

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:  
CONSORZIO:



SOCI:



PROGETTAZIONE:  
MANDATARIA:



MANDANTI:



## PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE

### ITINERARIO NAPOLI - BARI RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA

GEOLOGIA

ANALISI E MONITORAGGIO CON INTERFEROMETRIA SAR SATELLITARE

AMBITO DEPOSITI DI FRANA GALLERIA GROTTAMINARDA

Variante 21 – opere di mitigazione movimenti franosi tra la PK 4+695 e PK 5+090 – Relazione tecnico illustrativa

APPALTATORE	DIRETTORE della PROGETTAZIONE	VALIDO PER COSTRUZIONE - IL DL	PROGETTISTA
Consorzio HIRPINIA AV Il Direttore Tecnico Ing. Vincenzo Moriello 11/03/2022	Il Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche Ing. G. Cassani 11/03/2022	Il Direttore dei Lavori Ing. Massimiliano Pempori 11/03/2022	 Dott. Geol. F. Pennino

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV. SCALA:

IF28	01	V	ZZ	RH	GE0605	003	B	-
------	----	---	----	----	--------	-----	---	---

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per consegna	ROCKSOIL	26/11/2021	A. Zimbaldi	26/11/2021	M. Gatti	26/11/2021	Ing. G. Cassani    11/03/2022
B	Revisione per istruttoria	ROCKSOIL	11/03/2022	A. Zimbaldi	11/03/2022	M. Gatti	11/03/2022	

File: IF2801VZZRHGE0605003B

n. Elab.: -

<b>APPALTATORE:</b> <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> <b>HIRPINIA AV</b> <b>WE BUILD S.P.A.</b> <b>ASTALDI S.P.A</b>	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b>  <b>RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA</b> <b>I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA</b>																	
<b>PROGETTAZIONE:</b> <u>Mandataria</u> <u>Mandanti</u> <b>ROCKSOIL S.P.A</b> <b>NET ENGINEERING S.P.A.</b> <b>ALPINA S.P.A.</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">IF28</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">V ZZ RH</td> <td style="text-align: center;">GE0605 003</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">2 di 3</td> </tr> </tbody> </table>						COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF28	01	V ZZ RH	GE0605 003	B	2 di 3
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO													
IF28	01	V ZZ RH	GE0605 003	B	2 di 3													
<b>PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE</b> Variante 21 – opere di <b>mitigazione movimenti franosi tra la PK 4+695 e PK 5+090 – Relazione tecnico illustrativa</b>																		

## Indice

<b>1</b>	<b>DESCRIZIONE DEI CONTENUTI .....</b>	<b>3</b>
----------	--	----------

<b>APPALTATORE:</b> <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> <b>HIRPINIA AV</b> <b>WE BUILD S.P.A.</b> <b>ASTALDI S.P.A</b>	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b>  <b>RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA</b> <b>I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA</b>					
<b>PROGETTAZIONE:</b> <u>Mandataria</u> <u>Mandanti</u> <b>ROCKSOIL S.P.A</b> <b>NET ENGINEERING S.P.A.</b> <b>ALPINA S.P.A.</b>						
<b>PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE</b> Variante 21 – opere di <b>mitigazione movimenti franosi tra la PK 4+695 e PK 5+090 – Relazione tecnico illustrativa</b>	COMMESSA <b>IF28</b>	LOTTO <b>01</b>	CODIFICA <b>V ZZ RH</b>	DOCUMENTO <b>GE0605 003</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>3 di 3</b>

## 1 DESCRIZIONE DEI CONTENUTI

Nell'ambito della stesura del Progetto Esecutivo di Variante (Variante 21 – opere di mitigazione movimenti franosi tra la PK 4+695 e PK 5+090) del raddoppio del 1° lotto funzionale Apice-Hirpinia della tratta Apice - Orsara (itinerario Napoli – Bari), la presente relazione contiene l'esito del monitoraggio con Interferometria SAR terrestre nell'ambito degli approfondimenti per l'area in frana in corrispondenza della Galleria Grottaminarda.

La documentazione è così distinta:

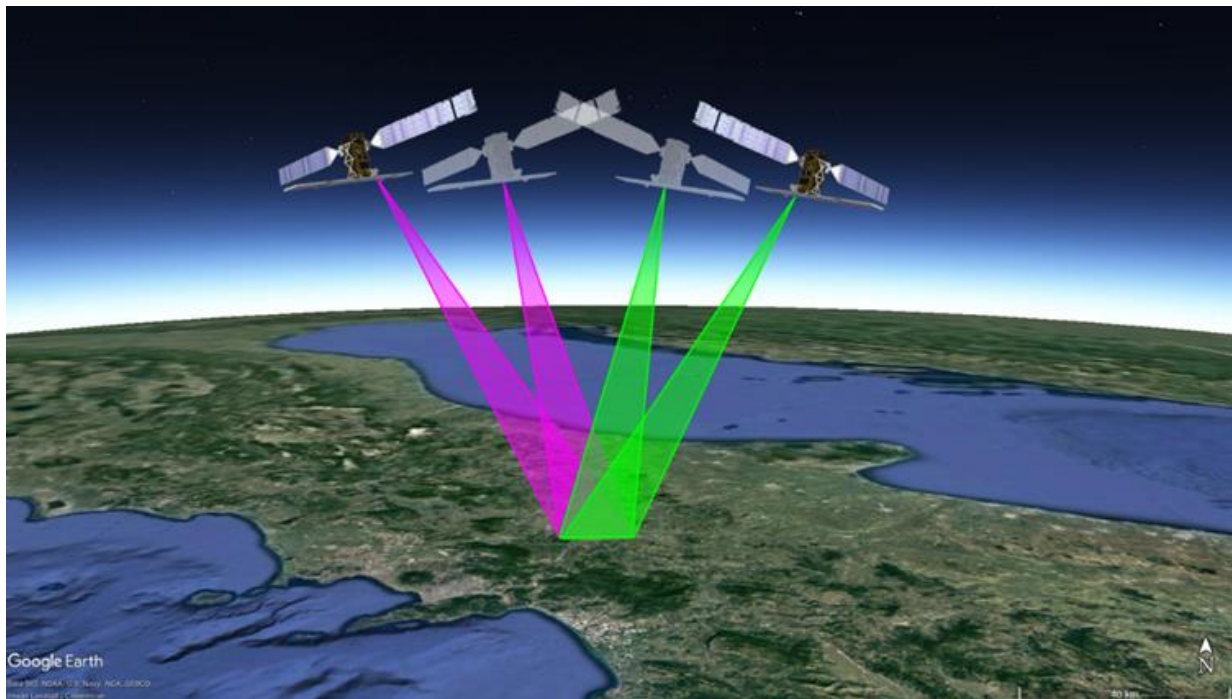
- Allegato 1 – Monitoraggio con Interferometria SAR Satellitare di un settore di 30ha – periodo di riferimento Aprile 2020 – Ottobre 2021.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

**Progettazione Esecutiva ed esecuzione in appalto dei lavori di realizzazione della linea ferroviaria Napoli-Bari, raddoppio tratta Apice- Orsara, 1° Lotto Funzionale Apice-Hirpinia tra le pk 0+310 e pk 18+713.205 (coincidente con il Km 88+916.50 della LS) comprensiva di armamento ferroviario, degli impianti di trazione elettrica, delle altre tecnologie ferroviarie, di un impianto di fermata e uno di stazione.**

Servizio relativo a indagini e monitoraggio da effettuarsi nell'ambito della progettazione esecutiva e l'esecuzione dei lavori della Linea AV Napoli-Bari (Tratta Apice - Orsara, 1 lotto funzionale Apice – Hirpinia)

**ATTO AGGIUNTIVO n.1**  
**Monitoraggio con Interferometria SAR Satellitare di un settore di 30ha**



**Data emissione: 24-11-2021**  
**N° Prot.: NZ2068-U\_241121**  
**Redatto da: Dott. N. Belcecchi**  
**Revisionato da: Dott. S. Scancella**  
**Rif.contratto: n. 6400026973, Atto aggiuntivo n.1**

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## INDICE

GLOSSARIO .....	3
1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ.....	5
2. ATTIVITÀ SVOLTE .....	7
2.1. Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base.....	7
2.2. Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare .....	11
2.3. Post-elaborazione e validazione dei risultati.....	12
2.4. Restituzione dei risultati A-DInSAR .....	12
3. RISULTATI OTTENUTI .....	13
4. CONCLUSIONI .....	21
BIBLIOGRAFIA .....	22
APPENDICE .....	23
<i>L'Interferometria SAR Satellitare .....</i>	<i>23</i>
<i>Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar).....</i>	<i>23</i>
<i>Le immagini SAR satellitari.....</i>	<i>24</i>
<i>La costellazione Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) .....</i>	<i>27</i>
<i>Principi di base dell'Interferometria SAR differenziale (DInSAR) .....</i>	<i>27</i>
<i>Analisi con metodologia Advanced DInSAR.....</i>	<i>30</i>

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## GLOSSARIO

### A-DInSAR

Acronimo di “*Advanced Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*”. Tipologia di tecniche di elaborazione di immagini SAR satellitari che si basano sull'utilizzo di *stack* (cfr. *Stack*) multitemporali.

### Geometria orbitale

I satelliti dotati di sensori SAR orbitano attorno alla Terra secondo orbite circa-parallele ai meridiani (quasi-polari). La contemporanea rotazione del pianeta attorno al suo asse, consente ai satelliti di osservare l'intera superficie terrestre. Il satellite, quindi, è in grado di sorvolare una medesima area sia durante l'orbita ascendente (da Sud verso Nord) che discendente (da Nord verso Sud). Poiché la linea di vista del sensore (LOS) è inclinata rispetto alla direzione nadirale, il satellite è in grado di osservare la medesima area da due punti di vista diversi durante l'acquisizione dei dati. La maggior parte dei satelliti utilizza una configurazione *right-looking* (osserva verso destra), perciò, in geometria ascendente le immagini sono acquisite con il fascio *radar* proveniente da Ovest, mentre in geometria discendente vengono acquisite con il sensore che osserva da Est.

### LOS

Linea di vista del satellite misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio a terra (sia esso naturale o artificiale).

### RADAR

Acronimo per “*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging”, ovvero individuazione e misurazione di distanze attraverso onde radio. Il termine identifica un sistema basato sull'utilizzo di onde elettromagnetiche per la rilevazione di un oggetto nello spazio e per la misura della loro distanza sfruttando il principio della dispersione verso un'antenna ricevente, della radiazione elettromagnetica inviata da un'antenna trasmittente. Il sistema si basa sulla misura del tempo necessario al segnale a percorrere il tragitto che separa il target dal sensore.

### SAR

Acronimo per “*S*ynthetic *A*pertura *R*adar”, ovvero “*R*adar ad apertura sintetica”, rappresenta una particolare tipologia di *radar* la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria

*ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha*

predefinita per mezzo di una piattaforma aerea (orbita di un satellite, direzione di volo di un aereo, etc.) o terrestre (vengono frequentemente utilizzati sistemi elettromeccanici con sensori *radar* che si muovono su binari di lunghezza di ordine metrico). Attraverso tale soluzione diventa possibile osservare la stessa area da più angoli di vista, "simulando" quindi, un'antenna di grandi dimensioni al fine di incrementare la risoluzione al suolo.

**Stack**

Dataset multitemporale di immagini SAR acquisite con le medesime caratteristiche (risoluzione, polarizzazione, geometria orbitale, angolo di incidenza, etc.) su una stessa area in un determinato intervallo di tempo. Rappresenta il dato di base per l'esecuzione di analisi A-DInSAR.



ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## 1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ

Nell'ambito del Contratto per Servizi in oggetto (Contratto n° 6400026973), NHAZCA S.r.l. è stata incaricata ad effettuare un monitoraggio InSAR satellitare mediante l'analisi delle immagini SAR acquisite dalla costellazione **Sentinel-1** dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), come atto aggiuntivo n.1 (Contratto n° 6400026973/01). Con riferimento a tale incarico, NHAZCA S.r.l. ha eseguito le attività di analisi dei dati con tecniche **A-DInSAR** (Advanced Differential SAR Interferometry), su un dataset in geometria orbitale ascendente e su un dataset in geometria orbitale discendente nel periodo compreso tra aprile 2020 e ottobre 2021. L'obiettivo dell'attività è di fornire informazioni sul comportamento deformativo dell'area di studio (di estensione circa 30ha, indicata dalla Committenza, Figura 1), degli ultimi 18 mesi, con il fine di seguire l'evoluzione temporale e spaziale dei processi già identificati nell'analisi storica e nei monitoraggi InSAR già svolti negli anni passati e trasmessi alla Committenza (rif. prot. NZ0720-U\_161219, NZ0801-U\_310120 e NZ0997-U\_220420).

