

PARTE 2

Sommario

PARTE 2.....	1
2.1. Introduzione	2
2.2. La stazione GPS di Minerbio	2
2.3 Analisi della qualità del dato	4
2.4 Elaborazione dei dati	6
2.5 Confronto con analisi fornita dal Concessionario	14
2.6 Conclusioni relative all'analisi del dato GPS.....	14
2.7 Indicazioni dal confronto tra GPS e InSAR.....	15
2.8 Analisi dei segnali stagionali e confronto con i dati di produzione	17
2.9 Integrazione della Rete GPS	20
2.10 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG.....	23
Parte rete GPS	23

2.1. Introduzione

Una stazione di misura GPS continua, o più in generale una stazione Global Navigation Satellite System (GNSS) quando questa è in grado di registrare i segnali trasmessi da molteplici costellazioni di satelliti di posizionamento (es., GPS, Glonass, Galileo, ecc..), permette di ottenere una misura dell'evoluzione nel tempo della posizione di un punto sulla superficie terrestre con precisione millimetrica. Lo studio delle serie temporali di spostamento di stazioni GNSS è di fondamentale importanza in diverse applicazioni, che vanno dallo studio dei processi tettonici e vulcanici, allo studio di frane, subsidenze e deformazioni indotte da processi antropogenici. Una serie temporale di spostamento ottenuta da una stazione GNSS contiene segnali di diversa natura, derivanti da processi che agiscono su diverse scale spaziali e temporali. Il più importante di questi segnali, per applicazioni nel campo della geodinamica e della tettonica attiva, è la componente lineare (o velocità media di spostamento), che descrive il tasso con cui la stazione si sposta nelle componenti planari (est e ovest) e nella componente verticale, in un determinato sistema di riferimento. L'accuratezza e la precisione di questa misura dipendono dalla qualità del dato registrato dalla stazione, dalla lunghezza della serie temporale analizzata e dalla presenza e ampiezza di altri segnali stagionali e non stagionali.

Questo report descrive i risultati ottenuti dall'analisi dei dati registrati dalla stazione MINE della Stogit, installata nel sito di stoccaggio di Minerbio (BO), effettuata utilizzando elevati standard di elaborazione e post-processamento con lo scopo di inquadrare lo spostamento del suolo registrato da questa stazione nello stesso sistema di riferimento delle altre stazioni GNSS/GPS attive nell'area Italiana, e più in generale dell'area Euro-Mediterranea, analizzate all'INGV (es., Devoti et al., 2017). I dati della stazione MINE sono stati processati utilizzando uno dei software geodetici di riferimento, ampiamente utilizzato dalla comunità scientifica internazionale, che garantisce elevate precisioni ed accuratezze delle misure. La serie temporale di spostamento, definita in un sistema di riferimento globale internazionale e successivamente in un sistema di riferimento Euroasiatico, è stata analizzata al fine di stimare diversi parametri (velocità, spostamenti co- e post-sismici, ampiezza delle componenti stagionali), confrontata con le misure InSAR rese disponibili dal Concessionario e confrontata con i dati di produzione.

2.2. La stazione GPS di Minerbio

La stazione GPS di Minerbio della Stogit è stata installata il 17 dicembre 2008 ai margini del giacimento di Minerbio (Fig. 1). In Figura 2 viene mostrata la posizione della stazione MINE rispetto alle altre stazioni GPS/GNSS attive in Italia settentrionale, gestite da enti di ricerca pubblici (es., INGV, OGS), enti locali (regioni) e privati (es., Leica-Geosystem e Topcon-GeoTop).

La stazione è equipaggiata con strumentazione in grado di registrare i segnali della sola costellazione GPS. In particolare dalla data di installazione al 12 dicembre 2013 la stazione è equipaggiata con un ricevitore ASHTECH UZ-12, successivamente sostituito (il 12 dicembre 2013) con un ricevitore LEICA GR10.

L'antenna della stazione MINE è un modello Dual Frequency GPS, ossia in grado di registrare le portanti L1 e L2 della costellazione GPS. In particolare si tratta di una antenna Choke-Ring con elemento Dorne Margolin della Topcon, il modello TPSCR4, e dotata di duomo TPSH. L'antenna è stata monumentata su un cilindro di acciaio zincato con profilo a "L" ancorato con tasselli da muro alla parete di un edificio di proprietà della società stessa (Fig. 3). Questa tipologia di installazione è comune in reti GNSS per applicazioni di tipo topografico, ed è, per esempio, ampiamente utilizzata dalla rete di stazioni GPS della Regione Emilia Romagna. Per questa coppia antenna-duomo non esiste una calibrazione assoluta del centro di fase (<ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>), quindi i dati di MINE sono elaborati utilizzando la calibrazione assoluta disponibile per la sola antenna, senza duomo.

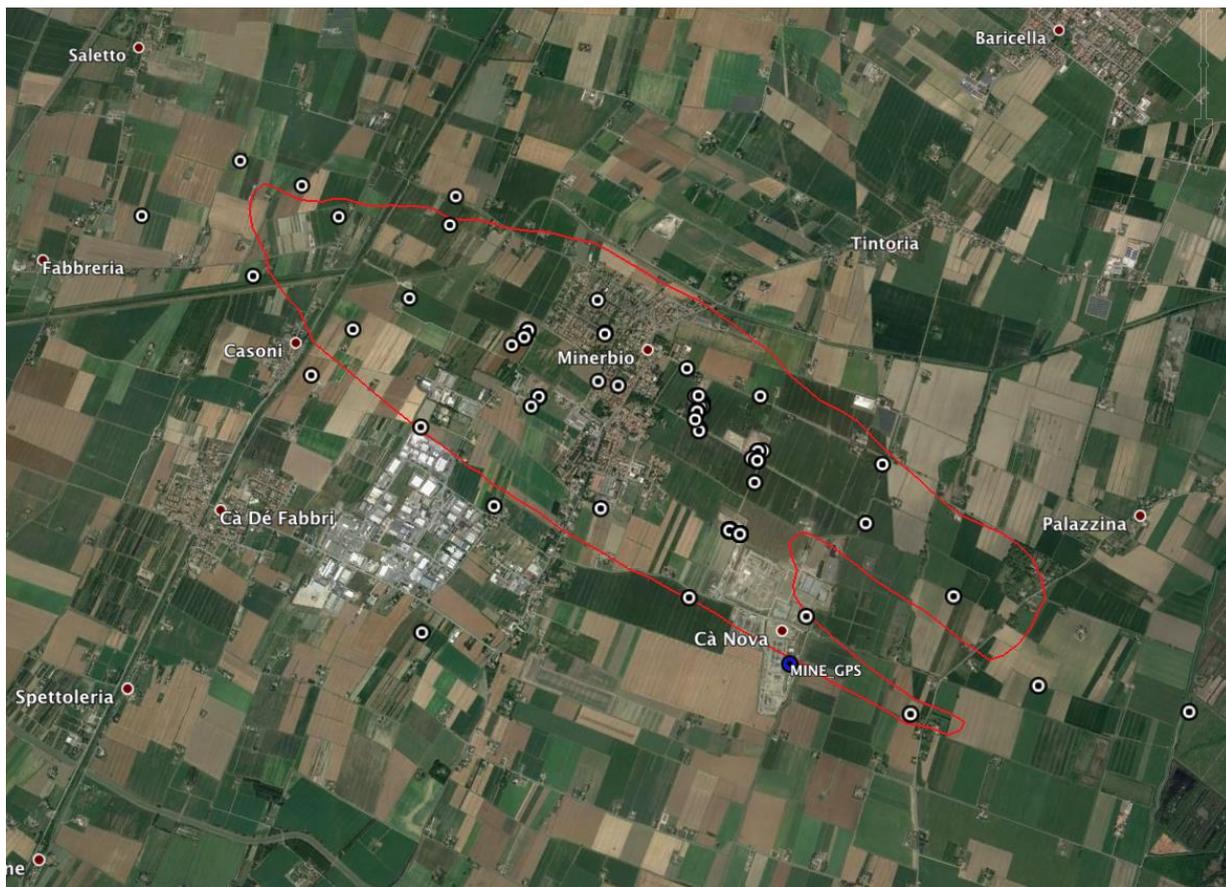


Figura 1. Posizione della stazione GPS di Minerbio (cerchio blu) rispetto al perimetro del giacimento (linea rossa) e dei pozzi (cerchi bianchi).

