 128 a spustili filtrovanie (obr. 10).

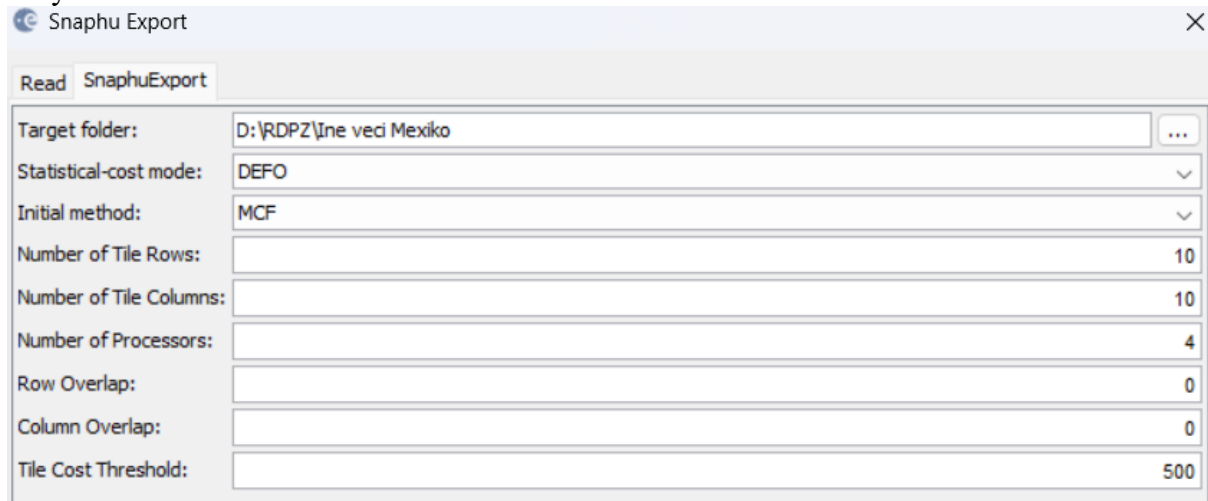


Obr. 10. Program SNAP – Multilooking a Goldstein phase filtering

Rozbalenie fázy pomocou Snapu

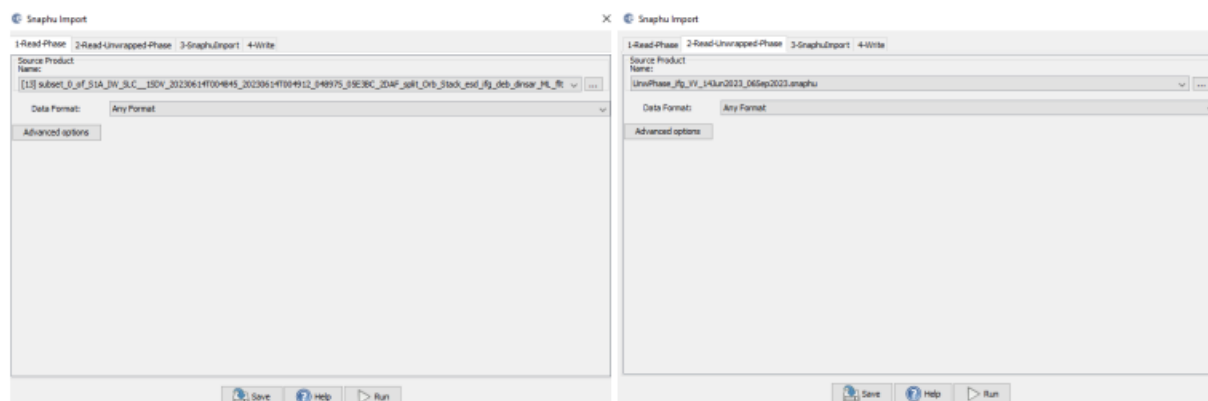
Náš interferogram bol dostatočne vyhladený, avšak pre interpretáciu výsledkov je ho nutné ešte „rozbaľiť“ teda využiť tzv. unwrapping pomocou doplnkovej aplikácie Snapu, ktorá je

doplnkom programu SNAP. Túto aplikáciu si môžeme stiahnuť na tomto linku: <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/snapphu/>. Aplikácia funguje na báze príkazového riadku, teda nie je plne integrovaná do programu SNAP. Súbor zo SNAP musíme exportovať, pričom využijeme prednastavené parametre systémom, ako je uvedené na obrázku č. 11. Odporúča sa vytvoriť si nový priečinok, kde si uložíme exportovaný produkt (fázu) určený na rozbalenie.