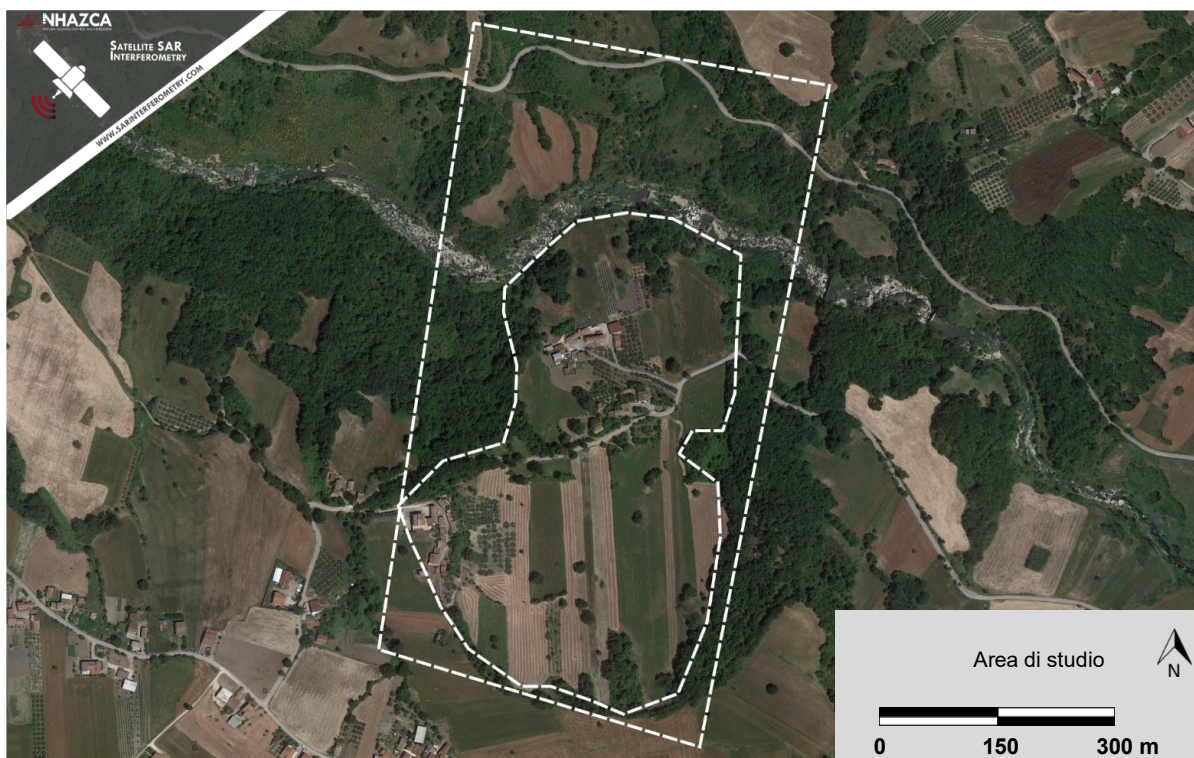


Figura 1: Identificazione dell'area di studio (poligoni bianchi) su immagini ottica satellitare.



*ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha*

Si riporta, di seguito, una descrizione delle attività svolte e dei risultati ottenuti.

La restituzione e la trasmissione dei risultati dell'analisi A-DInSAR è fornita anche mediante accesso al portale web **NHAZCA InSAR Visualization Tool** attraverso accessi con utenze riservate (<http://visualizationtool.sarinterferometry.com/>).

Per una adeguata comprensione della tecnica utilizzata si rimanda all'Appendice riportata nella parte finale del presente documento.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## 2. ATTIVITÀ SVOLTE

Vengono descritte di seguito le principali attività svolte per le analisi A-DInSAR con dati Sentinel-1 (per il periodo aprile 2020 – ottobre 2021). Più in dettaglio, si riportano di seguito le principali attività:

- selezione e acquisizione delle immagini SAR satellitari (par. 2.1);
- elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare (par.2.2);
- post-elaborazione e validazione dei risultati (par. 2.3);
- restituzione dei risultati (par. 2.4)

### 2.1. Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base

Gli stack di immagini acquisite dalla costellazione Sentinel-1 (ESA) in geometria orbitale ascendente e discendente utilizzati nell'analisi storica e negli aggiornamenti pregressi consistono in 526 immagini SAR acquisite fra il 20/10/2014 e il 09/04/2020. Tali immagini sono state integrate con un totale di **173 nuove immagini SAR**, acquisite dal 15/04/2020 al 13/10/2021 (da Figura 2 a Figura 5), analizzate per l'aggiornamento dei dati.

Si ricorda che l'osservazione in doppia geometria consente di ottimizzare la copertura dell'area di interesse e la stima degli spostamenti attraverso la misura degli stessi da punti di vista differenti, come mostrato in Figura 2.

Le immagini SAR impiegate nel presente studio (Figura 3) risultano così distribuite:

- **355 immagini** in formato Single Look Complex (SLC) acquisite in geometria orbitale ascendente, **dal 20 ottobre 2014 al 13 ottobre 2021** (Figura 4 e Figura 5); in particolare, l'aggiornamento dei precedenti servizi InSAR svolti riguarda il periodo **15 aprile 2020 – 13 ottobre 2021 mediante l'analisi di 84 nuove immagini**;
- **337 immagini** in formato Single Look Complex (SLC) acquisite in geometria orbitale discendente, **dal 26 ottobre 2014 al 7 ottobre 2021** (Figura 4 e Figura 5); in particolare, l'aggiornamento dei precedenti servizi InSAR riguarda il periodo **15 aprile 2020 – 7 ottobre 2021 mediante l'analisi di 89 nuove immagini**.

Un dato ausiliario utile all'esecuzione delle analisi interferometriche è rappresentato dal modello digitale di elevazione del terreno (*Digital Elevation Model - DEM*) che fornisce le informazioni di base relative alle quote dell'area di indagine e consente la geocodifica dei risultati. Per il presente lavoro, è stato utilizzato il DEM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con 30 m di risoluzione spaziale.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR Satellitare di un settore di 30ha

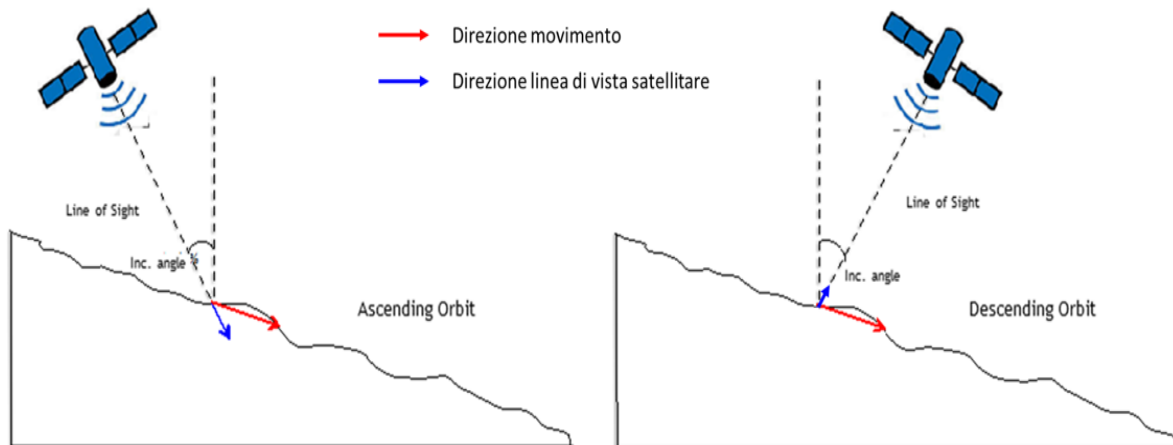


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'interazione tra la linea di vista satellitare (LOS) e la topografia locale per un versante con esposizione a Est. In rosso il movimento reale, in blu lo stesso proiettato lungo la LOS satellitare in funzione della geometria orbitale ascendente (sinistra) e discendente (destra).

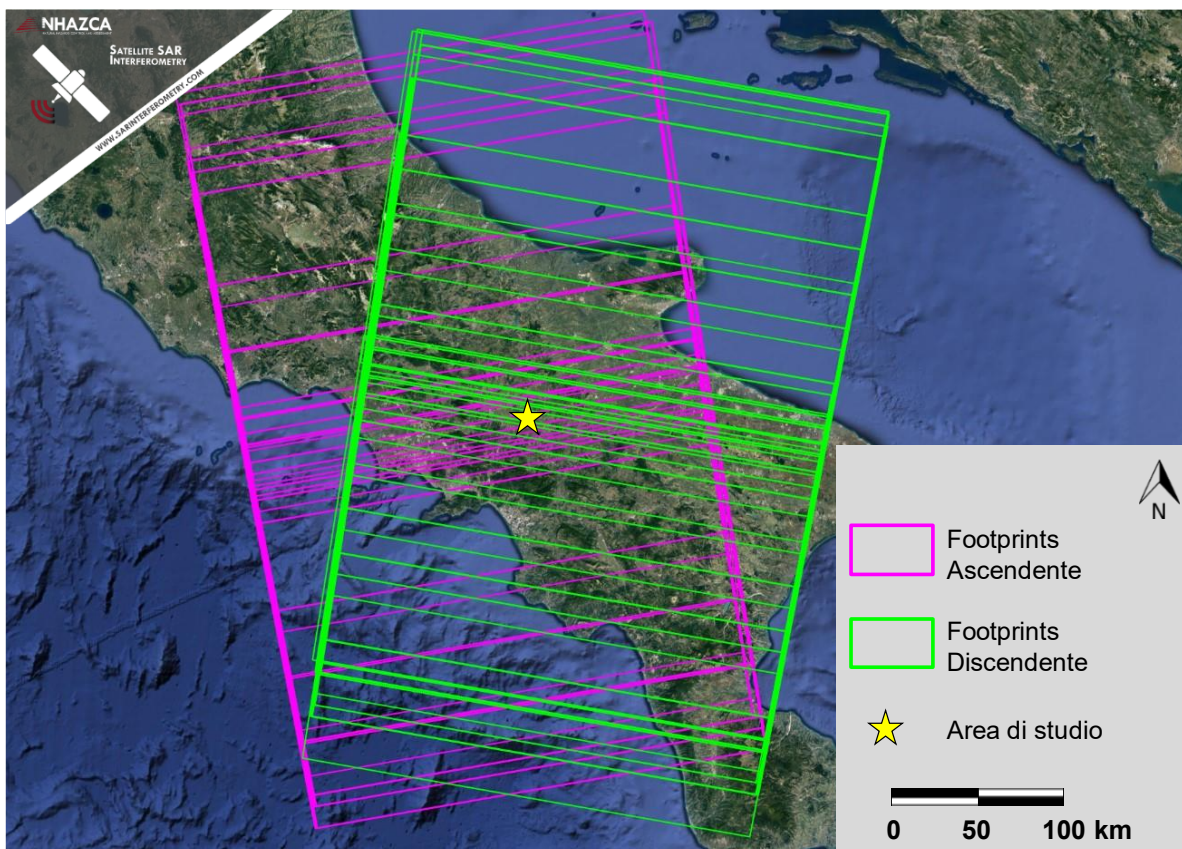


Figura 3: Footprint delle immagini SAR Sentinel-1 utilizzate per l'analisi A-DInSAR preliminare; nella stella si evidenzia l'ubicazione del sito oggetto di studio.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