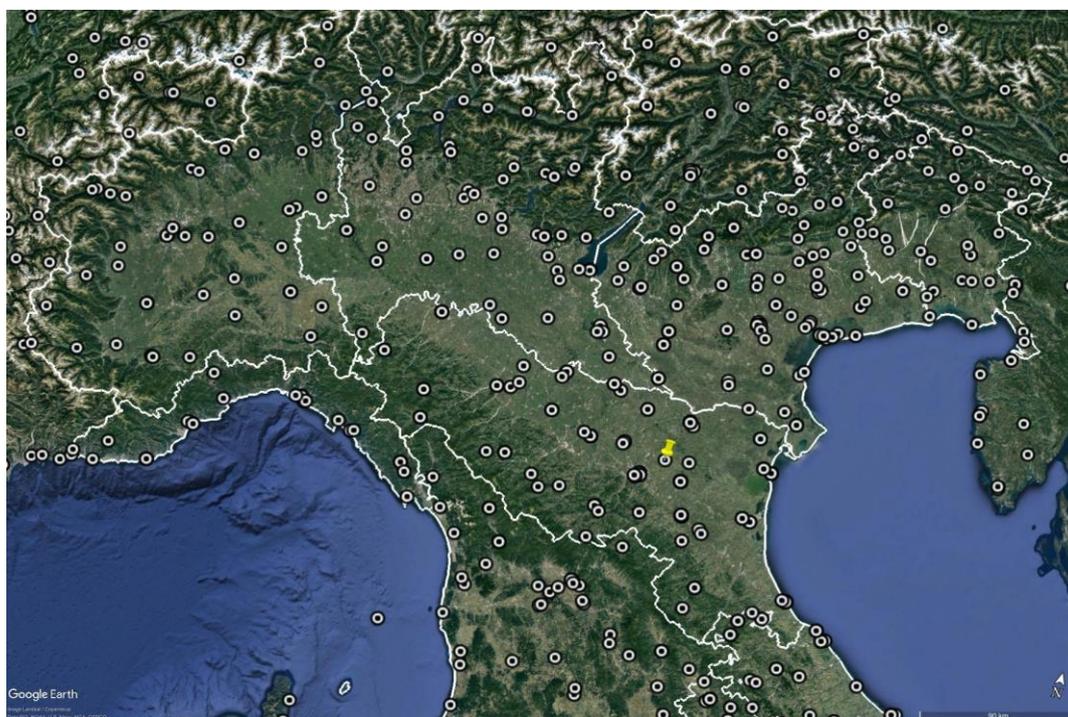


Figura 2. Posizione della stazione di Minerbio (in giallo) rispetto ad altre stazioni GNSS attive in Italia settentrionale ed afferenti a diverse reti (si veda Devoti et al., 2017).



Figura 3. Esempi di installazioni di antenne GNSS in reti non geofisiche. A sinistra è rappresentata la monumentazione geodetica della stazione MINE (Minerbio) della Stogit e a destra della stazione GUAS (Guastalla), della Rete di Stazioni Permanenti GNSS della Fondazione Geometri e Geometri Laureati dell'Emilia Romagna (<http://www.gpsemiliaromagna.it>).

2.3 Analisi della qualità del dato

I dati RINEX giornalieri della stazione MINE sono stati analizzati con il software TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>), che rappresenta uno standard internazionale per il trattamento in fase di pre-processamento di dati GPS e per la valutazione della loro qualità. A questo scopo, gli indici principalmente utilizzati sono i seguenti (in parentesi sono indicati i valori riscontrati su stazioni di buona qualità):

MP1: root mean square (RMS) dato dai multipath sulla fase L1, ossia dovuto a riflessioni del segnale radio inviato dai satelliti che influiscono sul corretto calcolo della distanza satellite-ricevitore (0.1-0.5 m);

MP2: RMS dato dai multipath sulla fase L2 (0.1-0.5 m).

Ricordiamo che prendendo come riferimento la rete IGS dell'International GNSS Service (<http://igsb.jpl.nasa.gov>), il 50% delle stazioni IGS ha valori di RMS per MP1 inferiori a 0.4 m e valori di MP2 inferiori a 0.6 m, mentre 2/3 delle stazioni ha valori di MP1 inferiori a 0.5 m e di MP2 inferiori a 0.75 m.

In Fig. 4 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1 e MP2 della stazione MINE nell'intervallo di tempo considerato in questa analisi: 1 gennaio 2008 - 30 marzo 2019.

I valori di MP1 e MP2 dal 2009 al 2014 sono mediamente inferiori a 0.1, mentre dal 2014 si nota un aumento con valori medi che si attestano attorno a 0.2.

Questa variazione coincide con la sostituzione del ricevitore, che in data 12 dicembre 2013 è passato da ASHTECH UZ-12 (di cui nei file RINEX non è mai indicato il firmware) a LEICA GR10 (con firmware 3.03/6.214).

Si nota inoltre un aumento significativo dei valori di MP1 e MP2 per un breve periodo a cavallo tra il 6 e il 28 giugno 2016. Queste variazioni sono legate alla presenza di attività di cantiere sull'edificio e alla presenza di ostacoli o infrastrutture che hanno causato un aumento significativo del disturbo da multipath.

In generale, i valori di MP1 e MP2 dei dati analizzati indicano una stazione di buona qualità. Inoltre, la stazione MINE mostra una ottima continuità del dato, con un numero molto ridotto (5) di giorni mancanti.

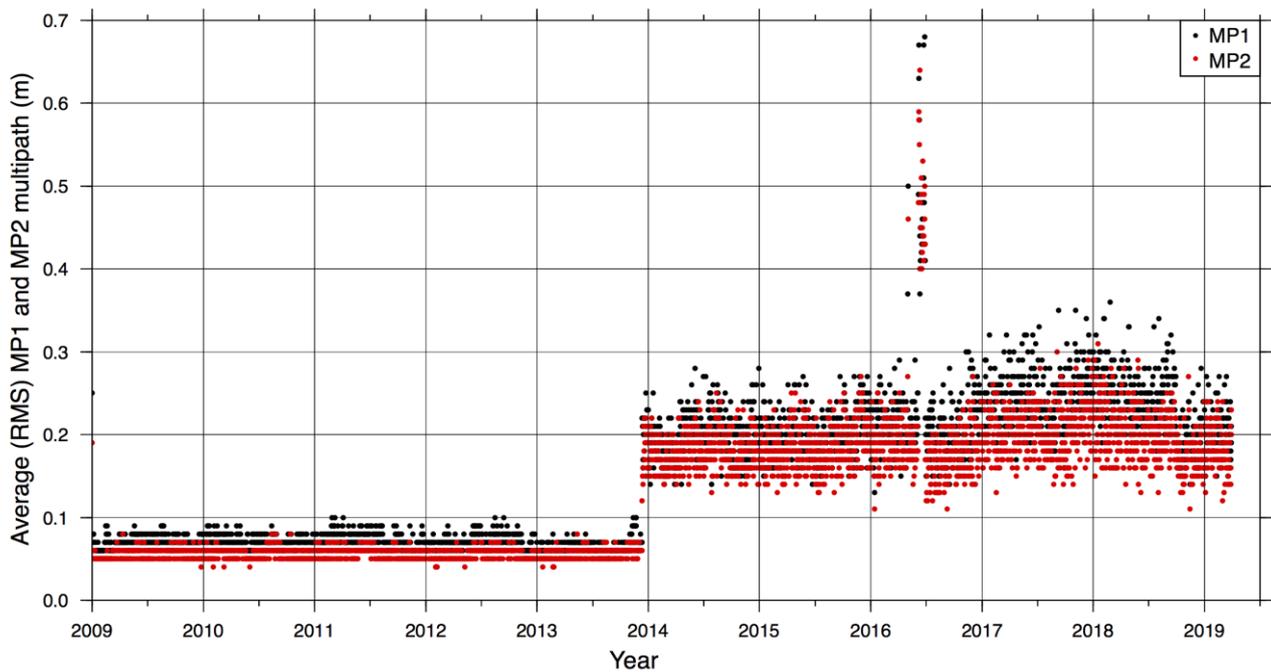


Figura 4. Andamento dei valori di MP1 (in nero) e MP2 (in rosso) ottenuti dall'analisi dei dati RINEX della stazione MINE con il software TEQC.

2.4 Elaborazione dei dati

I dati giornalieri in formato RINEX sono stati analizzati seguendo una procedura basata su tre diversi passaggi, come descritto in Serpelloni et al. (2006, 2013), che consiste in: 1) analisi delle fasi, ossia delle osservazioni registrate alle stazioni GPS di una sotto-rete (o cluster), denominata MNRB, che include la stazione MINE più altre stazioni GPS permanenti (Fig. 5), e realizzazione di una soluzione di rete debolmente vincolata (posizioni, orbite, ecc...), 2) combinazione delle soluzioni giornaliere della sottorete MNRB con le soluzioni di altre sotto-reti processate all'INGV e allineamento delle soluzioni al sistema di riferimento Igb08 e 3) analisi delle serie temporali per la stima delle velocità di spostamento e delle incertezze.