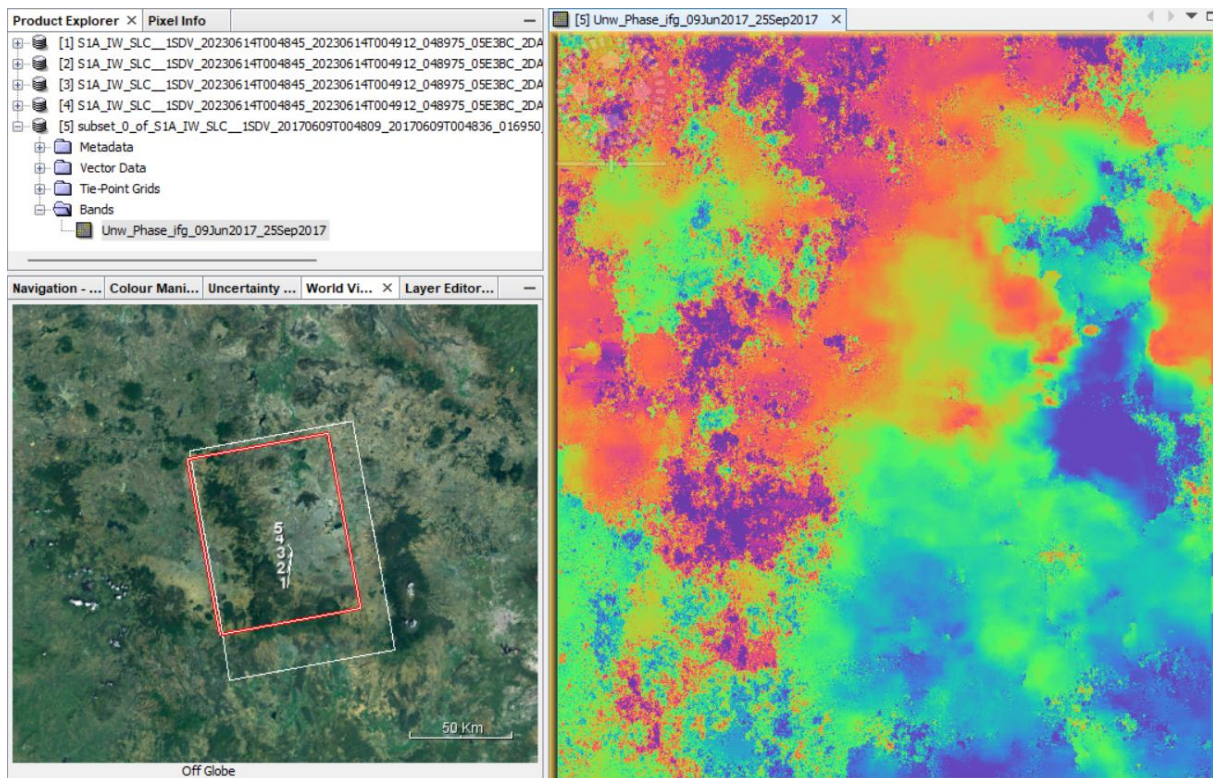
Obr. 11. Program SNAP – Snapphu Export

Potom, ako Snapphu spracoval, t.j. rozbalil danú fázu, môžeme si ju importovať znovu do softvéru SNAP cez možnosť Snapphu import. Tu následne zvolíme: 1 - Read Phase – zvolenie ešte nerozbalenej fázy (produkt pred exportom), 2 – Read unwrapped Phase – zvolenie už rozbalenej fázy (exportovanej zo softvéru Snapphu), 3- Snapphu Export – zaškrtnutie možnosti „Do NOT save Wrapped ...“ a 4 – zvolenie úložiska, a počkáme na spracovanie importu, t.j. načítanie rozbalenej fázy (obr. 12).



Obr. 12. Program SNAP – Snapphu Import

Výsledok importu – rozbalenú fázu je možné vidieť na obrázku 13.

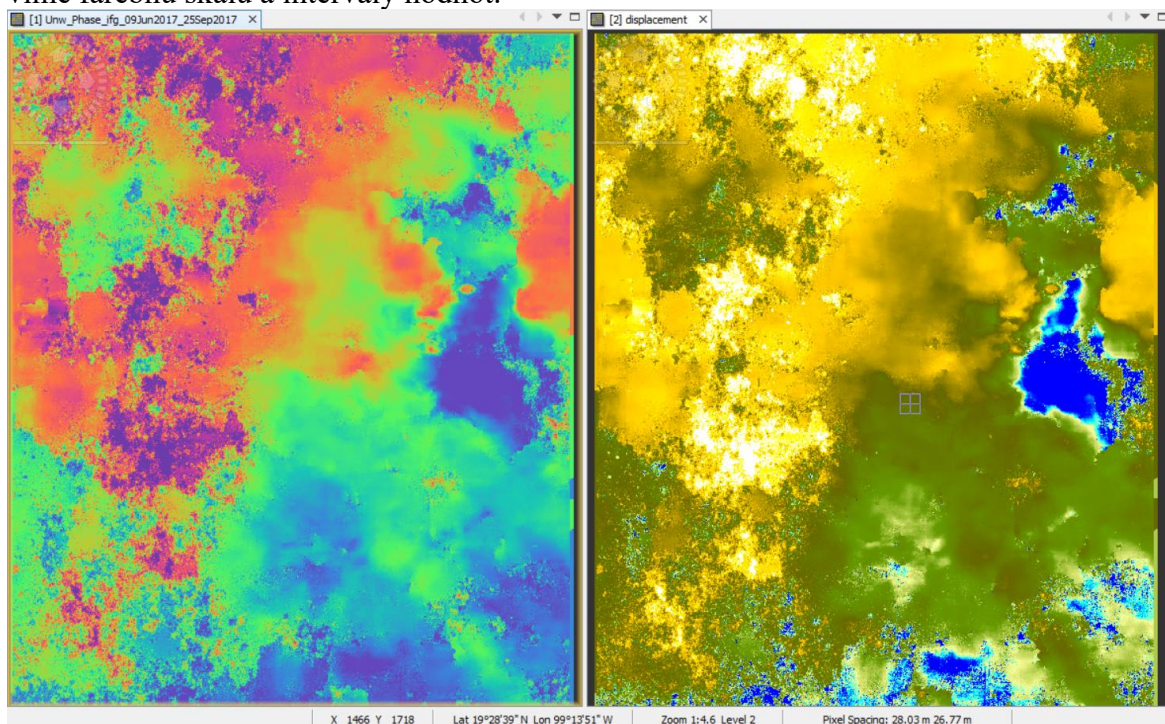


Obr. 13. Program SNAP – Snaphu Import výsledok

4.2 Konverzia rozbalenej fázy na posuny/nerovnosti v území („displacements“) a export do Google Earth Pro

Túto rozbalenú fázu zo Snaphu môžeme skonvertovať na „displacements“. To je možné cez nástroj Phase to Displacement, kde sme nastavili vytvorenie a uloženie tohto nového produktu.

Na obr. 14 je možné vidieť skonvertovanú rozbalenú fázu na posuv povrchu (nerovnosti) pre územie Mexico city. Pre lepšiu analýzu poklesov a zdvihov územia následne pre výsledok upravíme farebnú škálu a intervaly hodnôt.



Obr. 14. Program SNAP – Rozbalená fáza (vľavo) vs. nerovnosti povrchu (displacements) (vpravo).