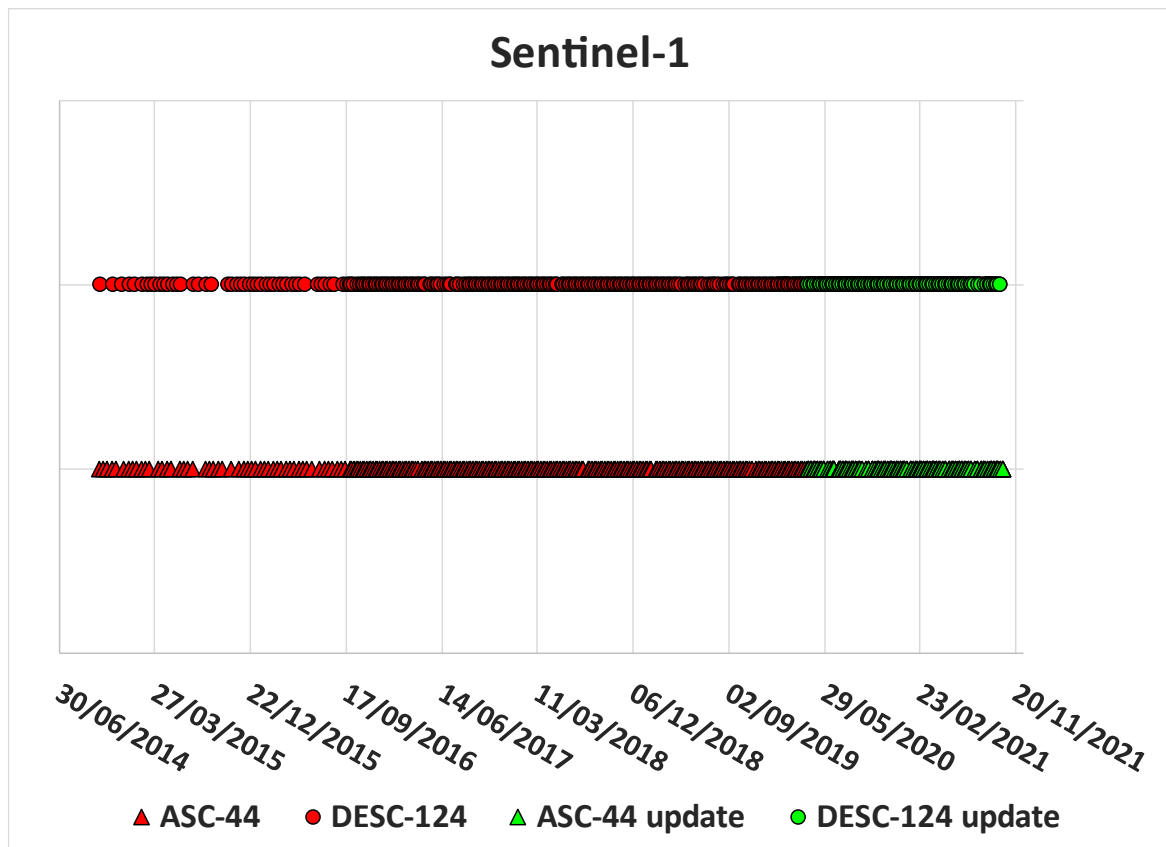


Figura 4: Distribuzione temporale delle immagini SAR satellitari acquisite dalla costellazione Sentinel-1 ed utilizzate per l'analisi A-DInSAR preliminare. In rosso, le immagini utilizzate nei precedenti servizi InSAR già trasmessi alla Committenza, in verde le immagini oggetto del monitoraggio degli ultimi 18 mesi (aprile 2020-ottobre 2021).



**ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR**  
Satellitare di un settore di 30ha

Sentinel-1 Ascendente					Sentinel-1 Discendente														
1	20/10/2014	81	20/03/2017	161	19/07/2018	241	29/11/2019	321	22/04/2021	1	26/10/2014	81	01/05/2017	161	23/09/2018	241	15/02/2020	321	23/03/2021
2	01/11/2014	82	26/03/2017	162	31/07/2018	242	05/12/2019	322	28/04/2021	2	01/12/2014	82	13/05/2017	162	29/09/2018	242	21/02/2020	322	29/03/2021
3	13/11/2014	83	01/04/2017	163	06/08/2018	243	11/12/2019	323	04/05/2021	3	25/12/2014	83	19/05/2017	163	05/10/2018	243	04/03/2020	323	04/04/2021
4	25/11/2014	84	07/04/2017	164	12/08/2018	244	17/12/2019	324	16/05/2021	4	18/01/2015	84	25/05/2017	164	11/10/2018	244	16/03/2020	324	10/04/2021
5	07/12/2014	85	19/04/2017	165	18/08/2018	245	23/12/2019	325	22/05/2021	5	30/01/2015	85	31/05/2017	165	17/10/2018	245	22/03/2020	325	16/04/2021
6	31/12/2014	86	25/04/2017	166	24/08/2018	246	29/12/2019	326	28/05/2021	6	23/02/2015	86	06/06/2017	166	23/10/2018	246	28/02/2020	326	22/04/2021
7	12/01/2015	87	01/05/2017	167	30/08/2018	247	04/01/2020	327	03/06/2021	7	07/03/2015	87	12/06/2017	167	29/10/2018	247	03/04/2020	327	28/04/2021
8	24/01/2015	88	07/05/2017	168	05/09/2018	248	10/01/2020	328	09/06/2021	8	19/03/2015	88	24/06/2017	168	04/11/2018	248	09/04/2020	328	04/05/2021
9	05/02/2015	89	13/05/2017	169	11/09/2018	249	16/01/2020	329	15/06/2021	9	31/03/2015	89	30/06/2017	169	10/11/2018	249	16/01/2020	329	10/05/2021
10	17/02/2015	90	19/05/2017	170	17/09/2018	250	22/01/2020	330	21/06/2021	10	12/04/2015	90	06/07/2017	170	16/11/2018	250	22/01/2020	330	16/05/2021
11	01/03/2015	91	25/05/2017	171	23/09/2018	251	28/01/2020	331	27/06/2021	11	24/04/2015	91	12/07/2017	171	22/11/2018	251	28/01/2020	331	22/05/2021
12	13/03/2015	92	31/05/2017	172	29/09/2018	252	03/02/2020	332	03/07/2021	12	06/05/2015	92	24/07/2017	172	28/11/2018	252	03/02/2020	332	28/05/2021
13	06/04/2015	93	06/06/2017	173	05/10/2018	253	09/02/2020	333	09/07/2021	13	18/05/2015	93	30/07/2017	173	04/12/2018	253	09/02/2020	333	03/06/2021
14	18/04/2015	94	12/06/2017	174	11/10/2018	254	15/02/2020	334	15/07/2021	14	30/05/2015	94	05/08/2017	174	10/12/2018	254	15/02/2020	334	09/06/2021
15	30/04/2015	95	18/06/2017	175	17/10/2018	255	21/02/2020	335	27/07/2021	15	11/06/2015	95	17/08/2017	175	16/12/2018	255	21/02/2020	335	15/06/2021
16	12/05/2015	96	24/06/2017	176	23/10/2018	256	27/02/2020	336	02/08/2021	16	17/07/2015	96	23/08/2017	176	22/12/2018	256	27/02/2020	336	21/06/2021
17	05/06/2015	97	30/06/2017	177	29/10/2018	257	04/03/2020	337	14/08/2021	17	29/07/2015	97	29/08/2017	177	28/12/2018	257	04/03/2020	337	27/06/2021
18	17/06/2015	98	06/07/2017	178	04/11/2018	258	10/03/2020	338	20/08/2021	18	22/08/2015	98	04/09/2017	178	03/01/2019	258	10/03/2020	338	03/07/2021
19	29/06/2015	99	12/07/2017	179	10/11/2018	259	16/03/2020	339	26/08/2021	19	03/09/2015	99	10/09/2017	179	09/01/2019	259	16/03/2020	339	09/07/2021
20	11/07/2015	100	18/07/2017	180	16/11/2018	260	22/03/2020	340	01/09/2021	20	21/10/2015	100	16/09/2017	180	15/01/2019	260	22/03/2020	340	15/07/2021
21	16/08/2015	101	24/07/2017	181	22/11/2018	261	28/03/2020	341	07/09/2021	21	02/11/2015	101	22/09/2017	181	21/01/2019	261	28/03/2020	341	21/07/2021
22	28/08/2015	102	30/07/2017	182	28/11/2018	262	03/04/2020	342	13/09/2021	22	14/11/2015	102	28/09/2017	182	27/01/2019	262	03/04/2020	342	27/07/2021
23	09/09/2015	103	05/08/2017	183	04/12/2018	263	09/04/2020	343	19/09/2021	23	26/11/2015	103	04/10/2017	183	02/02/2019	263	09/04/2020	343	08/08/2021
24	21/09/2015	104	11/08/2017	184	10/12/2018	264	15/04/2020	344	25/09/2021	24	08/12/2015	104	10/10/2017	184	08/02/2019	264	15/04/2020	344	14/08/2021
25	03/10/2015	105	17/08/2017	185	16/12/2018	265	21/04/2020	345	01/10/2021	25	20/12/2015	105	16/10/2017	185	14/02/2019	265	21/04/2020	345	26/08/2021
26	27/10/2015	106	23/08/2017	186	22/12/2018	266	27/04/2020	346	07/10/2021	26	01/01/2016	106	22/10/2017	186	20/02/2019	266	27/04/2020	346	01/09/2021
27	20/11/2015	107	29/08/2017	187	28/12/2018	267	03/05/2020	347	13/10/2021	27	13/01/2016	107	28/10/2017	187	26/02/2019	267	03/05/2020	347	07/09/2021
28	02/12/2015	108	04/09/2017	188	03/01/2019	268	09/05/2020			28	25/01/2016	108	03/11/2017	188	04/03/2019	268	09/05/2020	348	13/09/2021
29	14/12/2015	109	10/09/2017	189	09/01/2019	269	15/05/2020			29	06/02/2016	109	09/11/2017	189	10/03/2019	269	15/05/2020	349	19/09/2021
30	26/12/2015	110	16/09/2017	190	15/01/2019	270	21/05/2020			30	18/02/2016	110	15/11/2017	190	16/03/2019	270	21/05/2020	350	25/09/2021
31	07/01/2016	111	22/09/2017	191	21/01/2019	271	27/05/2020			31	01/03/2016	111	21/11/2017	191	22/03/2019	271	27/05/2020	351	01/10/2021
32	19/01/2016	112	28/09/2017	192	27/01/2019	272	08/06/2020			32	13/03/2016	112	27/11/2017	192	28/03/2019	272	02/06/2020	352	07/10/2021
33	31/01/2016	113	04/10/2017	193	08/02/2019	273	14/06/2020			33	25/03/2016	113	03/12/2017	193	03/04/2019	273	08/06/2020		
34	12/02/2016	114	10/10/2017	194	14/02/2019	274	20/06/2020			34	06/04/2016	114	09/12/2017	194	09/04/2019	274	14/06/2020		
35	24/02/2016	115	16/10/2017	195	20/02/2019	275	26/06/2020			35	18/04/2016	115	15/12/2017	195	15/04/2019	275	20/06/2020		
36	07/03/2016	116	22/10/2017	196	26/02/2019	276	08/07/2020			36	30/04/2016	116	21/12/2017	196	21/04/2019	276	26/06/2020		
37	19/03/2016	117	28/10/2017	197	04/03/2019	277	14/07/2020			37	12/05/2016	117	27/12/2017	197	03/05/2019	277	02/07/2020		
38	31/03/2016	118	03/11/2017	198	10/03/2019	278	20/07/2020			38	24/05/2016	118	02/01/2018	198	09/05/2019	278	08/07/2020		
39	12/04/2016	119	09/11/2017	199	16/03/2019	279	26/07/2020			39	29/06/2016	119	08/01/2018	199	15/05/2019	279	14/07/2020		
40	24/04/2016	120	15/11/2017	200	22/03/2019	280	01/08/2020			40	11/07/2016	120	14/01/2018	200	21/05/2019	280	20/07/2020		
41	06/05/2016	121	21/11/2017	201	28/03/2019	281	07/08/2020			41	23/07/2016	121	20/01/2018	201	27/05/2019	281	26/07/2020		
42	18/05/2016	122	27/11/2017	202	03/04/2019	282	13/08/2020			42	04/08/2016	122	26/01/2018	202	02/06/2019	282	01/08/2020		
43	30/05/2016	123	03/12/2017	203	09/04/2019	283	19/08/2020			43	16/08/2016	123	01/02/2018	203	08/06/2019	283	07/08/2020		
44	11/06/2016	124	09/12/2017	204	15/04/2019	284	25/08/2020			44	09/09/2016	124	07/02/2018	204	14/06/2019	284	13/08/2020		
45	05/07/2016	125	15/12/2017	205	21/04/2019	285	31/08/2020			45	21/09/2016	125	13/02/2018	205	20/06/2019	285	19/08/2020		
46	17/07/2016	126	21/12/2017	206	27/04/2019	286	06/09/2020			46	27/09/2016	126	19/02/2018	206	26/06/2019	286	25/08/2020		
47	29/07/2016	127	27/12/2017	207	03/05/2019	287	12/09/2020			47	03/10/2016	127	25/02/2018	207	08/07/2019	287	31/08/2020		
48	10/08/2016	128	02/01/2018	208	09/05/2019	288	24/09/2020			48	09/10/2016	128	03/03/2018	208	14/07/2019	288	06/09/2020		
49	22/08/2016	129	08/01/2018	209	15/05/2019	289	30/09/2020			49	21/10/2016	129	09/03/2018	209	20/07/2019	289	12/09/2020		
50	03/09/2016	130	14/01/2018	210	21/05/2019	290	12/10/2020			50	27/10/2016	130	15/03/2018	210	26/07/2019	290	18/09/2020		
51	15/09/2016	131	20/01/2018	211	27/05/2019	291	18/10/2020			51	02/11/2016	131	21/03/2018	211	01/08/2019	291	24/09/2020		
52	27/09/2016	132	26/01/2018	212	02/06/2019	292	24/10/2020			52	08/11/2016	132	27/03/2018	212	07/08/2019	292	30/09/2020		
53	03/10/2016	133	01/02/2018	213	08/06/2019	293	30/10/2020			53	14/11/2016	133	02/04/2018	213	19/08/2019	293	06/10/2020		
54	09/10/2016	134	07/02/2018	214	14/06/2019	294	05/11/2020			54	20/11/2016	134	08/04/2018	214	25/08/2019	294	12/10/2020		
55	15/10/2016	135	13/02/2018	215	20/06/2019	295	11/11/2020			55	26/11/2016	135	14/04/2018	215	31/08/2019	295			

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## 2.2. Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare

I due *stack* di immagini Sentinel-1 sono stati analizzati separatamente attraverso un *workflow* che prevede l'elaborazione mediante metodologie A-DInSAR mediante procedure proprietarie a cui si aggiungono attività di validazione e post-elaborazione dei risultati.