In particolare, la stazione MINE è stata analizzata in un cluster che contiene le stazioni appartenenti alla rete SOGER della Regione Emilia-Romagna (<http://www.gpsemiliaromagna.it>), alcune stazioni afferenti alla rete Europea EUREF (<http://www.epncb.oma.be>) e alcune stazioni afferenti alla rete commerciale Leica-ITALPOS (<http://smartnet.leica-geosystems.it>). Le stazioni EUREF, in particolare, sono quelle poi usate per combinare le soluzioni di questa sotto-rete con quelle delle altre sotto-reti elaborate all'INGV.

1) In questa fase è stato utilizzato il pacchetto GAMIT (versione 10.70) del software per analisi dati GPS scientifico denominato GAMIT/GLOBK (<http://www.gpsg.mit.edu/~simon/gtgk>), adottando gli standard definiti nel contesto della campagna di riprocessamento IGS, "Repro2 campaign" (<http://acc.igs.org/reprocess2.html>). I dati sono stati tutti analizzati utilizzando come modello dei centri di fase delle antenne l'ultima versione IGS14. Questo software è una collezione di programmi sviluppati per analizzare i dati registrati da stazioni GPS (e più in generale GNSS) e stimare le posizioni tridimensionali dei punti a terra e delle orbite dei satelliti, i ritardi troposferici e i parametri di orientazione terrestre (EOPs). Il GAMIT utilizza diverse combinazioni lineari delle due fasi GPS registrate (L1 e L2) per generare una soluzione ai minimi quadrati pesati per ogni sessione giornaliera. Il prodotto principale del software GAMIT è quindi una soluzione debolmente vincolata (cioè non vincolata ad un preciso sistema di riferimento) per ogni rete (o sotto-rete) analizzata, contenente un set giornaliero di stime di posizioni per ogni sito, i parametri di orientazione terrestre e la matrice di covarianza degli errori associata, oltre ai parametri orbitali e di ritardo troposferico.

2) In questa fase è stato utilizzato il pacchetto ST_FILTER del software QOCA (<https://qoca.jpl.nasa.gov>), che permette di combinare diverse soluzioni debolmente vincolate (ottenute dall'analisi con il software GAMIT), attraverso un algoritmo basato su un filtro di Kalman (Dong et al., 1998, 2002), e realizzare un'unica soluzione combinata giornaliera definita in un sistema di riferimento comune. Nello specifico, il sistema di riferimento è stato realizzato minimizzando le coordinate e le velocità delle stazioni IGS08 di riferimento a scala globale (<http://www.igs.org/network/>), stimando i parametri di una trasformazione di Helmert a 7 parametri (3 traslazioni, 3 rotazioni e scala) rispetto alla realizzazione GPS del sistema di riferimento ITRF2008 (Altamimi et al., 2011), noto come IGS08 (Rebischung et al., 2011), e suo successivo aggiornamento a Igb08, (<http://acc.igs.org/igs-frames.html>). Il risultato di questo passaggio sono le posizioni tridimensionali e le incertezze per ogni epoca analizzata, per tutte le stazioni analizzate all'INGV.

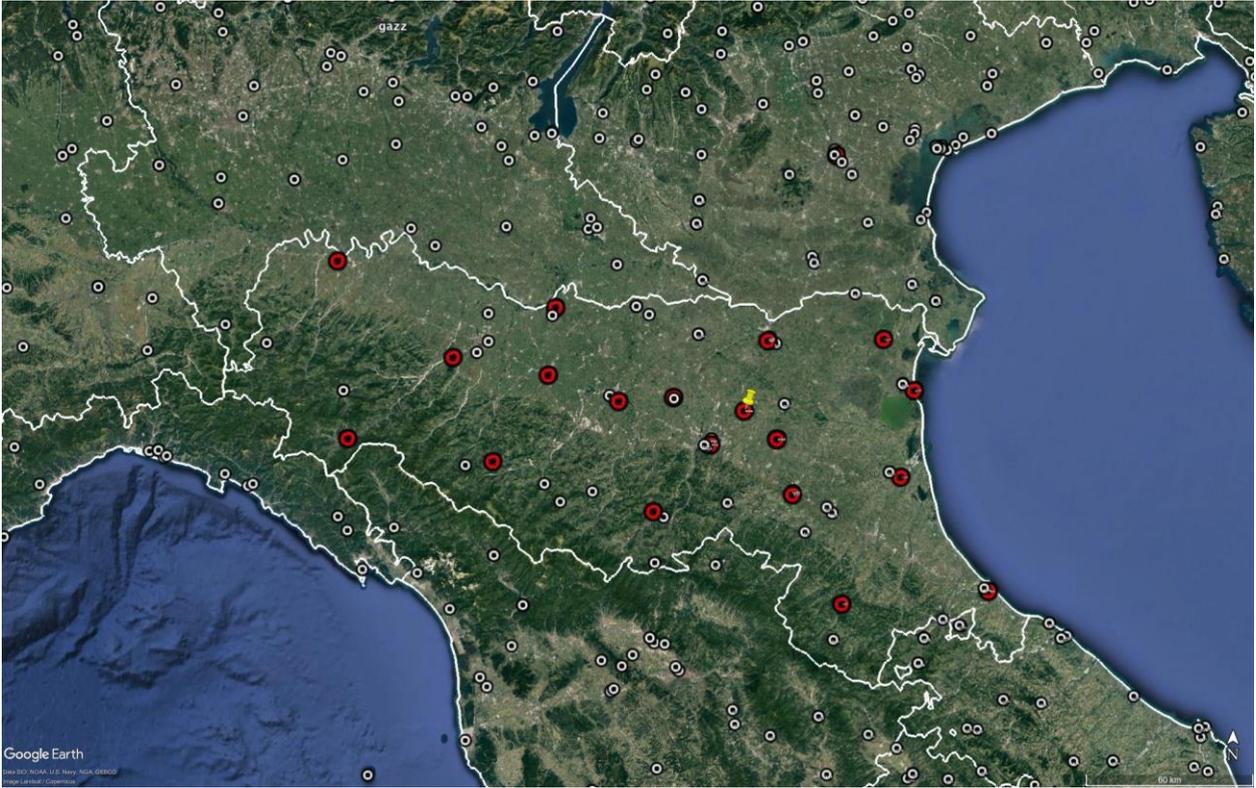


Figura 5. Stazioni GPS permanenti incluse nel cluster MNRB che include la stazione di Minerbio.

3) In questa fase le serie temporali delle posizioni delle stazioni, realizzate nel sistema di riferimento IGB08, sono state analizzate al fine di stimare le velocità medie di spostamento nelle tre componenti, est, nord e verticale. La variazione della posizione di una stazione GPS nel tempo, $f(t_i)$, è stata rappresentata con il seguente modello funzionale:

$$f(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t - t_j) + \sum_{j=1}^{n_e} A_j \left[1 - \exp\left(-\frac{t_e}{\tau_{au}}\right) \right] + \varepsilon_i \quad [1]$$

dove $[a + bt_i]$ rappresenta il trend lineare, a è il bias iniziale, b indica la pendenza della serie, cioè la velocità di spostamento, $[c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i)]$ rappresenta la componente stagionale (annuale e semiannuale, con t_i espresso in anni), la sommatoria in j $\sum g_j H(t - t_j)$ rappresenta invece la correzione per un certo numero di offset n_o di ampiezza g_j al tempo t_j descritti tramite una funzione gradino di Heaviside.

Anche eventuali salti provocati da eventi co-sismici sono modellati con una funzione di questo tipo. La componente $\sum_{j=1}^{n_e} A_j \left[1 - \exp\left(-\frac{t_e}{\tau_{au}}\right) \right]$ rappresenta infine la descrizione del transiente post-sismico, dovuto ad un numero n_e di eventi cosismici, modellato attraverso un andamento esponenziale di ampiezza A_j e un tempo caratteristico di decadimento τ_{au} . Infine ε_i rappresenta la componente di errore casuale.

E' importante considerare che la letteratura scientifica concorda nel definire la lunghezza minima di una serie temporale GPS per una stima della velocità media non influenzata dai segnali stagionali dai 2.5 ai 3 anni (e.g., Blewitt and Lavallée, 2002), ma questo può non essere vero in caso di evento sismico, se non vengono propriamente modellati i segnali transienti legati al terremoto, oltre al caso in cui siano presenti altri segnali transienti, anche di natura non-tettonica (es., Serpelloni et al. 2018).

L'ampiezza degli offset co-sismici è stata stimata usando le posizioni calcolate pochi giorni prima e pochi giorni dopo i due mainshock del 20 e 29 maggio 2012 (Fig. 6).