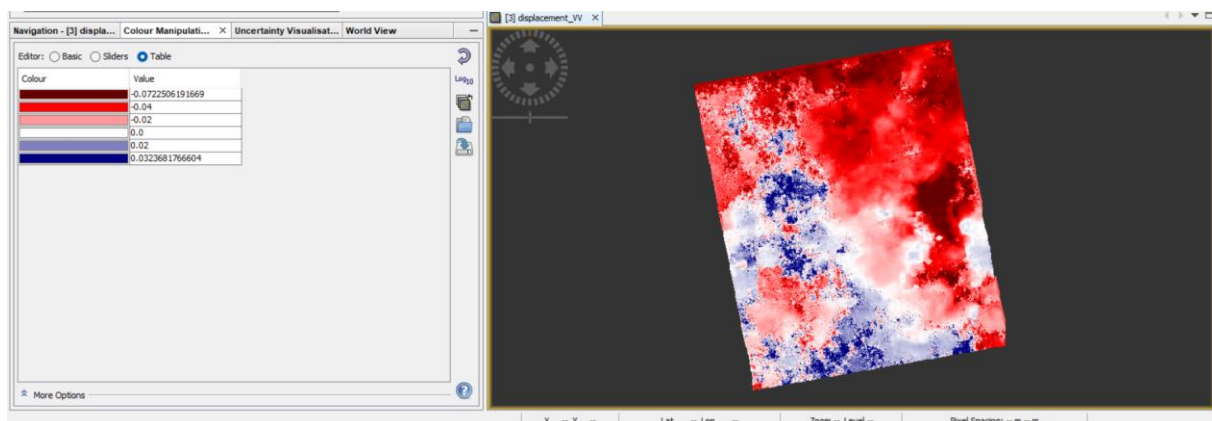
Terrain Correction

Predposledný krok zahŕňa terénnu korekciu. Tieto korekcie majú za cieľ zmierniť skreslenie snímok SAR spôsobené topografickými odchýlkami v scéne a náklon satelitného snímača – snažíme sa zabezpečiť, aby geometrická reprezentácia obrazu zodpovedala skutočnému obrazu krajiny. Využili sme metódu Range-Doppler Terrain Correction s využitím bikubickej interpolácie a 5-bodovej interpolácie pre resampling. Pre pixel spacing (m) bola nastavená hodnota 100 (obr. 15)

Digital Elevation Model:	SRTM 3Sec (Auto Download)
DEM Resampling Method:	BICUBIC_INTERPOLATION
Image Resampling Method:	BISINC_5_POINT_INTERPOLATION
Source GR Pixel Spacings (az x rg):	27.9384(m) x 26.924310045471017(m)
Pixel Spacing (m):	100
Pixel Spacing (deg):	2.509749173384484E-4
Map Projection:	WGS84(DD)
<input checked="" type="checkbox"/> Mask out areas without elevation <input type="checkbox"/> Output complex data	
Output bands for:	
<input checked="" type="checkbox"/> Selected source band <input type="checkbox"/> DEM <input type="checkbox"/> Latitude & Longitude	
<input type="checkbox"/> Incidence angle from ellipsoid <input type="checkbox"/> Local incidence angle <input type="checkbox"/> Projected local incidence angle	
<input type="checkbox"/> Layover Shadow Mask	
<input type="checkbox"/> Apply radiometric normalization	
<input type="checkbox"/> Save Sigma0 band	Use projected local incidence angle from DEM
<input type="checkbox"/> Save Gamma0 band	Use projected local incidence angle from DEM
<input type="checkbox"/> Save Beta0 band	
Auxiliary File (ASAR only):	Latest Auxiliary File

Obr. 15. Program SNAP – Range-Doppler Terrain Correction

Výsledok je už následne terénne korigovaný a môžeme si prispôbiť jeho farebnú škálu a intervaly hodnôt, kde záporné hodnoty, znázornené odtieňmi červenej, označujú poklesy územia a naopak, kladné hodnoty v odtieňoch modrej, územia výzdvihu.



Obr. 16. Program SNAP – výsledný produkt interferometrického procesu – poklesy a výzdvihy v záujmovom území mesta Mexico city.

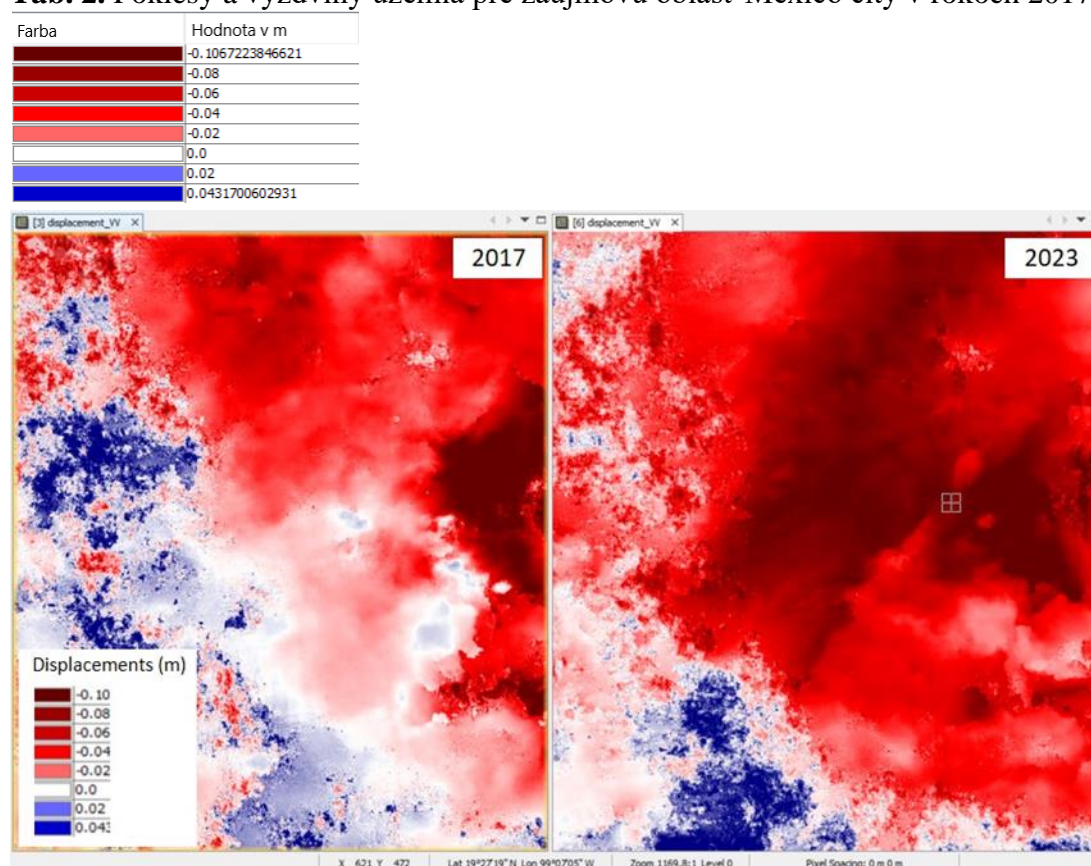
Následne boli takto porovnané výsledné produkty „displacements“ pre roky 2017 a 2023. Pre lepšiu vizualizáciu boli snímky exportované v súradnicovom systéme WGS 84 vo formáte .kmz a importované do programu Google Earth Pro.