Tale analisi consente l'individuazione di eventuali fenomeni di deformazione estesi e, in funzione della risoluzione delle immagini SAR utilizzate, l'individuazione di oggetti a terra coinvolti in processi deformativi localizzati. Inoltre, grazie alla capacità di ottenere serie temporali di spostamento con accuratezza millimetrica, è possibile estrarre informazioni sull'evoluzione temporale dei processi deformativi.

Le analisi per ciascun *dataset* sono state eseguite alla scala dell'intera area di indagine (Figura 1), attraverso l'identificazione di un punto di riferimento esterno all'areale di interesse. Al fine di ottimizzare l'affidabilità dei risultati, tale punto di riferimento, è stato comunque localizzato in prossimità dell'area di studio (localizzazione approssimativa: lat. 41,0893°; lon. 15,0380° per la geometria orbitale ascendente e lat. 41,0915°; lon. 15,0380° per la discendente).

Per ogni *dataset* è stata selezionata un'immagine *master* a cui riferire le altre immagini del *dataset* per il calcolo delle differenze di fase. Il primo stadio nell'analisi A-DInSAR è stata la selezione dei **PMC (PM Candidates)**, ovvero l'identificazione dei punti idonei ad essere analizzati. Per questo scopo viene analizzata la **mappa della riflettività**, ottenuta come media non coerente delle ampiezze delle immagini *radar*. Essa rappresenta, quindi, la riflettività media dei *pixel* delle immagini nel tempo. Oggetti molto riflettenti e ben visibili dal satellite come edifici, rocce esposte, etc. presentano valori più alti di riflettività rispetto ad aree vegetate, specchi d'acqua etc.

I **PMC** sono inoltre stati selezionati sull'area di indagine con una distribuzione il più omogenea possibile e valutando un'opportuna soglia del valore di **Amplitude Stability Index**, ovvero dell'indice di stabilità della riflettività nel tempo e di **Spatial Coherence**, ovvero la coerenza media degli interferogrammi opportunamente generati. Uno dei requisiti essenziali per l'esecuzione di un'analisi A-DInSAR è, infatti, rappresentato dalla stabilità nel tempo del segnale elettromagnetico relativo ai punti da sottoporre all'analisi stessa (cfr. *Appendice*).

Una volta analizzati i dati di base relativi al segnale radar e identificati i PMC, grazie all'algoritmo impiegato nelle analisi è stato possibile stimare la componente di fase legata al disturbo atmosferico (*Atmospheric Phase Screen*, APS) per ciascuna delle immagini costituenti il *dataset*. Proprio grazie all'eliminazione del contributo delle APS dalla fase interferometrica, è stato possibile stimare i valori dei *trend* di spostamento (in mm/anno), per tutti i punti di interesse, sempre in relazione al *reference point* scelto.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

### **2.3. Post-elaborazione e validazione dei risultati**

Partendo dai risultati dell'analisi sopra descritta, è stato eseguito un processo di validazione, post-elaborazione e interpretazione dei risultati. In particolare, sono state applicate routine di validazione semiautomatica basate su algoritmi statistici e strumenti software proprietari di NHAZCA S.r.l., consentendo un controllo multi-parametrico per ogni singolo punto di misura disponibile, al fine di analizzare i comportamenti deformativi spaziali e temporali e di identificare e rimuovere gli *outliers*. La validazione è stata effettuata sulla base di alcuni parametri rilevanti quali la coerenza temporale, l'indice di stabilità in ampiezza, la velocità stimata, gli andamenti deformativi e le quote stimate. Le procedure di validazione hanno permesso di ottenere **150 punti di misura (PM) affidabili** in tutta l'area di indagine **per la geometria orbitale ascendente** e **180 PM affidabili per la geometria orbitale discendente**. La post-elaborazione, effettuata attraverso algoritmi proprietari, ha permesso di estrarre le informazioni più utili in termini di spostamenti, aree coinvolte e anomalie locali per l'efficace comprensione e caratterizzazione dei fenomeni osservati.

### **2.4. Restituzione dei risultati A-DInSAR**

I risultati delle analisi sono di seguito restituiti attraverso mappe su basi ortofotografiche che mostrano le informazioni di spostamento. È stata adottata una scala di colori, espressa in mm/anno che rappresenta la velocità media di spostamento lungo la LOS con valori in allontanamento al sensore (colori dal giallo al rosso) e avvicinamento al sensore (colori dall'azzurro al blu); il colore verde indica aree con tassi di spostamento sui punti di misura non apprezzabile o non significativo. L'errore strumentale è stimato in circa  $\pm 1.5$  mm/anno.



### 3. RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti dall'analisi A-DInSAR sono riportati in Figura 6 e Figura 7 attraverso mappe che mostrano le velocità medie annue dei punti di misura (PM). L'indagine eseguita ha consentito di ottenere una buona distribuzione spaziale dei PM nell'area di studio sia in geometria ascendente che discendente, così da consentire un'osservazione ridondante degli eventuali processi deformativi che la caratterizzano. Nello specifico, sono stati identificati **330 PM** (complessivamente per le due geometrie orbitali) nell'intera area di indagine. I PM corrispondono ad elementi naturali e antropici presenti nell'area, caratterizzati da un'elevata stabilità alla riflessione delle onde radar nel tempo. Una maggiore densità di PM si rileva, di conseguenza, in corrispondenza degli edifici presenti nell'area e delle rocce esposte in prossimità del corso d'acqua, mentre la densità risulta inferiore nelle aree densamente vegetate e coltivate, laddove si registrano intense variazioni nel tempo dei segnali SAR inviati e registrati dai sensori satellitari.

Dall'analisi delle mappe dei PM (sia in geometria orbitale ascendente che discendente) si evince chiaramente come si rilevino spostamenti apprezzabili in accordo con i risultati ottenuti nella precedente analisi storica e nei precedenti aggiornamenti di monitoraggio, con spostamenti di entità massima lungo la linea di vista strumentale di circa 6 mm/anno.

Come prodotto derivante dalle attività di post-elaborazione, vengono riportate le Mappe di velocità dei **Punti di Misura Sintetici (PMS) nelle direzioni verticale ed orizzontale (Est-Ovest)**, derivanti dalla scomposizione vettoriale delle misure lungo la linea di vista strumentale (LOS) dei PM ottenuti in geometria orbitale ascendente e discendente (Figura 6 e Figura 7). Infatti, si ricorda che le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura sono calcolate lungo la linea di vista del sensore (LOS). Questo implica che gli spostamenti rilevati sui singoli punti di misura rappresentano, in realtà, la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio (cfr. *Appendice*). In presenza di moti puramente verticali, il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plano-altimetrica degli spostamenti. Tuttavia, attraverso l'utilizzo delle due geometrie orbitali di acquisizione, è possibile distinguere i due contributi. Una scomposizione vettoriale dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati nelle due geometrie orbitali è stata eseguita, attraverso l'utilizzo di algoritmi proprietari, per ottenere i vettori di spostamento lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest) e verticale, riportate rispettivamente in Figura 8 e Figura 9. In particolare, l'area di indagine è stata discretizzata in celle esagonali (con raggio

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

del cerchio inscritto pari a 20 m) secondo una griglia regolare. I risultati mostrano i valori risultanti delle sole celle ("PM sintetici") contenenti almeno un punto di misura per entrambe le geometrie orbitali.

Nell'area di studio si evidenziano dei **fenomeni deformativi di modesta entità** distribuiti in alcune porzioni delle strutture ivi comprese (Figura 6 e Figura 7). Tali elementi sono caratterizzati da deformazioni lungo la LOS non superiori ai 3 mm/anno per la geometria orbitale ascendente (in avvicinamento al sensore) e non inferiori ai -6 mm/anno per la geometria orbitale discendente (in allontanamento dal sensore), come mostrato dalle serie temporali di spostamento dei punti di misura (Measurement Points – MP) MP 1 e MP 2 – ASC e -DESC in Figura 10 e Figura 11. All'interno di queste serie temporali, congiuntamente ai trend deformativi di lungo periodo, è possibile osservare dei **contributi deformativi periodici di origine termica**, caratterizzati da oscillazioni con ampiezza non superiore ai 10 mm e con frequenza annuale. Tali deformazioni possono essere preliminarmente riconducibili a fenomeni di oscillazione termica stagionale di elementi facenti parte delle strutture indagate. Considerando le mappe di velocità dei punti sintetici nelle direzioni verticale e orizzontale (Figura 8 e Figura 9), in corrispondenza degli elementi in deformazione presenti nello scenario indagato sono **prevalenti gli spostamenti verso il basso, con valori compresi fra -1,5 e -4 mm/anno, e verso Ovest, con valori compresi fra -2 e -6 mm/anno**. Nelle restanti porzioni dell'area di studio non si apprezzano spostamenti di entità significativa o apprezzabile.