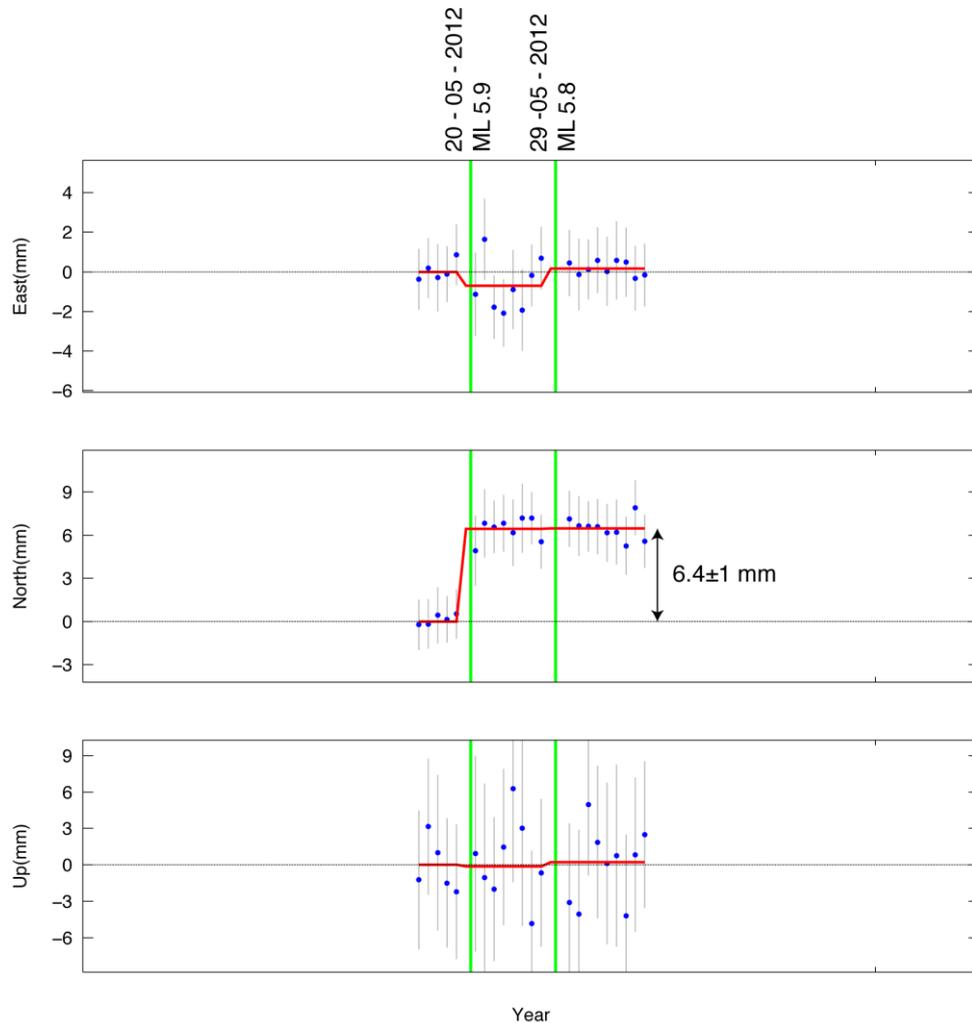


Figura 6. Spostamenti co-sismici associati agli eventi del 20 e 29 maggio 2012 della sequenza Emiliana (indicati dalle linee verdi), per le componenti est, nord e verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ). La linea rossa rappresenta la media corrente.

I valori sono riportati in Tabella 1.

Il transiente di deformazione post-sismica è stato modellato assumendo un andamento nel tempo di tipo esponenziale, come descritto in [1]. Data la vicinanza temporale dei due mainshock per questa stazione abbiamo assunto che la deformazione post-sismica sia descritta da un solo valore di ampiezza e del tempo caratteristico di decadimento, che sono stati stimati utilizzando un approccio non-lineare ai minimi quadrati, attraverso la funzione “lsqcurvefit” di Matlab.

In Tabella 2 sono riportati i valori stimati per l'ampiezza e la costante di decadimento.

	E (mm)	N (mm)	S_E (mm)	S_N (mm)	V (mm)	S_V (mm)
20/5/12 MI 5.9	-0.706	6.430	0.934	1.070	-0.136	3.495
29/5/12 MI 5.8	0.868	0.039	0.848	0.983	0.352	3.233

Tabella 1. Spostamenti co-sismici associati agli eventi del 20 e 29 maggio 2012 della sequenza Emiliana (linee verdi in Fig. 7), dove E, N e U indicano gli spostamenti (in mm) nella direzione est, nord e verticale, e S_E, S_N e S_V le incertezze (in mm) associate agli spostamenti nelle componenti est, nord e verticale, rispettivamente.

	E	N	Up
A (mm)	-1.82	5.712	-9.95
Tau (year)	0.3	0.42	0.47

Tabella 2. Ampiezza (A) e costante di decadimento (Tau) del segnale pos-sismico (descritto come in [1]) registrato dalla stazione MINE a seguito del mainshock del 20 maggio 2012 per le componenti East (E), Nord (N) e verticale (Up).

La Figura 7 mostra l'andamento della serie temporale di spostamento nel sistema di riferimento IGb08 (cerchi blu) aggiornata al 30 marzo 2019, dove in rosso è mostrato il modello, ottenuto adottando il modello funzionale descritto in [1].

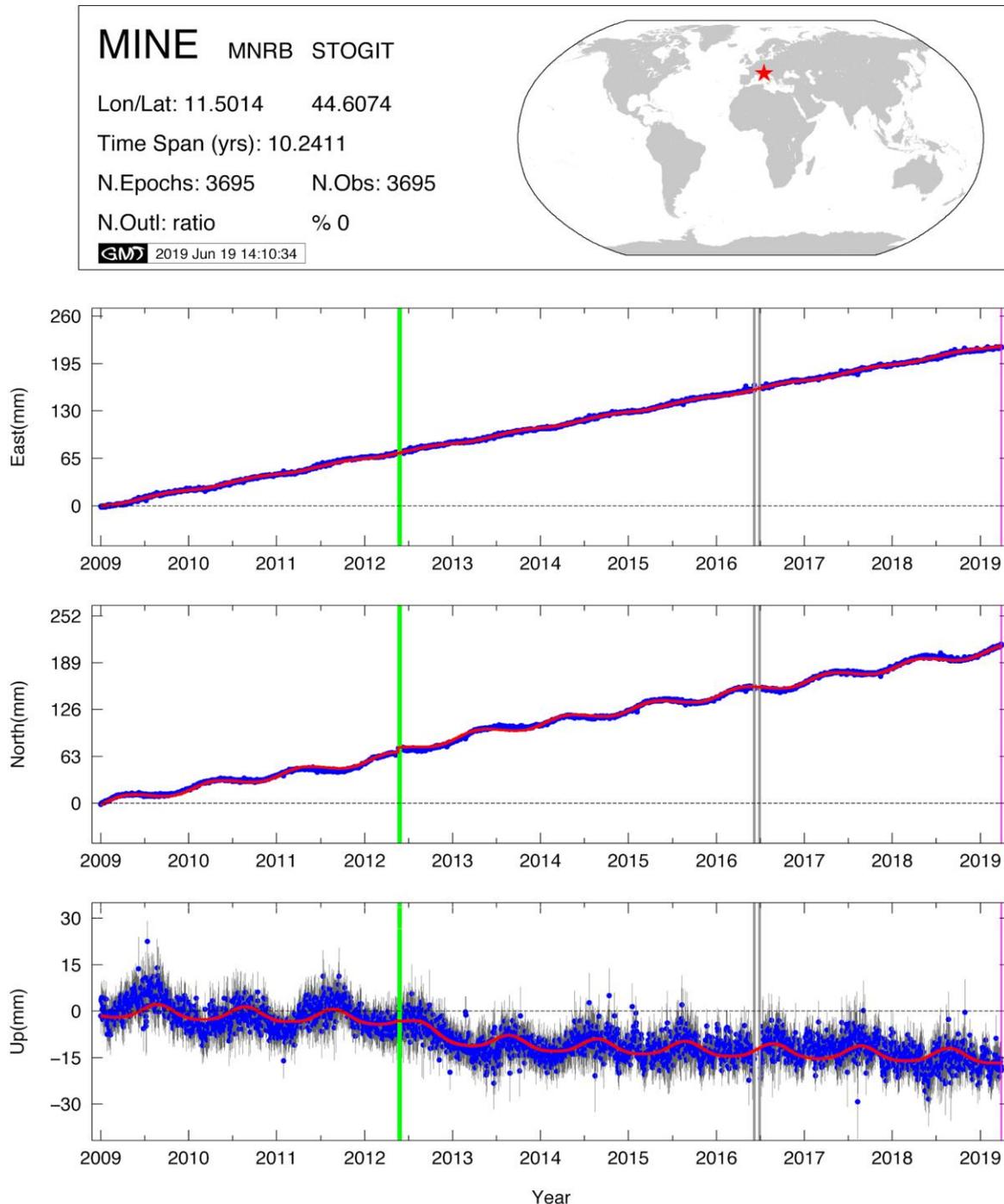


Figura 7. Serie temporale di spostamento della stazione MINE nel sistema di riferimento globale IGb08. Le barre grigie associate ai punti blu indicano le barre d'errore (1σ). Le linee verdi rappresentano i due mainshock della sequenza del 2012. Le linee grigie indicano il periodo in cui i valori di MP1 e MP2 sono più alti (Fig. 4) e i cui dati sono stati esclusi dall'analisi. La linea rosa indica il doy 089 del 2019, ossia il 30 marzo 2019, data dell'ultimo aggiornamento dati.