5. Výsledky

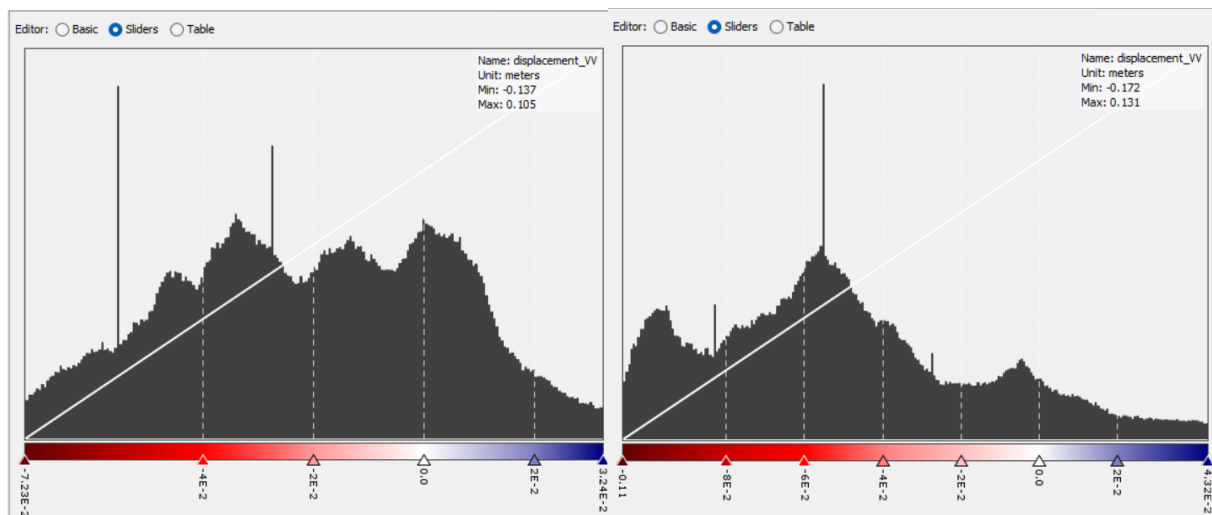
5.1 Pokles na území Mexico city v rokoch 2017 a 2023

Na nasledujúcom obrázku môžeme vidieť výsledné miery poklesávania povrchu pre záujmovú oblasť územia mesta Mexico city v rokoch 2017 (vľavo) a 2023 (vpravo). V nasledujúcej tabuľke 2 môžeme vidieť intervaly hodnôt, kde bordovou farbou je znázornený pokles územia, kde maximálna hodnota poklesu dosiahla -0.107 m, zatiaľ čo na niektorých častiach územia, je naopak, možné sledovať aj výzdvih – znázornený kategóriami v odtieňoch modrej farby, ktoré naznačujú, že na určitých miestach došlo aj k výzdvihnutiu, až o 0.043 m. Taktiež na obrázkoch si môžeme všimnúť, že kým pokles v roku 2017 sa týkal najmä východnej časti mesta, v roku 2023 výrazný pokles územia nastal aj v centrálnej časti.

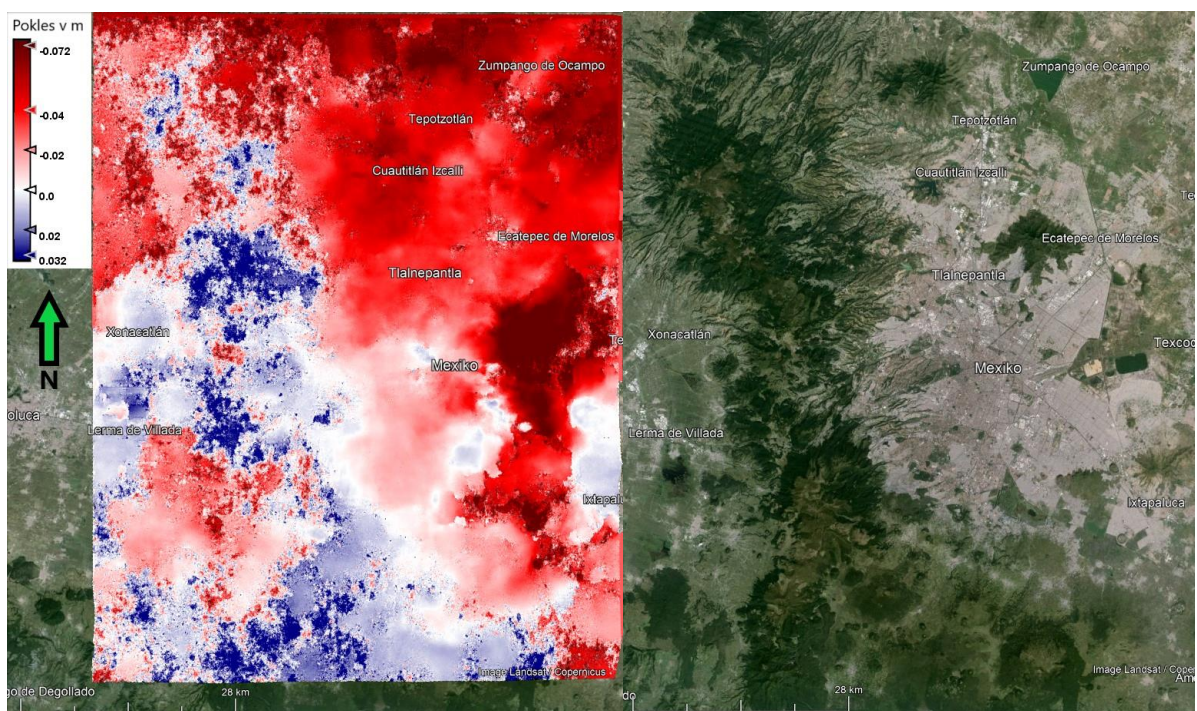
Tab. 2. Poklesy a výzdvihy územia pre záujmovú oblasť Mexico city v rokoch 2017 a 2023.