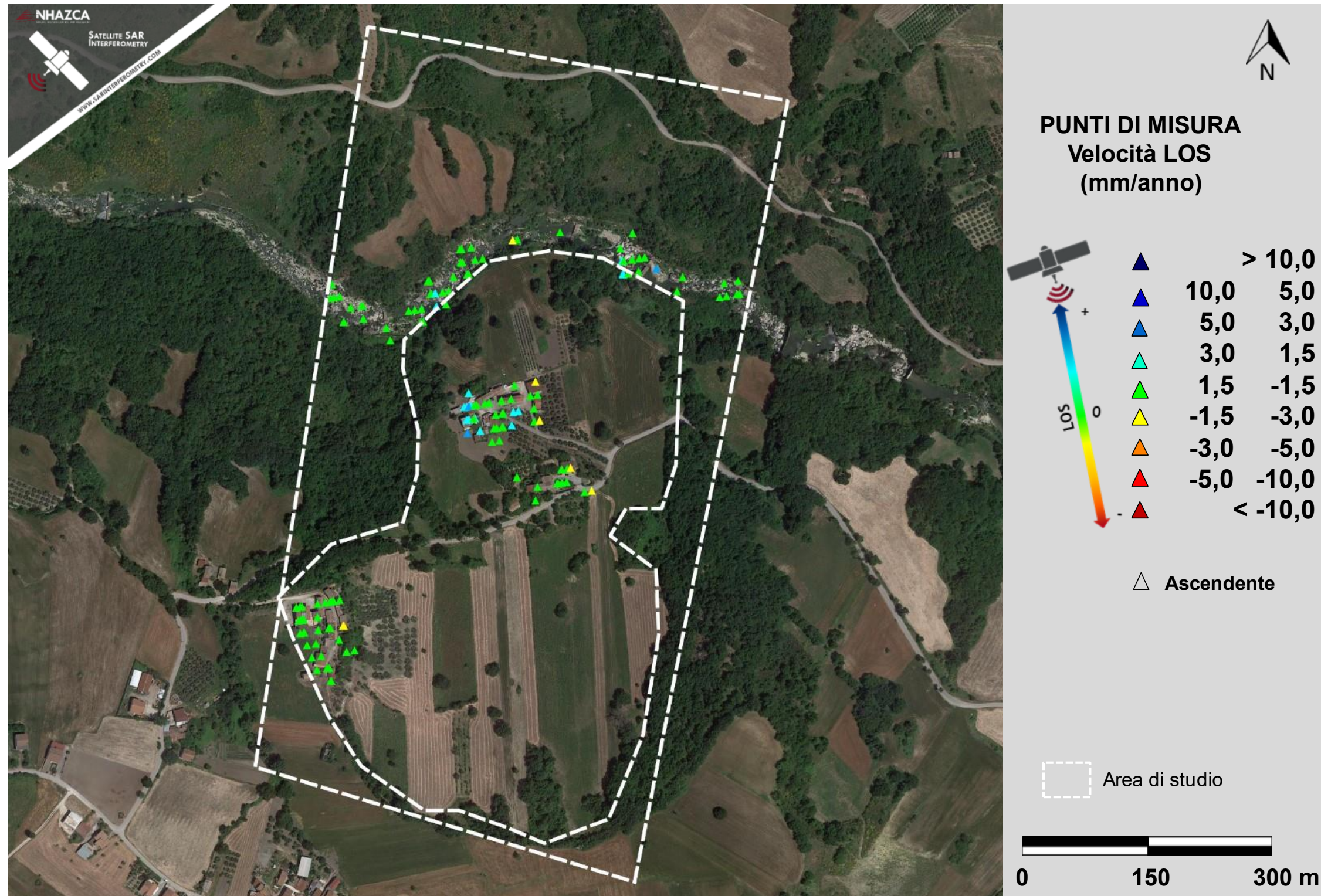


Figura 6: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack ascendente.



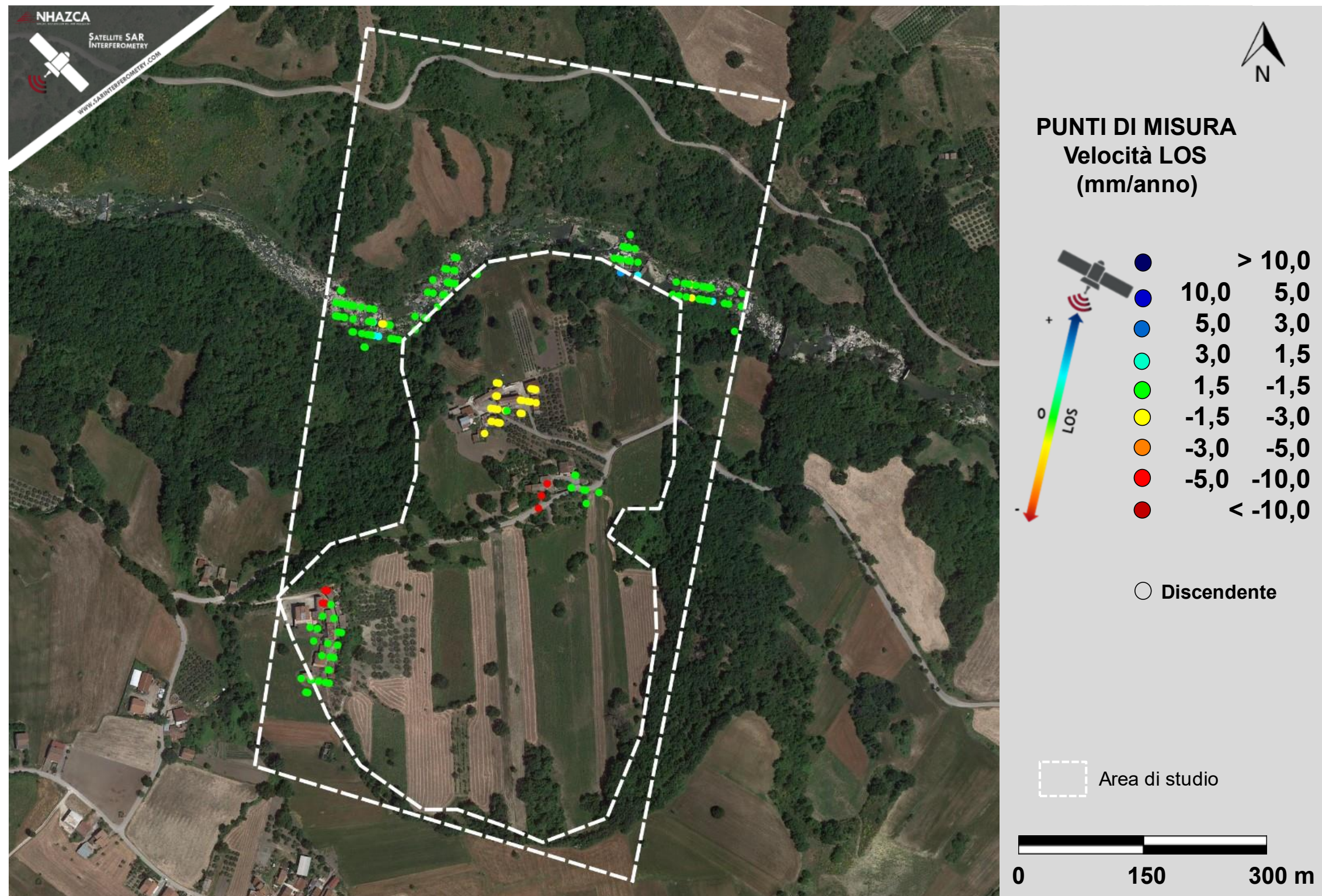


Figura 7: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack discendente.



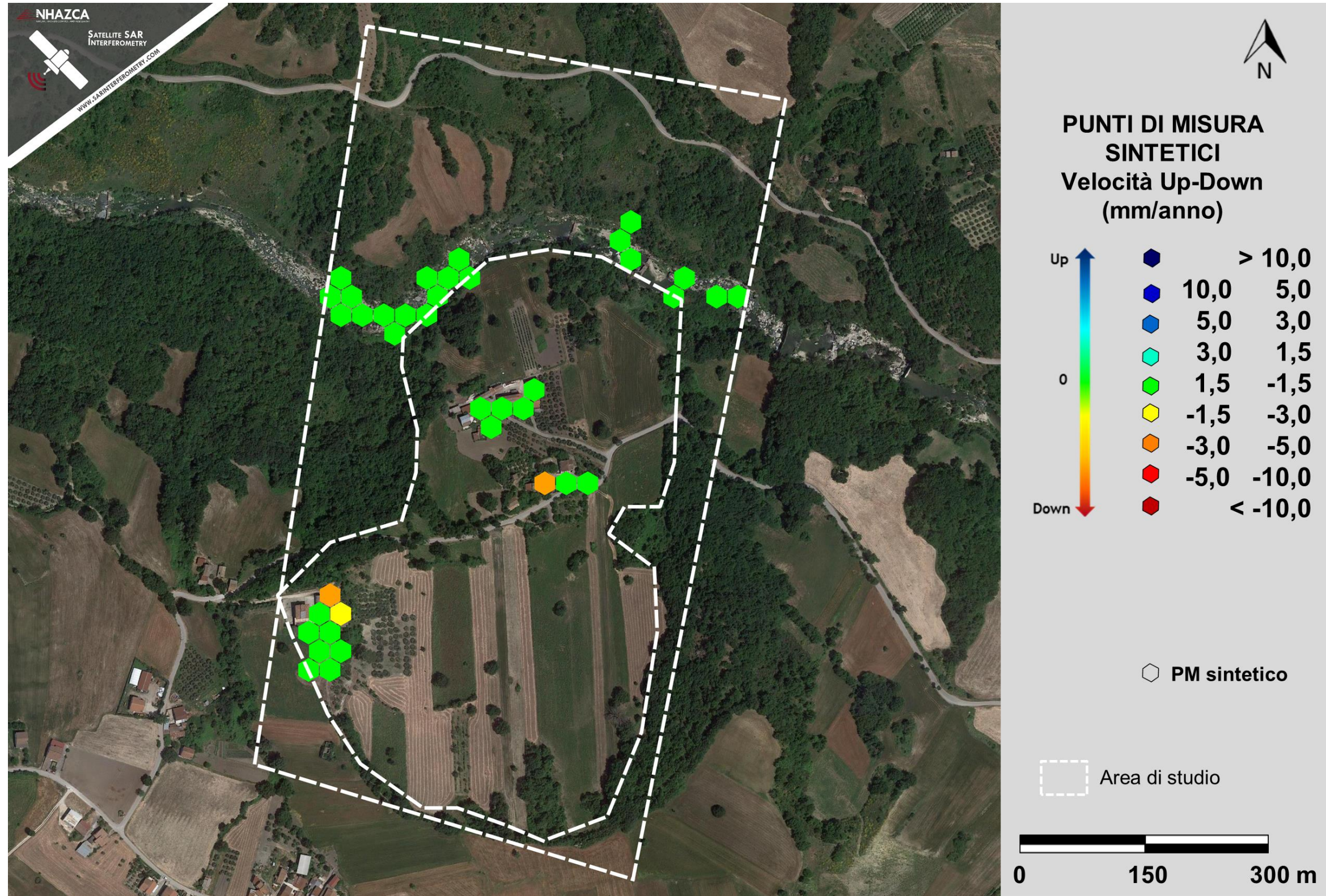


Figura 8: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale. Valori positivi = Up; Valori negativi = Down.



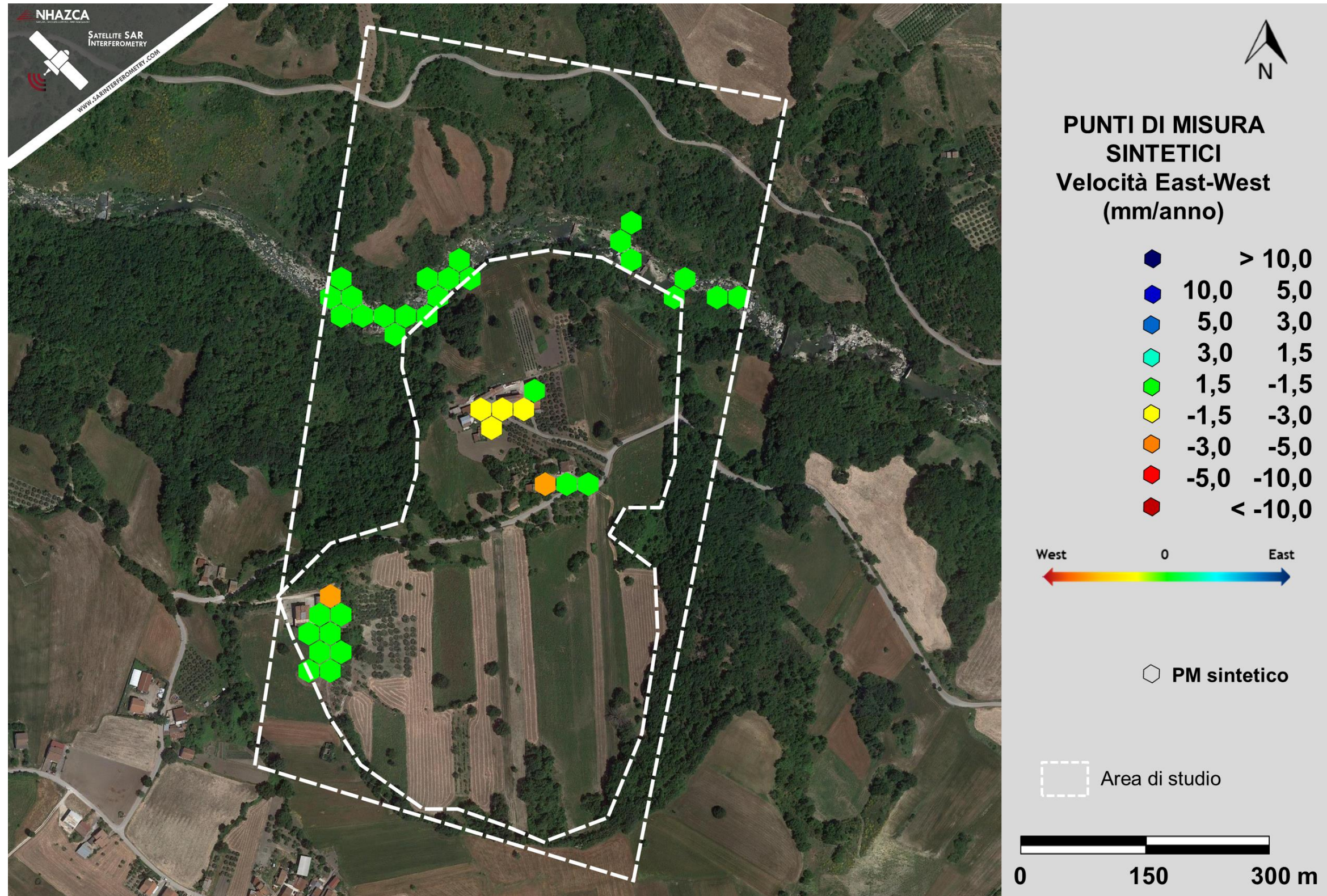


Figura 9: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest). Valori positivi = Est; Valori negativi = Ovest.