In Tabella 3 e 4 sono riportati i valori delle ampiezze delle componenti stagionali di periodo annuale e semiannuale, rispettivamente.

E (mm)	N (mm)	S_E (mm)	S_N (mm)	V (mm)	S_V (mm)
1.476	5.332	0.037	0.042	2.222	0.142

Tabella 3. Ampiezza della componente annuale (in mm) per le componenti est (E), nord (N) e verticale (V), e rispettive incertezze (S_E, S_N e S_V).

E (mm)	N (mm)	S_E (mm)	S_N (mm)	V (mm)	S_V (mm)
0.121	0.329	0.037	0.042	0.397	0.140

Tabella 4. Ampiezza della componente semi-annuale (in mm) per le componenti est (E), nord (N) e verticale (V), e rispettive incertezze (S_E, S_N e S_V).

In Tabella 5 sono indicate le velocità orizzontali e verticale, nel sistema di riferimento IGB08, ottenute utilizzando la serie temporale di spostamento fino al 30 marzo 2019. Relativamente alle incertezze, queste sono state stimate assumendo un modello di tipo White+Flicker noise, come descritto in Serpelloni et al. (2013). In Tabella 6 sono indicati i valori degli RMSE (radice dell'errore quadratico medio) normalizzati (NRMS) e pesati (WRMS) ottenuti dall'analisi della serie temporale di spostamento.

VE (mm/anno)	VN (mm/anno)	S_VE (mm/anno)	S_VN (mm/anno)	Vup (mm/anno)	S_Vup (mm/anno)
21.652	18.894	0.077	0.167	-0.744	0.215

Tabella 5. Velocità di spostamento, e relative incertezze, della stazione MINE (in mm/anno) nel sistema di riferimento IGB08. VE, VN e Vup indicano le velocità nelle componenti est, nord e verticale, rispettivamente, e S_VE, S_VN e S_Vup le relative incertezze.

NRMS_E	NRMS_N	NRMS_V	WRMS_E (mm)	WRMS_N (mm)	WRMS_V (mm)
0.703	1.118	0.561	1.090	1.964	3.285

Tabella 6. Valori degli RMSE normalizzati (NRMS) e pesati (WRMS) per le tre componenti est (RMS_E), nord (RMS_N) e verticale (RMS_V), ottenuti dall'analisi della serie temporale secondo il modello funzionale descritto in [1].

La Figura 8 mostra la serie temporale residua dopo aver rimosso il trend lineare, gli offset cosismici e il transiente post-sismico. La Figura 9, invece, rappresenta la serie residua ottenuta dopo aver rimosso tutti i parametri stimati in [1].

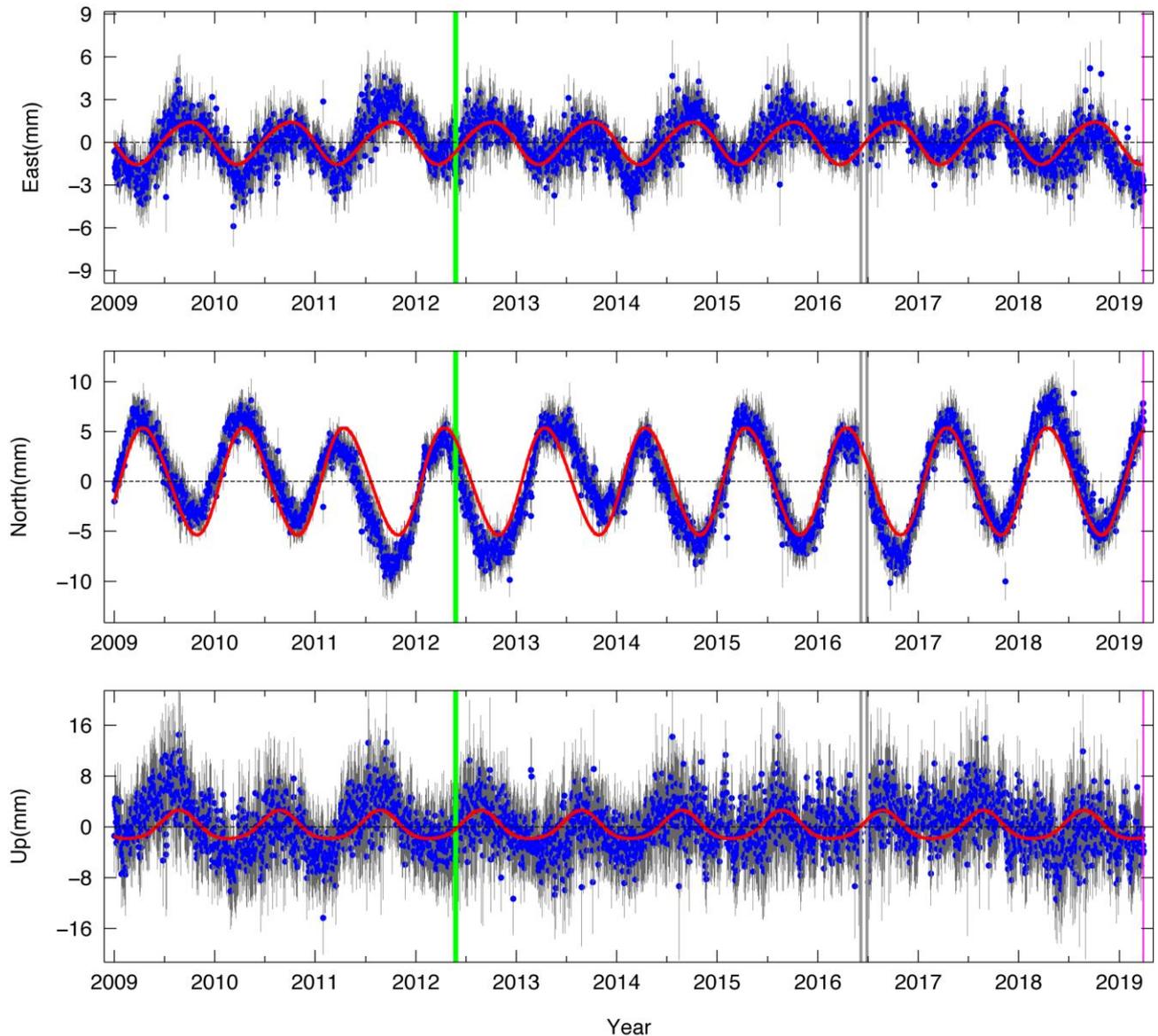


Figura 8. Serie temporale della stazione MINE dopo aver rimosso il trend lineare, gli offset co-sismici ed il segnale post-sismico come definito in [1]. Le barre grigie associate ai punti blu indicano le barre d'errore (1σ). La linea rossa rappresenta il modello per la componente stagionale, con periodo annuale e semiannuale, come definito in [1].