Obr. 17. Porovnanie výsledkov pre pokles/výzdvih územia pre roky 2017 a 2023



Obr. 18. Porovnanie výsledkov medzi rokmi 2017 a 2023 pomocou grafov v programe SNAP



Obr. 19. Porovnanie výsledku poklesu zeme za roku 2017 oproti reálnej mape (Zdroj: Google Earth Pro)

Na obrázku č. 19 sme vizualizovali exportovanú vrstvu vo formáte KMZ v Google Earth. Pre účely porovnania sme vedľa nej zobrazili aj obrázok samotného mesta. Na základe analýzy výsledkov z roku 2017 sme identifikovali miesta s najvýraznejším poklesom zemského povrchu.

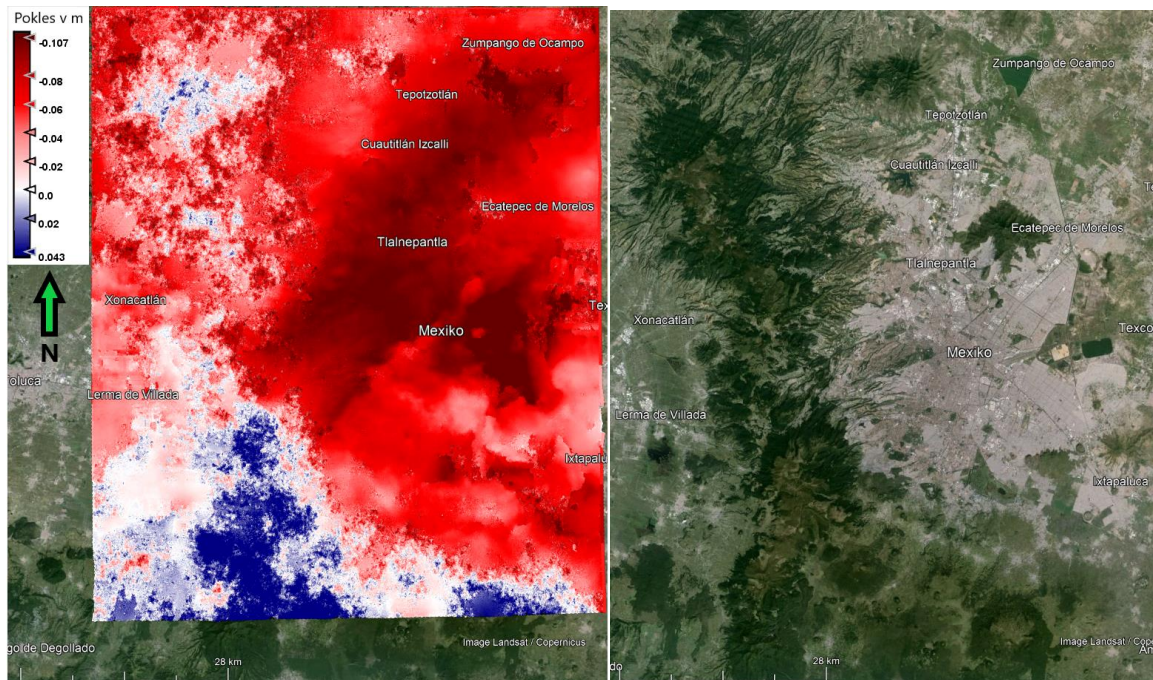
Na východnej strane mesta sme zaznamenali najvýraznejší pokles zeme. Hodnota poklesu dosiahla približne 0,07 metra, pričom maximálny nameraný pokles bol 0,072 metra. Tento pokles bol výrazný najmä v okolí prilahlých budov. Analyzovali sme údaje z obdobia od júna do septembra, čo potvrdzuje, že ide o citelný pokles.

Oblasti s najvýraznejším poklesom zemského povrchu sa nachádzajú prevažne v obytných

štvrťiach v okolí medzinárodného letiska Mexica City. Severná časť mesta a centrum tiež zaznamenali pokles, hoci v menšej miere (približne 0,02 metra).

Zaujímavým zistením je nadsdvih zeme na západnej strane mesta, konkrétne v príľahlých lesoch. Priemerne sa zem povýšila o 0,03 metra.

Tieto výsledky budeme podrobnejšie analyzovať na jednotlivých miestach nižšie.



Obr. 20. Porovnanie výsledku poklesu zeme za rok 2023 v porovnaní s terénom v reálnom svete (Zdroj: Google Earth Pro)