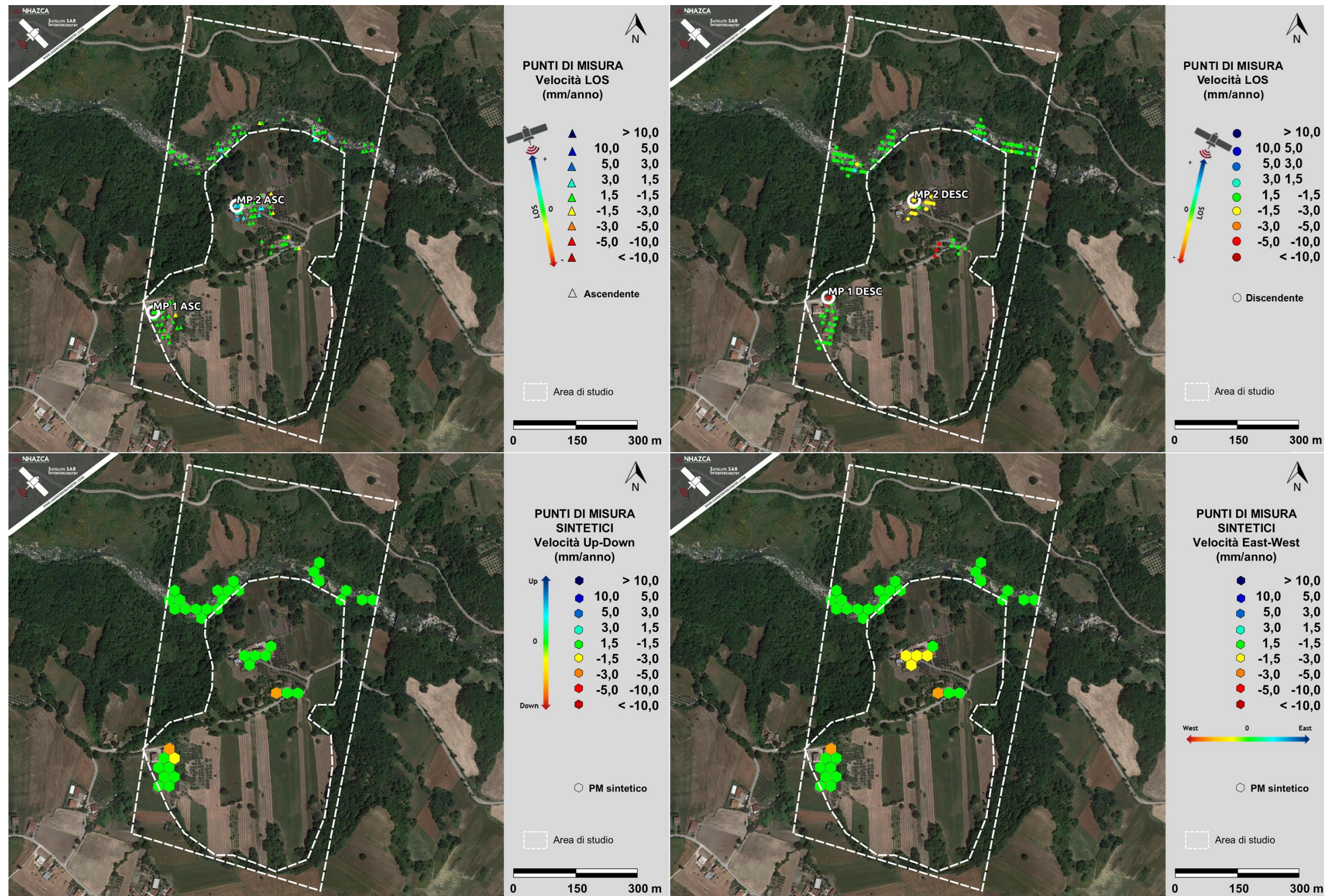


Figura 10: In alto a sinistra, mappa di velocità dei punti di misura in geometria ascendente; in alto a destra, mappa di velocità dei punti di misura in geometria discendente. In bianco sono evidenziati i punti di misura di cui si riportano le serie temporali di spostamento in Figura 11. In basso si riportano le mappe di velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale ed orizzontale (Est-Ovest).



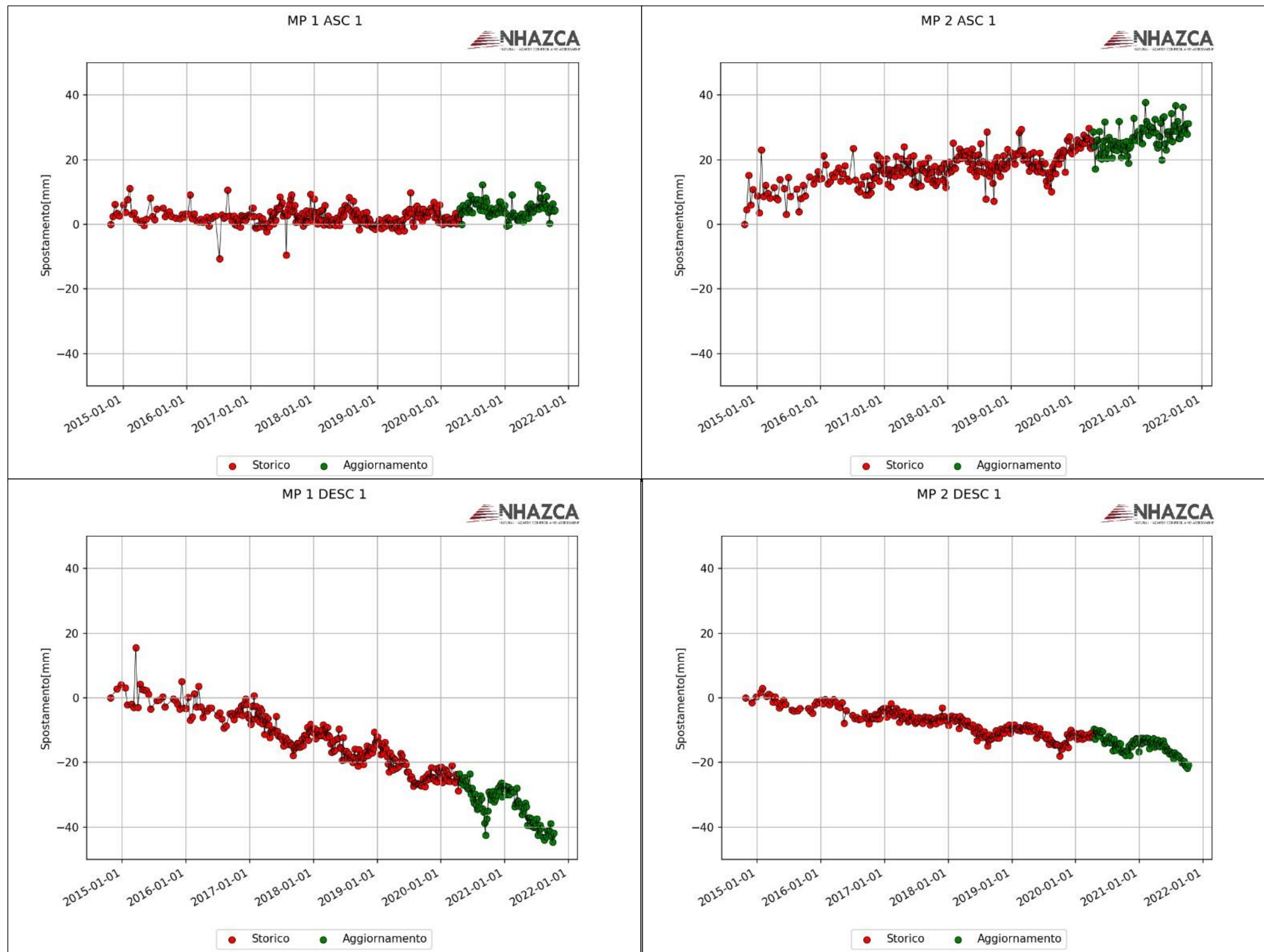


Figura 11: Serie temporali di spostamento di alcuni punti di misura ottenuti da analisi A-DInSAR (stack ascendente e discendente), le cui ubicazioni sono riportate in Figura 10.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

#### 4. CONCLUSIONI

I risultati delle analisi, eseguite con tecniche A-DInSAR a partire da immagini Sentinel-1 in doppia geometria orbitale, hanno consentito di identificare e quantificare i tassi e i *trend* di spostamento nell'area di indagine per il periodo **aprile 2020 – ottobre 2021**, in aggiunta a quanto già elaborato per il periodo ottobre 2014 – aprile 2020 e trasmesso alla Committenza (rif. prot. NZ0720-U\_161219, NZ0801-U\_310120 e NZ0997-U\_220420). Le analisi sono state condotte su due dataset, in doppia geometria orbitale (ascendente e discendente) per una caratterizzazione esaustiva delle deformazioni dell'area.

Le analisi preliminari effettuate con la costellazione Sentinel-1 (vedi Report prot. NZ2021-U\_021121) sono risultate utili per una caratterizzazione generale dell'area in attesa di un ulteriore affinamento delle analisi al fine di verificare e incrementare l'affidabilità dei dati. L'analisi A-DInSAR eseguita ha consentito di ottenere una buona distribuzione spaziale dei PM nell'area di studio, sia in geometria ascendente che discendente, così da consentire un'osservazione ridondante e quindi più robusta degli eventuali processi deformativi che la caratterizzano (sono stati identificati 330 PM complessivamente per le due geometrie orbitali). Dall'analisi delle mappe dei PM (Figura 6 e Figura 7) si evince che l'area di studio **mostra deformazioni in atto di modesta entità** localizzate su alcune strutture (Figura 6 e Figura 7), per le quali sono **prevalenti le componenti deformative dirette verso il basso, con valori compresi fra -1,5 e -4 mm/anno, e verso Ovest, con valori compresi fra -2 e -6 mm/anno** (Figura 8 e Figura 9).

Nelle restanti porzioni dell'area di studio non si apprezzano spostamenti di entità significativa o apprezzabile.

In conclusione, le analisi di aggiornamento confermano le considerazioni espresse al riguardo delle deformazioni presenti nell'area (rif. prot. NZ0720-U\_161219, NZ0801-U\_310120 e NZ0997-U\_220420), le arricchiscono dal punto di vista temporale e le integrano attraverso una caratterizzazione di maggior dettaglio dei fenomeni in atto nell'area di studio.

*ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha*

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Farr, T. G. & M. Kobrick, 2000, Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. Eos Trans. AGU, 81:583-583.
2. Hanssen, Ramon F. (2001), "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis", Kluwer Academic.
3. Kampes, B.M. (2006) Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Remote Sensing and Digital Image Processing; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
4. Massonnet, D.; Feigl, K. L. (1998), "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface", Rev. Geophys.36(4): 441–500, 1998 RvGeo. 36.441M, doi: 10.1029/97RG03139.
5. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, (March), 6–43.

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

## APPENDICE

### L'Interferometria SAR Satellitare

L'InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) (Massonnet et al., 1998; Hanssen, 2001), che si basa sul confronto di immagini RADAR acquisite in tempi diversi, rappresenta la principale metodologia di telerilevamento satellitare impiegata ad oggi per la misura degli spostamenti della superficie terrestre e delle strutture presenti su di essa. Il principio alla base delle metodologie Multi-Image InSAR o Advanced DInSAR (A-DInSAR) è costituito dalla combinazione delle informazioni provenienti da un elevato numero di immagini, che permette la ricostruzione di serie temporali di spostamento di oggetti a terra ben visibili dal satellite nell'intero periodo analizzato. Tale approccio viene condiviso da diverse metodologie di analisi che hanno in comune l'obiettivo di ottimizzare le informazioni di spostamento racchiuse nel segnale delle immagini SAR acquisite in tempi diversi su una medesima area.