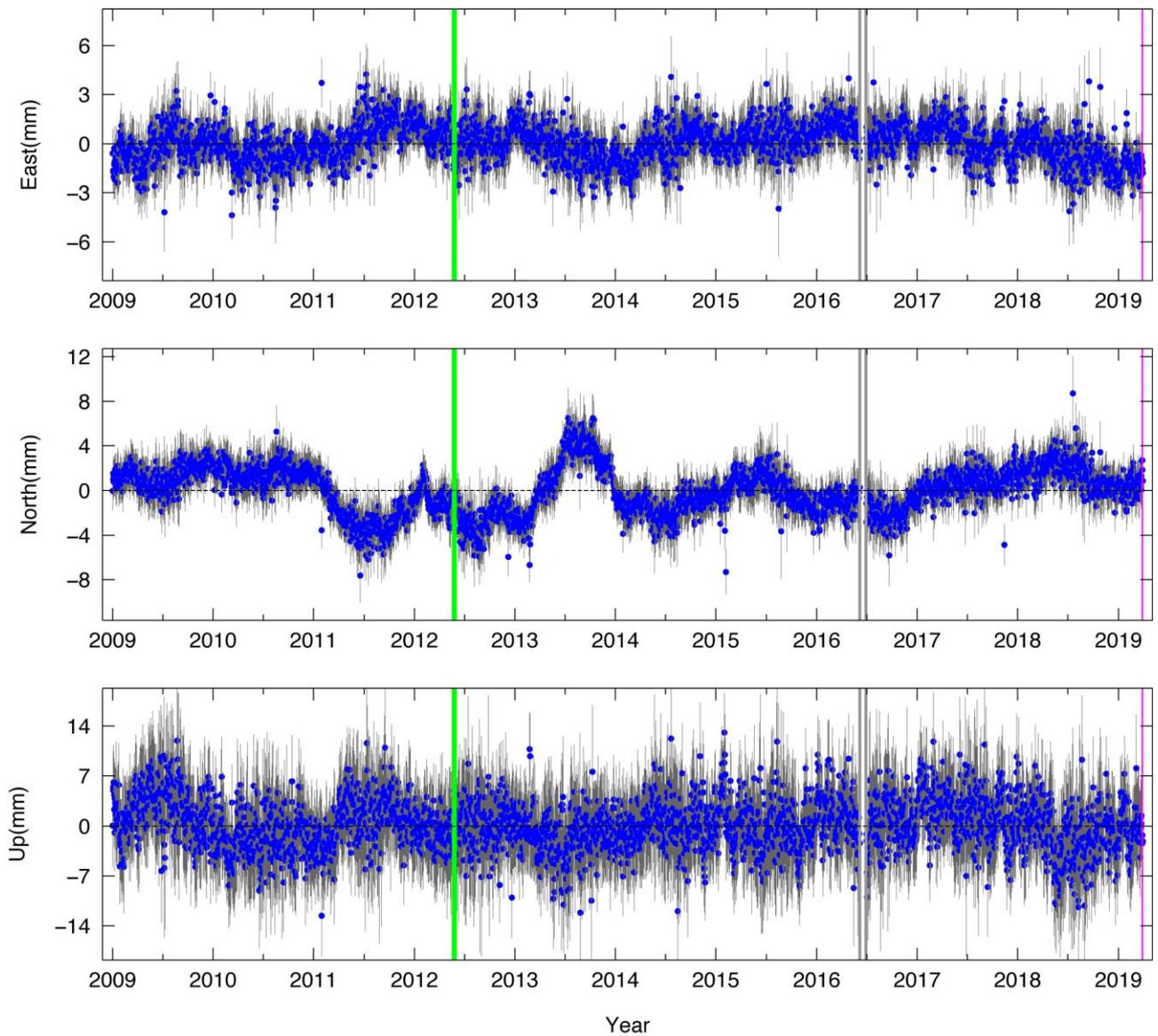


Figura 9. Serie temporale residua della stazione MINE dopo aver rimosso anche le componenti stagionali (annuale e semiannuale), rispetto alla serie di Fig. 8.

2.5 Confronto con analisi fornita dal Concessionario

La stazione GPS di Minerbio, gestita da Stogit è installata al margine meridionale del perimetro del giacimento di Minerbio (Fig. 1). Il processamento dei dati RINEX, e le procedure utilizzate nella fase di post-processamento, sono state eseguite utilizzando i più elevati standard di analisi, garantendo così una analisi indipendente da quella del Concessionario allo stato dell'arte.

Le velocità nel sistema di riferimento IGB08 stimate dal Concessionario, sono riportate in Tabella 7 (quelle stimate dall'analisi INGV in Tabella 5).

	VE (mm/anno)	VN (mm/anno)	S_VE (mm/anno)	S_VN (mm/anno)	Vup (mm/anno)	S_Vup (mm/anno)
STOGIT	21.82	18.97	0.01	0.03	-0.96	0.02

Tabella 7. Velocità di spostamento, e relative incertezze, della stazione MINE (in mm/anno) nel sistema di riferimento IGB08, così come stimate dal Concessionario. VE, VN e Vup indicano le velocità nelle componenti est, nord e verticale, rispettivamente, e S_VE, S_VN e S_Vup le relative incertezze.

Le differenze tra le velocità stimate dall'INGV (Tabella 5) e quelle stimate dal Concessionario, sono molto piccole, nonostante lo schema di processamento e post-processamento utilizzato sia diverso. Le incertezze associate alle stime di velocità del Concessionario sono molto più piccole rispetto a quelle stimate dall'analisi effettuata dall'INGV, trattandosi delle incertezze formali della regressione ai minimi quadrati, che notoriamente fornisce valori sottostimati della reale incertezza rispetto al considerare una componente di errore "colorato", come in questa analisi (e.g., Williams et al., 2004). Ad ogni modo, gli spostamenti co-sismici, ed il segnale di deformazione post-sismica, associati soprattutto all'evento del 20 maggio 2012, sono sicuramente da tenere in considerazione nella modellazione delle serie temporali, nonostante i valori delle velocità stimati calcolando o no questi parametri siano del tutto consistenti. Infatti, la ricerca di segnali di deformazione associati all'attività del sito di stoccaggio deve essere fatta su serie temporali di spostamento in cui almeno i segnali di origine tettonica noti (velocità, spostamenti co-sismici e post-sismici) siano stati modellati e rimossi dalle serie originali.

2.6 Conclusioni relative all'analisi del dato GPS

I dati della stazione GPS di Minerbio, gestita da Stogit ed installata al margine meridionale del perimetro del giacimento di Minerbio, sono stati elaborati fino al 30 marzo 2019. Il processamento dei dati RINEX e l'analisi delle serie temporali, sono stati eseguiti utilizzando i più elevati standard di analisi.

La stazione MINE si conferma caratterizzata da un'ottima continuità del dato, oltre che da valori dei parametri MP1 e MP2, rappresentativi di disturbi da multipath, in linea con le migliori stazioni GPS permanenti analizzate all'INGV.

I valori dei tassi di spostamento nelle tre direzioni, E, N e Up, ottenuti dall'analisi delle serie temporali di spostamento aggiornati al 30 marzo 2019 rimangono del tutto consistenti con quelli misurati alle altre stazioni CGPS attive nell'area. In Figura 10 è mostrata una mappa aggiornata al 30 marzo 2019 delle velocità orizzontali (rispetto alla placca Euroasiatica) e verticali (nel sistema di riferimento IGB08).