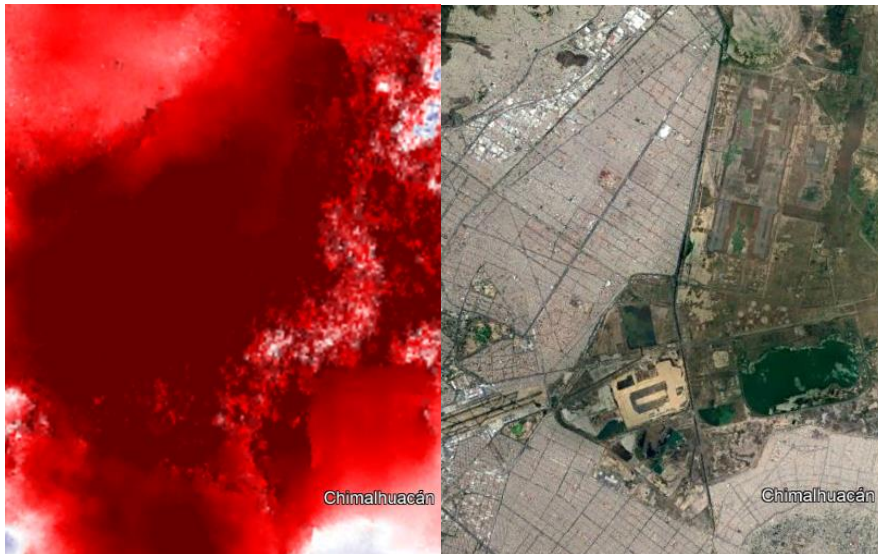
Na obrázku č. 20 je zaznamenaný významný pokles terénu, ktorý dosahuje maximálne hodnoty 0,107 metra v porovnaní s predchádzajúcimi dvoma rokmi. Tento pokles je považovaný za signifikantný a je zaujímavé, že sa rozšíril až do centrálnych oblastí mesta. V predchádzajúcom obrázku sme pozorovali eleváciu terénu, avšak aktuálne dáta ukazujú, že s výnimkou niekoľkých lokálnych miest došlo k jeho prepadnutiu. Na druhej strane, južná časť snímky vykazuje zvýšenie o približne 0,04 metra, čo môže byť ovplyvnené existenciou susedného národného parku.

Spoločným znakom oboch snímok je najvýraznejší pokles terénu v okolí medzinárodného letiska a v mestskom centre. Podľa údajov z Google Street View sa väčšina poklesu odohráva v rezidenčných štvrtiach, v oblastiach s nízkopodlažnými obchodnými zónami a v blízkosti monumentu revolúcie. Naopak, elevácia terénu sa vyskytuje na juhu mesta, v lesných oblastiach Národného parku Parque Nacional Cumbres del Ajusco, kde sa nachádzajú menšie vulkány.

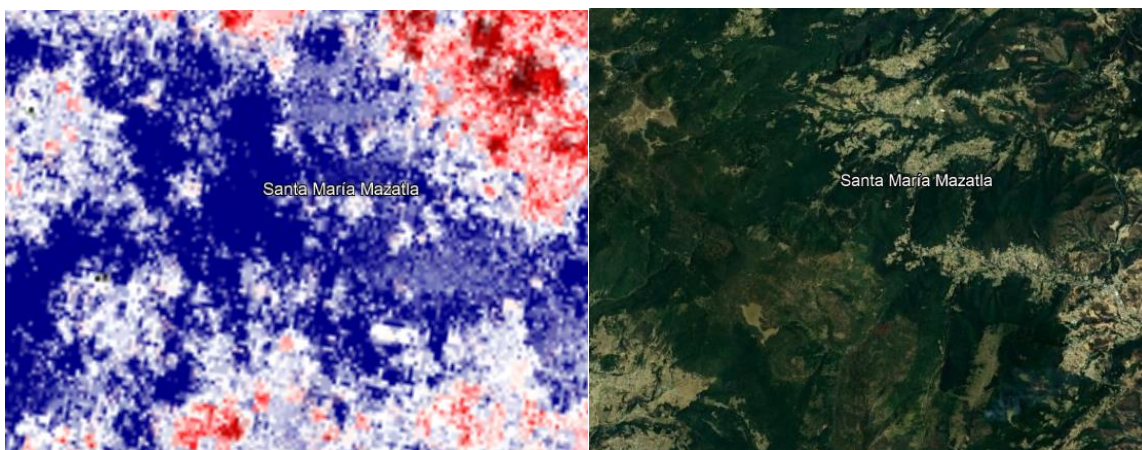
Príčiny poklesu terénu sú podľa Fattala (2024) spojené s geologickou štruktúrou Mexico City, ktoré je situované v horskej kotline nad vrstvou mäkkých jazerných sedimentov rôznej hrúbky. Pokles v oblasti medzinárodného letiska je primárne zapríčinený nadmerným odčerpávaním podzemnej vody, čo spolu s prítomnosťou mäkkých ílov a sedimentov vedie k kompresii pôdy a jej subsidenčným procesom. Pradhan (2021) uvádza, že približne 70% vody spotrebovanej v Mexico City pochádza z podzemných zdrojov. Poukazuje tiež na zastaranú infraštruktúru pre čerpanie vody a na problémy súvisiace s narastajúcimi suchami a preľudnením mesta.

5.2 Bližší pohľad na vybrané lokality výskumu

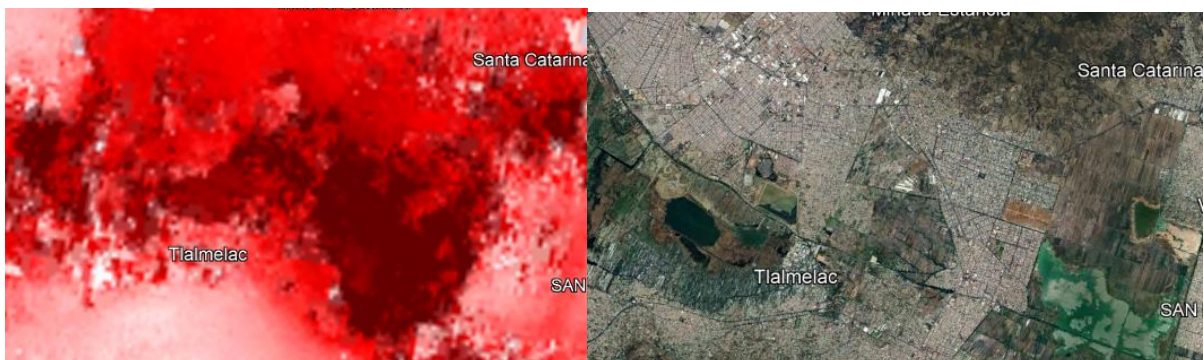
1.



2.



3.