L'utilizzo delle tecniche A-DInSAR permette, non solo di individuare un dato processo deformativo, passato o in atto, ma anche di stimarne l'evoluzione nel tempo e nello spazio. Di seguito sono presentati con maggior dettaglio alcuni approfondimenti tecnici sui sistemi InSAR satellitari e sulla metodologia A-DInSAR, adottata in questo lavoro.

### Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar)

Per RADAR (**Radio Detection And Ranging**) si intende un sistema in grado di emettere un impulso di energia elettromagnetica e di registrarne il segnale di ritorno (**eco**), prodotto a seguito della riflessione di un oggetto al suolo (**target**). Tale impulso si propaga come segnale elettromagnetico avente **lunghezza d'onda  $\lambda$**  nel dominio delle **microonde**. I sistemi RADAR rappresentano strumenti di telerilevamento attivi poiché non è richiesta illuminazione solare e le frequenze utilizzate sono in grado di attraversare la copertura nuvolosa. Con tale sistema si è quindi in grado di determinare la presenza e la distanza degli oggetti presenti sulla scena. Le capacità di riflessione degli oggetti presenti sulla superficie osservata assumono un'importanza fondamentale così come le proprietà **dielettriche** (capacità di condurre/trasmettere) di tali superfici.

Il sistema **SAR (Synthetic Aperture Radar)** è una particolare tipologia di radar la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria predefinita (come, per esempio, l'orbita di un satellite su cui è montato il sensore) per osservare la stessa area da più

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

angoli di vista, “simulando” quindi un’antenna di grandi dimensioni, al fine di incrementare la risoluzione al suolo. Questa particolare geometria di acquisizione è schematizzata in Figura 12.

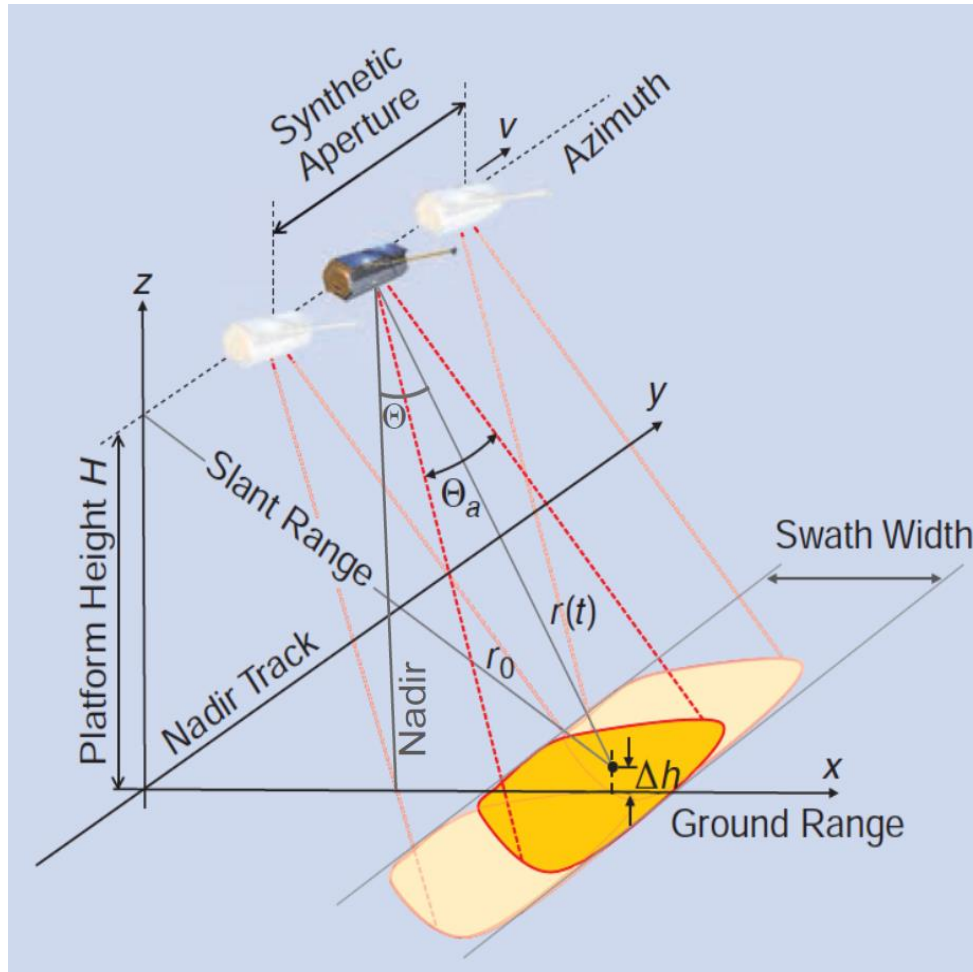


Figura 12: geometria di acquisizione SAR (Moreira et al. 2013, modificato).

Le immagini acquisite, rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), sono caratterizzate da una risoluzione in **Slant Range** e in **Azimuth**.

La prima (Slant Range) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di propagazione del segnale, perpendicolare all'orbita e inclinata di un angolo  $\theta$  - detto off-nadir - rispetto alla normale al suolo.

La seconda (Azimuth) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di volo del satellite, che, in prima approssimazione, può essere considerata quasi Nord-Sud.

### Le immagini SAR satellitari



ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

*L'immagine SAR satellitare è composta, quindi, da una matrice di pixel disposti lungo le direzioni di azimuth (parallela al movimento del satellite) e di slant range (perpendicolare a quest'ultima).*

*Ogni pixel contiene le informazioni di ampiezza e fase del segnale retrodiffuso dagli oggetti presenti sulla superficie osservata.*

*Mentre l'ampiezza individua l'energia del segnale riflesso verso il sensore, la fase racchiude l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche, ovvero il percorso compiuto dal segnale lungo il tragitto sensore-target.*

*I satelliti possono acquisire in due geometrie diverse: il passaggio del satellite su una stessa area avviene in direzione circa Nord-Sud (geometria discendente) ed in direzione circa Sud-Nord (geometria ascendente) (Figura 13). A causa della configurazione side-looking dei satelliti, la stessa area, quindi, viene rilevata da due angoli di vista quasi complementari.*

*È bene osservare che la geometria di acquisizione, anche in funzione delle orbite dei sensori SAR, può determinare delle difficoltà oggettive nel rilevamento degli spostamenti con determinate caratteristiche. Ad esempio, in aree caratterizzate da elevata energia di rilievo o con geometria speculare rispetto all'inclinazione di misura del satellite sul piano orizzontale si possono presentare problemi di distorsione dell'immagine (layover) o addirittura zone d'ombra (shadowing) che possono rendere difficoltosa l'analisi dei dati (Figura 14).*

*Inoltre, sotto determinate condizioni di movimento (es. spostamenti a forte componente orizzontale con prevalente direzione N-S o con determinate inclinazioni), può risultare possibile l'analisi del dato ma non la misura accurata del movimento. In questi ultimi casi, se non analizzati attentamente, si possono determinare interpretazioni errate o non congruenti con il fenomeno indagato.*

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR Satellitare di un settore di 30ha

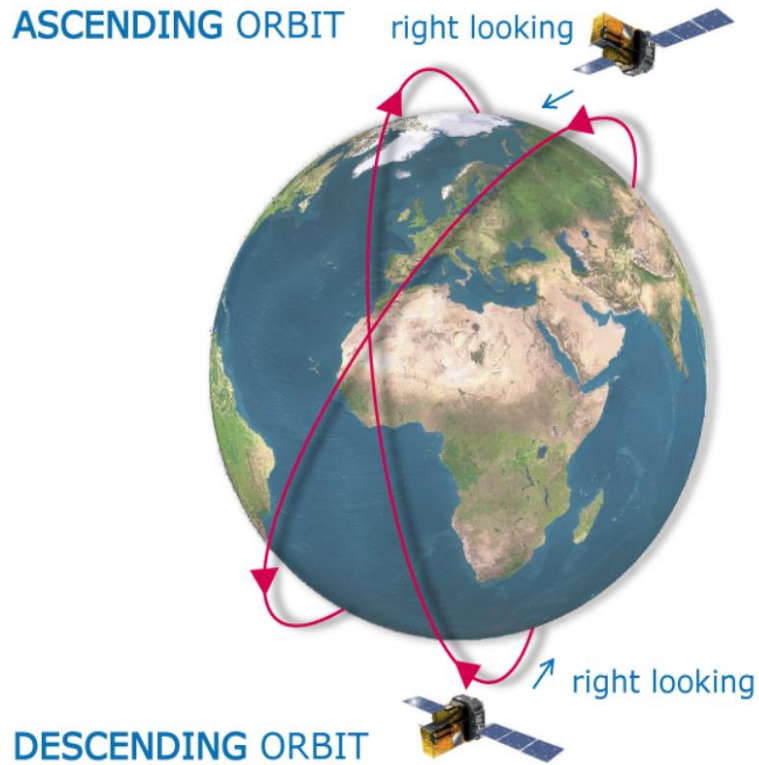


Figura 13: geometrie di acquisizione delle immagini SAR.

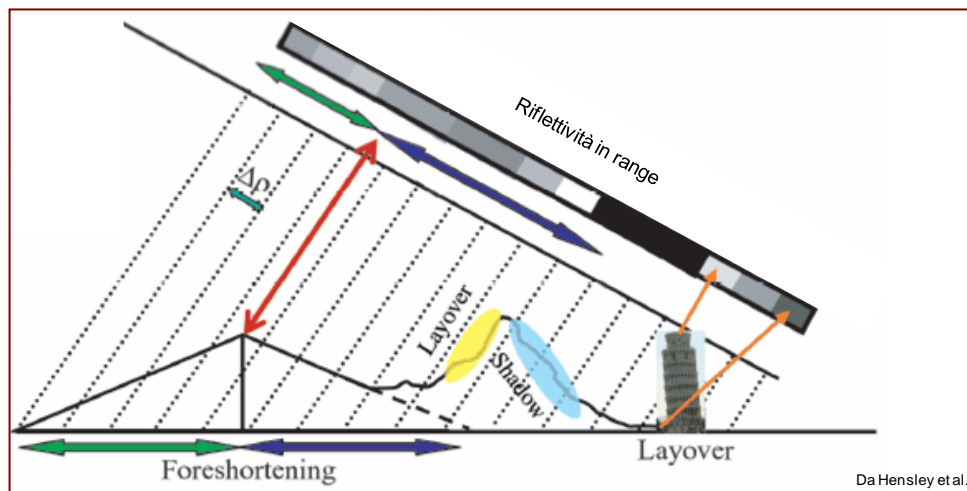


Figura 14: principali distorsioni geometriche.



ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

### **La costellazione Sentinel-1 dell'Agencia Spaziale Europea (ESA)**

La missione Sentinel-1 si inserisce nel programma Copernicus, iniziativa congiunta di ESA e della Commissione Europea e, tanto dal punto di vista tecnico, quanto da quello gestionale, rappresenta in un certo senso una rivoluzione nel mondo dell'Osservazione della Terra. Il primo satellite (Sentinel-1A) è stato lanciato in orbita nell'aprile del 2014, seguito due anni più tardi dal "gemello" Sentinel-1B. Entrambi i satelliti trasportano un sensore SAR in banda C (frequenza di 5,405 GHz e lunghezza d'onda pari a circa 5,546 cm) in grado di acquisire immagini SAR con risoluzione e coperture estremamente variabili (fino a 400 km di swath). In particolare, la modalità di acquisizione standard sulle terre emerse è la cosiddetta Interferometric Wide Swath (IW), caratterizzata da strisciate ampie 250 km e risoluzione paragonabile ai satelliti ESA di prima generazione (ERS ed Envisat). Questa performance così efficace viene realizzata grazie a un'innovativa modalità di acquisizione chiamata TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), che consente di acquisire immagini di grandi dimensioni con una qualità dell'immagine omogenea su tutta la copertura. Uno dei principali punti di forza di Sentinel-1 è tuttavia rappresentato dal ridotto tempo di rivisita pari a 12 giorni che arrivano a soli 6 giorni se si considerano le acquisizioni eseguite da entrambi i satelliti.