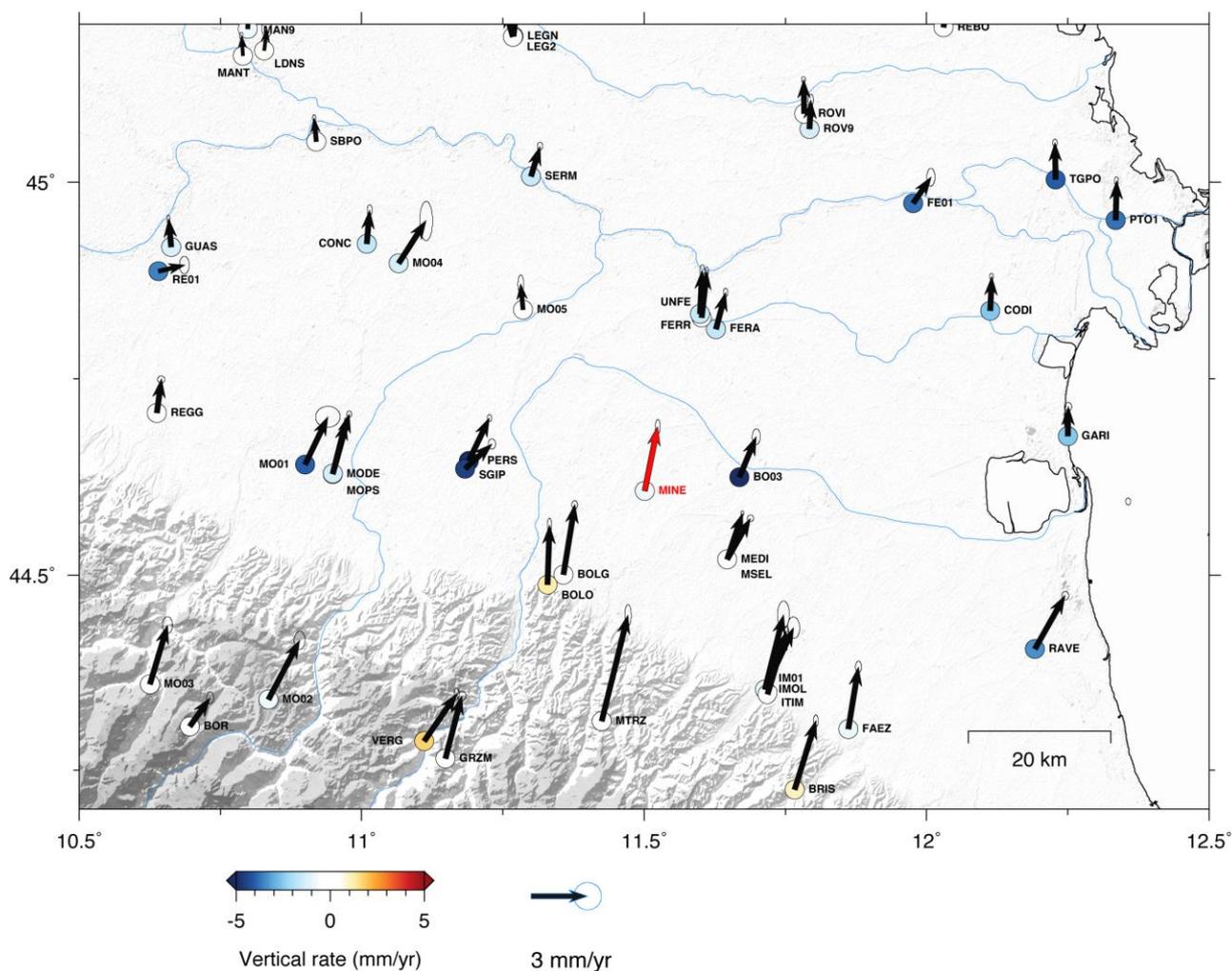


Figura 10. Campo di velocità orizzontale (freccie), rispetto ad Eurasia, e verticale (cerchi colorati), aggiornato al 30 marzo 2019. Le ellissi d'errore sono al livello di confidenza del 95%. La freccia relativa al campo di velocità per Minerbio è evidenziata con il colore rosso.

La serie temporale di spostamento, corretta per il trend lineare, gli offset co-sismici e la deformazione post-sismica (Fig. 8), mostra un andamento stagionale con periodo annuale, la cui ampiezza massima è osservata nella componente nord (~5 mm). In particolare, è evidente come il segnale stagionale nelle componenti orizzontali sia in opposizione di fase, indicando uno spostamento in direzione NNW-SSE con periodo annuale, con intensità comparabile a quella misurata nella componente Nord, essendo quella predominante.

2.7 Indicazioni dal confronto tra GPS e InSAR

I prodotti dell'analisi dei dati InSAR forniti dal Concessionario (serie temporali lungo la linea di vista del satellite e lungo la componente verticale, est-ovest e relative velocità medie) sono stati utilizzati per un confronto con gli spostamenti registrati alla stazione MINE. In particolare, sono stati selezionati i pixel SAR disponibili in corrispondenza della stazione GPS MINE. Sono state messe a confronto le serie temporali di spostamento per la componente verticale, direzione verso la quale le misure InSAR sono più sensibili e maggiormente accurate.

Per le serie temporali di spostamento InSAR è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard dei pixel selezionati per valutare la dispersione del segnale.

Le due serie temporali (Fig. 11) sono state messe a confronto agganciando la serie temporale InSAR mediata al punto origine della serie temporale GPS.

La Figura 11 evidenzia che la serie temporale InSAR presenta un andamento prevalentemente lineare con oscillazioni che non presentano un carattere stagionale evidente, se non tra il 2004 ed il 2008. Il segnale di deformazione post-sismica è meno evidente che nella serie GPS, anche se una variazione di trend nella serie InSAR sembra in accordo con quella evidenziata durante la fase post-sismica dalla stazione MINE.

La velocità media (negativa, ossia in subsidenza) dei pixel InSAR, come fornita dal Concessionario, è di -1.45 ± 0.2 mm/anno, circa il doppio di quella stimata dai dati GPS MINE (-0.744 ± 0.2 mm/anno). Questa differenza può essere legata al diverso intervallo temporale su cui viene stimata la velocità, oltre che al modello funzionale utilizzato per analizzare la serie temporale di spostamento. Inoltre, tale differenza è legata al fatto di non aver considerato nella stima della velocità InSAR il segnale post-sismico.

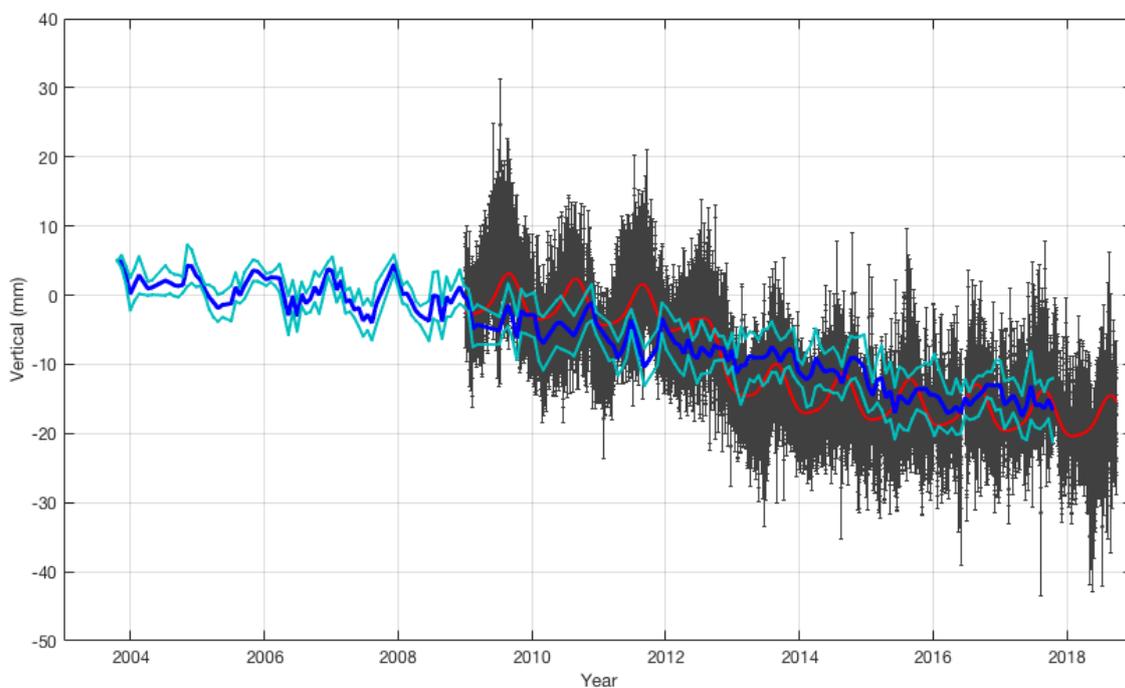


Figura 11. Serie temporale di spostamento verticale della stazione GPS MINE (punti grigio scuro con barre d'errore 1σ e modello della serie temporale in rosso) e dei pixel InSAR che cadono nello stesso punto, rappresentati con il valore medio (linea blu) e la deviazione standard (linee celesti) delle misure.

2.8 Analisi dei segnali stagionali e confronto con i dati di produzione

Rimuovendo dalla serie temporale GPS di spostamento nel sistema di riferimento IGB08 la velocità a lungo termine e i segnali relativi alla sequenza sismica del 2012 (offsets cosismici e transiente post-sismico), si ottiene la serie temporale residua contenente i segnali stagionali (Figura 8). La presenza di segnali stagionali, di periodo annuale, nelle serie temporali GPS è nota da tempo. Questi spostamenti stagionali sono dovuti prevalentemente a effetti di variazioni di carico causate dalla ridistribuzione di masse fluide sulla superficie terrestre (e.g., Dong et al., 2002). Le variazioni di carico che inducono una risposta elastica della crosta terrestre includono variazioni della massa d'aria che si traduce in un cambiamento della pressione dell'aria superficiale, variazioni del livello degli oceani a causa delle maree terrestri e solari, del vento e della pressione atmosferica, e, soprattutto, variazioni nell'umidità del suolo (carico idrologico superficiale).

In Figura 12 la serie temporale residua (Figura 8) è messa a confronto con con gli spostamenti causati dalle variazioni di carico idrologico superficiale (il cosiddetto “surface hydrological mass loading”). In particolare sono stati utilizzati gli spostamenti calcolati dall'EOST Loading Service (<http://loading.u-strasbg.fr/>), associati a variazioni di carico calcolato a partire dal modello idrologico superficiale ERA-interim (ri-analisi ECMWF), forniti come valori medi su una griglia di risoluzione di un quarto di grado. Il confronto, mostrato in Figura 12, mostra come la componente stagionale registrata nella componente verticale della stazione GPS di MINE sia dovuto in larga parte alla variazione di carico idrologico (il modello idrologico, in ciano, segue bene il modello stagionale analitico, in rosso, sia in termini di fase che di ampiezza), mentre quest'ultimo non spiega gli spostamenti stagionali osservati sulle componenti planari.