Obr. 21. Výber troch území s poklesom/nadzdvihom v roku 2017 so satelitnými snímkami (Zdroj: Google Earth Pro)

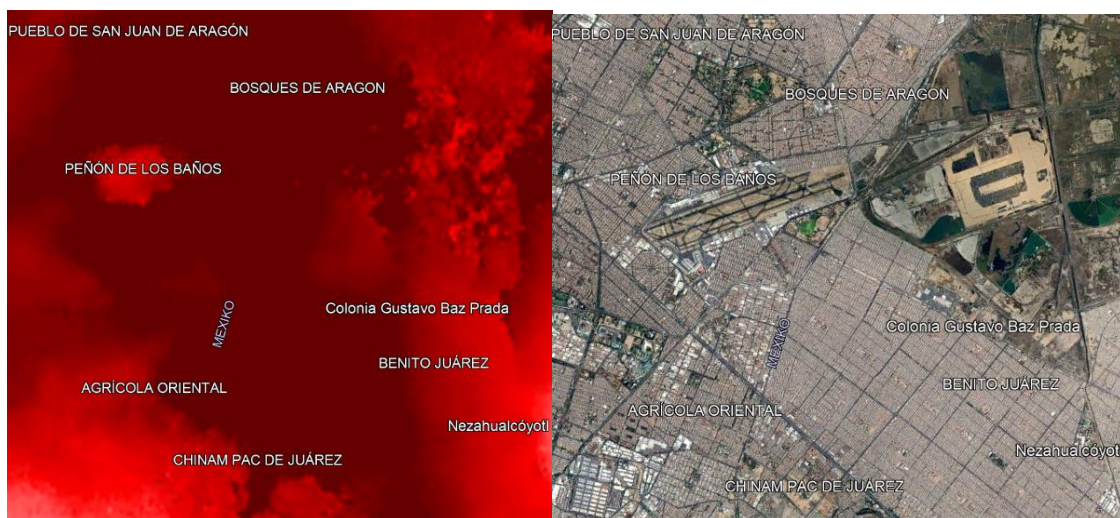
V analýze snímok z obrázku č.19 sme sa zamerali na tri špecifické oblasti. Prvá oblasť, nachádzajúca sa v blízkosti Chimalhuacanu, je obytnou štvrtí obývanou prevažne obyvateľmi nižších sociálnych vrstiev. V roku 2017 boli v tejto lokalite zaznamenané najväčšie poklesy terénu. Zaujímavosťou je, že táto štvrť leží v tesnej blízkosti rozvíjajúceho sa parku, ktorý by podľa

časopisu Smithsonian Magazine (2020) mal prispieť k obnove vodného systému a predchádzaniu ďalšiemu poklesu terénu.

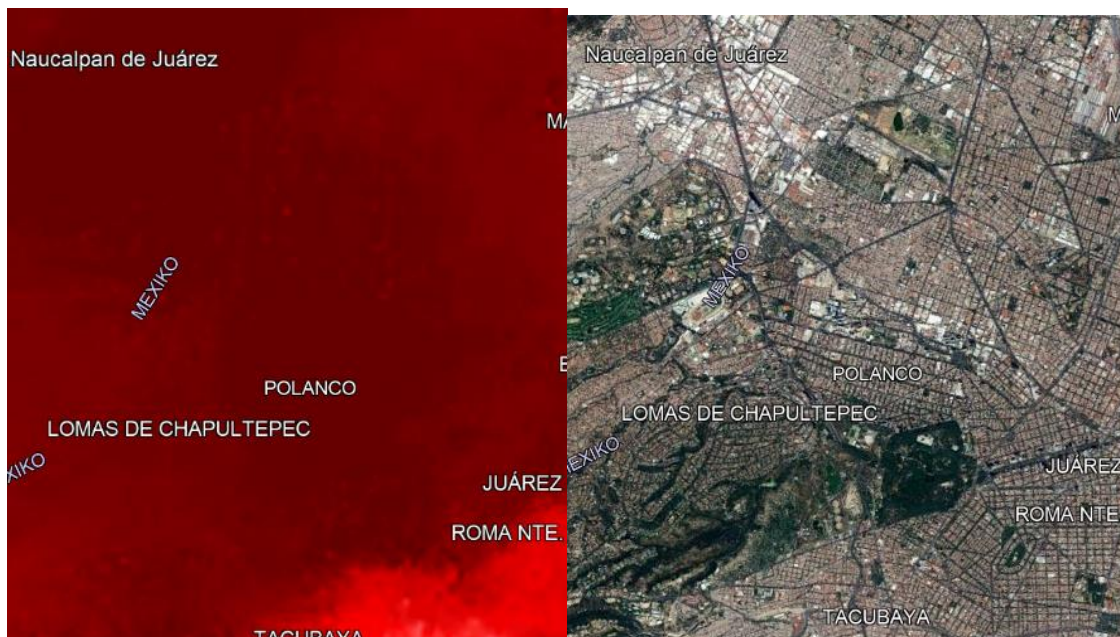
Druhá analyzovaná oblasť sa nachádza v okolí dediny Santa Maria Mazatla a je charakteristická hornatým a lesnatým terénom. Existuje predpoklad, že zaznamenaný vyzdvih terénu môže byť chybou merania, keďže v okolitých oblastiach došlo k poklesu, čo mohlo ovplyvniť senzor Sentinel-1 k interpretácii výsledkov ako vyzdvihu.

Tretia oblasť, Tlammelac, je využívaná pre poľnohospodárske účely, kde boli zaznamenané ďalšie významné poklesy terénu. Na základe dát z Google Earth sú v tejto oblasti identifikované polia a kanály určené na pestovanie plodín a kvetov. Intenzívne čerpanie podzemnej vody pre poľnohospodárske potreby môže byť jedným z faktorov prispievajúcich k poklesu terénu, avšak dostupné zdroje neposkytujú konkrétne informácie o aktuálnom stave tejto oblasti.