### **Principi di base dell'Interferometria SAR differenziale (DInSAR)**

La tecnica tradizionale per la derivazione di informazioni di spostamenti da dati SAR è l'Interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi della variazione del valore di fase tra due distinte acquisizioni e permette di calcolare gli spostamenti della superficie terrestre.

L'informazione sulla differenza di fase viene ricavata dal cosiddetto **Interferogramma**, che costituisce l'elemento basilare della metodologia.

In particolare, la fase di ogni pixel è formata dalla somma di due termini:

$$\varphi = \varphi_s + \varphi_r \quad (1)$$

Il primo ( $\varphi_s$ ) è legato ai retrodiffusori presenti nella scena, il secondo ( $\varphi_r$ ) dipende dal doppio percorso **Satellite – Punto di misura** e dalla lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico inviato e successivamente registrato dal sensore stesso:

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

$$\boxed{\varphi_r = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}} \quad (2)$$

dove  $r$  è la distanza satellite-punto di misura valutata nella direzione di range e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda. Tuttavia, la fase di una singola immagine SAR è inutilizzabile in quanto:

- $\varphi_s$  è casuale;
- $\varphi_r$  contiene decine di milioni di angoli giro (poiché le  $\lambda$  sono di pochi centimetri ed  $r$  di qualche centinaio di chilometri).

Infatti, l'onda elettromagnetica, per il generico pixel, viene inviata verso la superficie terrestre dall'antenna SAR e, durante il percorso **Satellite – Punto di misura**, l'onda compie milioni di cicli e successivamente colpisce tale porzione di territorio con una determinata fase. Successivamente viene quindi retrodiffusa dai vari oggetti (componente  $\varphi_s$  casuale a causa delle riflessioni multiple) e ritorna al satellite che, con opportuni sistemi di acquisizione, registra l'informazione.

Considerando invece la differenza di fase fra due immagini SAR, il termine  $\varphi_s$  si annulla, nell'ipotesi che le caratteristiche di retrodiffusione siano rimaste immutate e la **fase interferometrica**  $\Delta\phi$  sia uguale a:

$$\boxed{\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R} \quad (3)$$

$\Delta\phi$  è caratterizzata dai seguenti contributi principali:

$$\boxed{\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{displ} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{err}} \quad (4)$$

La  $\Delta\phi_f$  è detta fase di terra piatta (flat earth) ed è dovuta ai differenti angoli di vista dei satelliti al momento dell'acquisizione dell'immagine. Rappresenta un contributo di disturbo facilmente rimovibile.

La  $\Delta\phi_{topo}$  è la componente di fase che contiene l'informazione topografica, ovvero la relazione tra fase e quote. Questo contributo di fase viene stimato mediante l'utilizzo di un DEM (Digital Elevation Model).

La  $\Delta\phi_{atm}$  rappresenta un disturbo causato dal contributo di fase interferometrica generata dal variare delle condizioni atmosferiche tra le diverse acquisizioni delle immagini SAR.

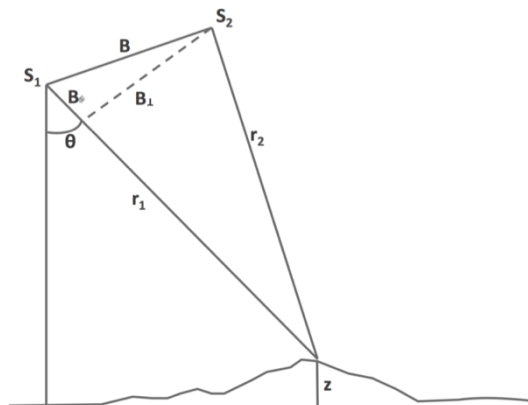
ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

La  $\Delta\phi_{displ}$  è il contributo alla fase interferometrica totale dovuti agli spostamenti della superficie terrestre.

La  $\Delta\phi_{err}$  è rumore di decorrelazione non direttamente determinabile.

L'interferogramma differenziale è ottenuto a partire dalla (4) dopo aver corretto il contributo di terra piatta ed eliminato la fase topografica, utilizzando un DEM. Alla fase di spostamento restano sommati il contributo atmosferico e gli eventuali errori. Il sistema di acquisizione delle immagini che formano la coppia interferometrica è caratterizzato dalla baseline geometrica (detta baseline normale o perpendicolare) (Figura 15) e dalla baseline temporale (ovvero l'intervallo di tempo tra le due acquisizioni), che influenzano e, in taluni casi, compromettono la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR.

La baseline normale è legata alla diversa posizione occupata dal satellite durante i vari passaggi lungo la stessa orbita. Questo avviene perché essi si discostano leggermente dalla traiettoria nominale; di fatto, vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri tra le orbite percorse dal satellite nei passaggi successivi e di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona presenta di volta in volta angoli leggermente diversi.



**Figura 15: baseline geometrica. Geometria di acquisizione di due immagini SAR. S1 e S2 rappresentano la posizione dei satelliti in tempi diversi;  $\theta$  è l'angolo nadir-off;  $r_1$  e  $r_2$  sono la distanza satellite-bersaglio per le due acquisizioni; B rappresenta la baseline geometrica (esagerato per chiarezza) mentre z rappresenta l'altezza topografica rilevata.**

La baseline temporale, invece, causa un disturbo noto come temporal decorrelation che diventa più evidente nel caso in cui il tempo intercorso fra le due immagini SAR è molto lungo. Tale degradazione della qualità dipende dal fatto che nell'intervallo temporale, possono avvenire dei cambiamenti delle condizioni che rendono non valida l'eguaglianza dei termini di fase  $\phi_s$  fra le due immagini. Le cause principali di tale variazione sono:

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

variazioni della copertura vegetale (es. incendi o deforestazioni; tipo di vegetazione stagionale), gelate, disgeli, costruzione di opere e strutture o manufatti.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni. La presenza di disturbo atmosferico rappresenta uno dei principali limiti per l'osservazione delle deformazioni; con una sola coppia di immagini SAR, tuttavia, non è possibile stimare ed eliminare questo disturbo.

### **Analisi con metodologia Advanced DInSAR**

Lo sviluppo delle tecniche interferometriche multi-image (o Advanced DInSAR – A-DInSAR), ha rappresentato un notevole passo in avanti nell'analisi dei fenomeni deformativi della superficie terrestre attraverso l'uso di immagini SAR satellitari. Innanzitutto, l'uso di dataset composti da molte immagini SAR consente la stima e la rimozione del contributo atmosferico, che è in grado di nascondere i processi deformativi. Tali metodologie, inoltre, consentono l'analisi multitemporale dei processi deformativi con la possibilità di ottenere serie temporali di spostamento per molti oggetti sulla scena osservata.

La più nota tecnica A-DInSAR si basa sull'analisi di oggetti molto "stabili", da un punto di vista radaristico, e naturalmente presenti nell'area d'interesse. Tali target, caratterizzati da un'elevata qualità del segnale radar nel tempo, costituiscono dei veri e propri punti di misura (measurement point - MP) interferometrici (Kampes, 2006).

Tali "**punti di misura**" privilegiati, che il satellite identifica sul territorio hanno proprietà tali da consentire stime accurate della loro distanza dal sensore, con la possibilità di individuare e quantificare spostamenti di frazioni di centimetro. Sono buoni riflettori quei punti di misura che presentano una buona e stabile retrodiffusione del segnale radar emesso dal satellite. Tale caratteristica è propria di target come edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), tralicci e opere quali dighe, ponti ecc. In particolari condizioni, rappresentano dei buoni riflettori anche le rocce esposte.

Questa fitta rete naturale di "punti di misura" permette di conoscere sia lo spostamento locale (es. un singolo edificio), sia di ricostruire, su scala più ampia, l'andamento dei moti superficiali (es. frane, subsidenze, faglie, ecc.).

Alla base dell'individuazione di ogni punto di misura c'è un'analisi statistica di time series di immagini radar.

Le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura riguardano solo la componente dello spostamento e della velocità **lungo la linea di vista del sensore (LOS)**. Questo

ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

*implica che i movimenti misurati sono in realtà la proiezione degli spostamenti del punto lungo la **coniungente sensore-bersaglio**. In presenza di moti puramente verticali (es. subsidenza), il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plano-altimetrica degli spostamenti. Utilizzando una sola geometria di acquisizione non è in generale possibile distinguere i due contributi a meno di assunzioni a priori.*

*Inoltre, le misure di spostamento sono di tipo relativo nel tempo (rispetto all'acquisizione di riferimento, immagine master) e nello spazio (rispetto a un punto di riferimento considerato stabile, detto reference point).*

*Infatti, l'analisi prevede la scelta di un'immagine **master**, legata all'esigenza di minimizzare i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica. Si sceglie quindi come master l'immagine del dataset che minimizza la dispersione di baseline temporali e geometriche rispetto alle altre immagini del dataset, definite **slave**.*

*Le misure di velocità calcolate sono differenziali: esse non esprimono un valore assoluto di spostamento di un punto a terra ma indicano le velocità del punto di misura in relazione ad uno scelto come riferimento (il reference point). Tale punto è un target radar di misura che per ipotesi è considerato fermo e rispetto al quale tutte le altre velocità vengono calcolate.*

*A ciascun punto di misura è associato un valore di **coerenza temporale** che misura l'accordo tra i dati e i modelli di spostamento utilizzati in fase di analisi. Tuttavia, se le caratteristiche dei retrodiffusori cambiano tra un'osservazione e l'altra, la fase interferometrica contiene un rumore casuale che inficerà l'affidabilità dei risultati ottenuti. L'entità di tale rumore viene valutata attraverso l'immagine di coerenza fra le due immagini SAR della coppia interferometrica; in altri termini, la coerenza è una misura indiretta del disturbo della fase interferometrica. Il valore della funzione di coerenza varia fra 0 (assenza di correlazione fra pixel corrispondenti delle due SAR) e 1 (massima correlazione).*

*Dall'elaborazione con la tecnica A-DInSAR, si ricavano per ciascun punto di misura:*

- *la posizione (ovvero le sue coordinate geografiche: latitudine e longitudine);*
- *la velocità media di spostamento (lungo la congiungente sensore-bersaglio, LOS) in mm/anno, con una accuratezza in funzione del numero di immagini disponibili e del sensore utilizzato, che in condizioni ottimali raggiunge valori millimetrici;*
- *la serie storica di spostamento, a partire dal primo dato disponibile, con un'accuratezza pari a pochi millimetri sulla singola misura per i punti più affidabili.*



ATTO AGGIUNTIVO n.1 - Monitoraggio con Interferometria SAR  
Satellitare di un settore di 30ha

*Numerosi sono i vantaggi che questa tecnica di telerilevamento ha introdotto per l'indagine degli spostamenti:*

- *i punti di misura formano una “rete geodetica naturale”, ovvero sono oggetti già presenti sul territorio, quali edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), elementi antropici, rocce esposte, per i quali, grazie ai dati acquisiti dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), è possibile stimare misure di spostamento a partire dal 1992 per l'analisi dei fenomeni di deformazione superficiale (subsidenze, frane, faglie);*
- *l'estensione delle immagini permette di analizzare vaste aree in tempi ristretti;*
- *l'accuratezza delle misure è molto elevata, permettendo così l'individuazione di fenomeni lenti su vaste aree altrimenti non rilevabili;*
- *i risultati sono facilmente integrabili nei sistemi informativi territoriali permettendo così una rapida integrazione con altre tecniche di indagine;*
- *la doppia geometria di acquisizione migliora la qualità delle informazioni del fenomeno analizzato: infatti, scomponendo i vettori delle velocità nelle loro componenti (orizzontale e verticale) e combinando le due geometrie, è possibile risalire al vettore di spostamento sul piano orizzontale (E-W) e su quello verticale. La componente lungo la direzione N-S non può essere misurata poiché i sensori attualmente operativi seguono orbite orientate circa N-S.*

*È opportuno, inoltre, considerare i seguenti aspetti relativi alle analisi A-DInSAR:*

- *le misure sono possibili solo in corrispondenza dei punti di misura: è necessario, quindi, che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di punti (almeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte); infatti, in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettiche causate dalla topografia del terreno, non è possibile ottenere informazioni;*
- *l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida è molto difficile e alcuni tentativi sono possibili solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto; anche i fenomeni a cinematica impulsiva non possono essere monitorati con questa tecnica, soprattutto quando movimenti di entità centimetrica sono concentrati in tempi brevi ed in aree ristrette.*