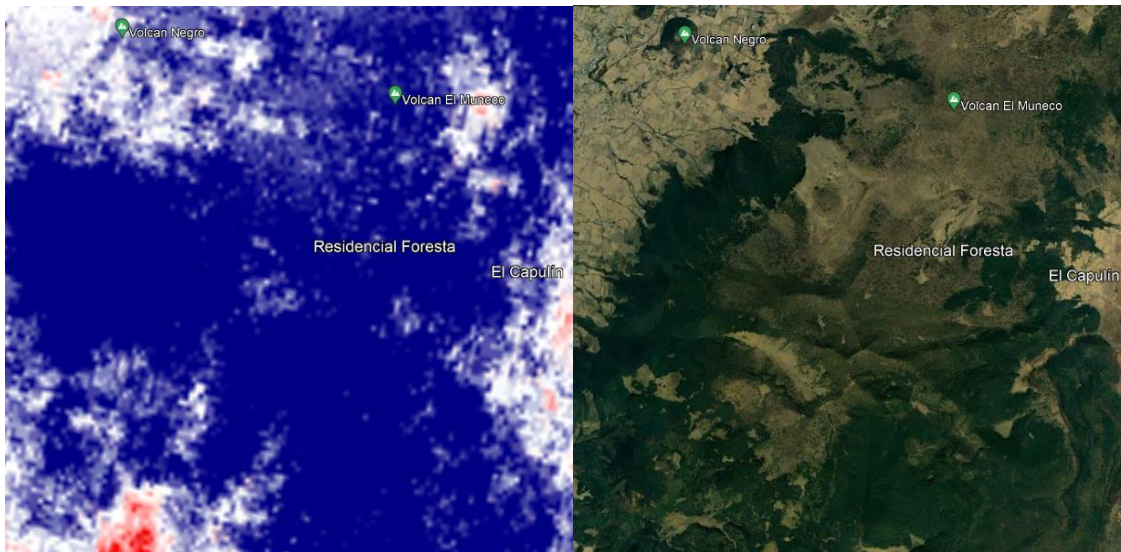
1.



2.



3.



Obr. 22. Výber území s poklesom/nad zdvihom v roku 2023 s realným pohľadom (Zdroj: Google Earth Pro)

V kontexte obrázka č. 20 sa venujeme vybraným územiám, kde prvá oblasť predstavuje obytné zóny, o ktorých sme diskutovali vyššie. Druhá oblasť je charakteristická vysokou zástavbou, vrátane obytných, obchodných a kancelárskych výškových budov. Podľa Dong Cui a kolegov (2015) môžu tieto výškové budovy prispievať k poklesu zeme v dôsledku ich hmotnosti a tlaku na podložie. Tretia oblasť, Národný park Parque Nacional Cumbres del Ajusco, vykazuje geologické procesy, ako sú tektonická aktivita a vulkanizmus, ktoré môžu byť príčinou pozorovaných zmien terénu. Napriek tomu, že podľa Peakvisitor (2024) posledná erupcia v tomto regióne sa udiala pred približne 1000 rokmi, geologická aktivita môže stále ovplyvňovať topografiu oblasti.

6. Záver

Naše výskumy v Mexico City za roky 2017 a 2023, realizované pomocou radarového diaľkového prieskumu zeme (RDPZ), ukázali, že mesto čelí vážnym problémom poklesu zeme. Tento jav je spôsobený kombináciou faktorov, vrátane histórie oblasti, kde kedysi existovalo jazero Texcoco, a zastaranej infraštruktúry čerpania vody.

Využitím programu SNAP od ESA sme boli schopní interpretovať dáta zo satelitu Sentinel-1 a zistili sme, že centrum mesta a jeho okolie poklesáva o 5 – 10 cm ročne. Tieto výsledky sú v súlade s mnohými odbornými článkami, ktoré tento problém pripisujú extrémnemu odčerpávaniu podzemnej vody a kompresii pôdy.

Napriek snahám o obnovenie časti jazera Texcoco, táto situácia môže trvať ďalšie roky, kým dôjde k stabilizácii. Naše výsledky naznačujú, že by bolo dôležité investovať do novej vodnej infraštruktúry alebo úplne zastaviť čerpanie podzemnej vody, hoci to môže byť náročné vzhľadom na klimatické podmienky a časté suchá.

Táto štúdia ukázala, že pomocou radaru môžeme zistiť približný pokles zeme v určitom období. Je však dôležité zdôrazniť, že tieto výsledky sú závislé od pozície satelitu v atmosfére teda že satelit Sentinel-1 musí prejsť rovnakou orbitou, inak výsledky môžu byť skreslené.

Pod'akovanie

Týmto sa chcem pod'akovať pánovi docentovi Gallayovy za odborné rady k RDPZ. Taktiež sa chcem pod'akovať pani doktorke Onáčillovej za odborné konzultácie a rady pri tvorbe tohto príspevku.

Literatúra

Cigna, F. and Tapete, D. 2021. 'Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR,' *Remote Sensing of Environment*, 253, p. 112161. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112161>.

Khorrami, M. et al. 2023. 'Groundwater volume loss in Mexico City constrained by INSAR and GRACE observations and mechanical models,' *Geophysical Research Letters*, 50(5). Dostupné na: <https://doi.org/10.1029/2022gl101962>.

Chaussard, E. et al. 2021. 'Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery,' *Journal of Geophysical Research. Solid Earth (Print)*, 126(4). Dostupné na: <https://doi.org/10.1029/2020jb020648>.

Poreh, D., Pirasteh, S. and Cabral-Cano, E. 2021. 'Assessing subsidence of Mexico City from InSAR and LandSat ETM+ with CGPS and SVM,' *Geoenvironmental Disasters*, 8(1). Dostupné na: <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00179-x>.

Pradhan, A. 2021. 'Mexico Water Problems and 7 Helpful Solutions - Earth and Human,' Dostupné na : <https://earthandhuman.org/mexico-water-problems/>.

Fattal, A. B. 2024. 'Study identifies areas in Mexico City Metro affected by land subsidence' *Tech Explore*, Dostupné na: <https://techxplore.com/news/2024-03-areas-mexico-city-metro-affected.pdf>

Cui, Z.-D., Yang, J. and Li, Y. (2015) 'Land subsidence caused by the interaction of high-rise buildings in soft soil areas,' *Natural Hazards*, 79(2), pp. 1199–1217. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1902-8>.

Ensia, P.B. (2020) 'Mexico City Is Proposing to Build One of the World's Largest Urban Parks,' *Smithsonian Magazine*. Dostupné na: <https://www.smithsonianmag.com/travel/mexico-city-proposing-build-one-worlds-largest-urban-parks-180974179/>.

Sentinel Online. 2024. Sentinel-1 - Missions. Dostupné na: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.

Esa, WorldCover. 2024. About WorldCover. Dostupné na: <https://esa-worldcover.org/en>.