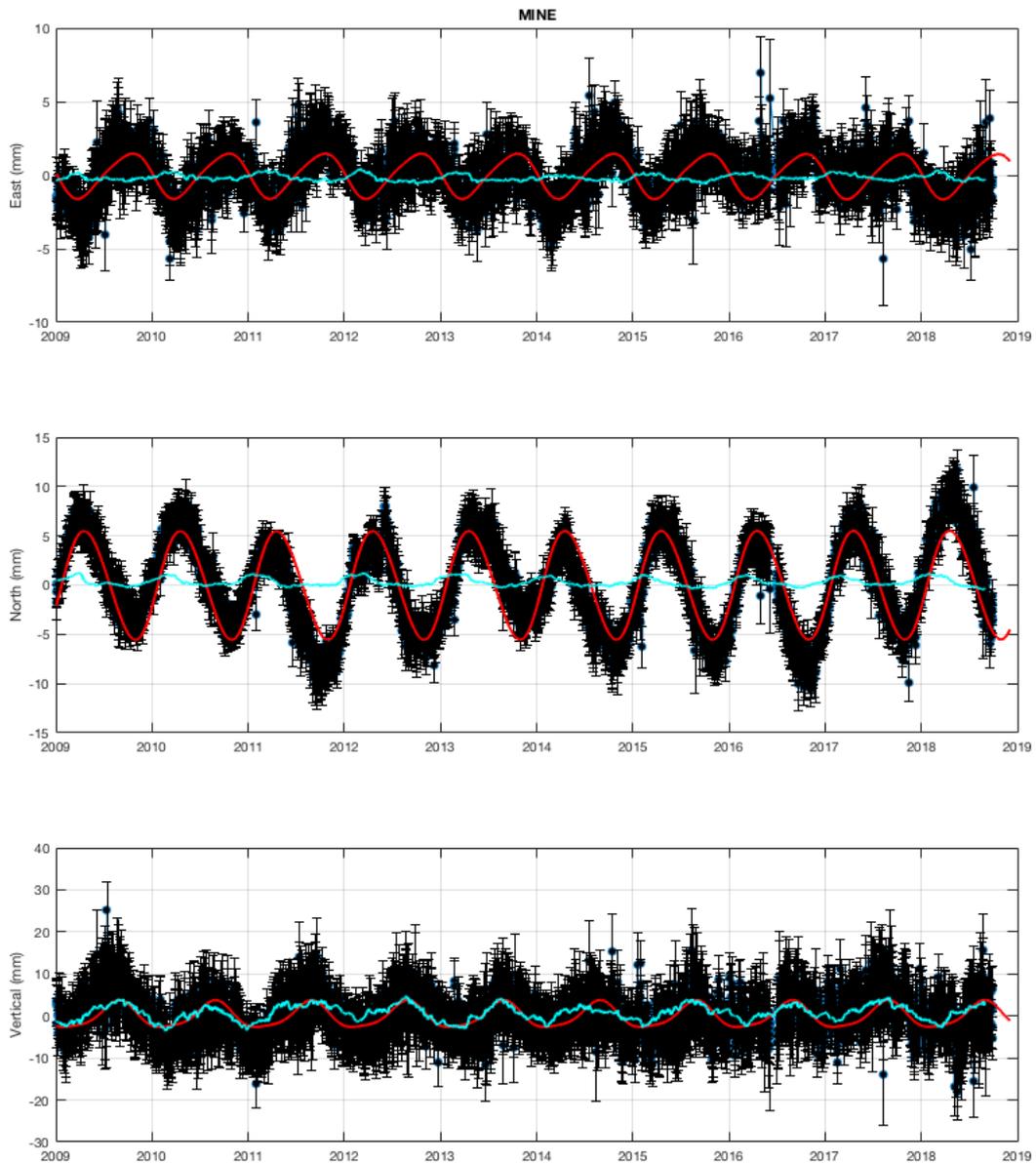


Figura 12. Serie temporale residua (punti neri con barre d'errore 1σ) della stazione MINE dopo aver rimosso gli offset co-sismici, il trend lineare ed il segnale post-sismico. La linea rossa rappresenta il modello analitico per la componente stagionale, con periodo annuale e semiannuale e la linea celeste indica lo spostamento atteso dal modello ERA-interim (hydro).

Gli spostamenti stagionali orizzontali sembrano mostrare una direzione principale di spostamento, in quanto quando il segnale della componente nord ha un andamento positivo, la componente est ha un andamento negativo (ossia verso ovest), e viceversa (direzione sud-est). Osservando intensità diverse nelle due componenti, è stato calcolato, per ciascuna epoca, l'angolo che lo spostamento orizzontale stagionale forma con la direzione S-N. La Figura 13 mostra la distribuzione degli angoli stimati (valori positivi in senso antiorario rispetto la direzione Sud), presentando una distribuzione quasi gaussiana con media di 15° e deviazione standard di 14° . Il valore medio corrisponde alla direzione 165°N , indicando uno spostamento stagionale, con periodo annuale, in direzione quasi N-S.

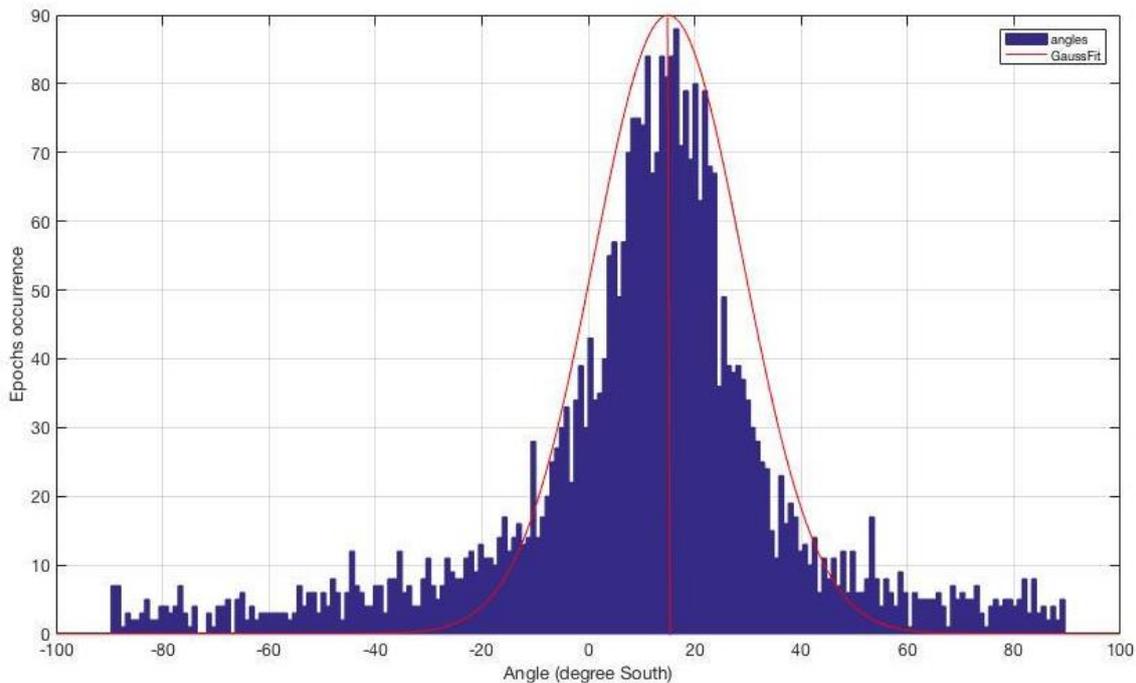


Figura 13. Distribuzione degli angoli che lo spostamento orizzontale stagionale misurato epoca per epoca dalla stazione MINE forma con la direzione S-N (valori positivi in senso antiorario rispetto la direzione Sud). Curva rossa: distribuzione gaussiana con media 15° e deviazione standard 14° .

Proiettando gli spostamenti orizzontali epoca per epoca lungo la direzione principale di 165°N , otteniamo una serie temporale di spostamento che presenta un andamento stagionale con ampiezza variabile nel tempo (Figura 14). La serie temporale così ottenuta è stata confrontata con la curva cumulativa dei volumi di stoccaggio del campo di Minerbio, ottenuta riportando, mese per mese, i volumi di gas iniettati ed erogati e calcolando la sommatoria cumulativa del bilancio dei volumi a fine mese. Il confronto mostrato in Figura 14 evidenzia un'ottima correlazione tra i due segnali, sia in termini di fase sia in termini di ampiezza.

Considerando quindi i risultati mostrati in Figure 11 e quelli mostrati in Figura 14, possiamo concludere che alla stazione MINE il segnale di deformazione associato all'attività di produzione è essenzialmente mappato nella componente di spostamento N-S e non nella componente verticale, come invece è prevedibile al centro del giacimento, come evidenziato dalle elaborazioni InSAR mostrate nel proseguo di questo report (Parte 3). Questo è dovuto alla posizione della stazione, posta ai margini del giacimento di Minerbio (Fig. 1).

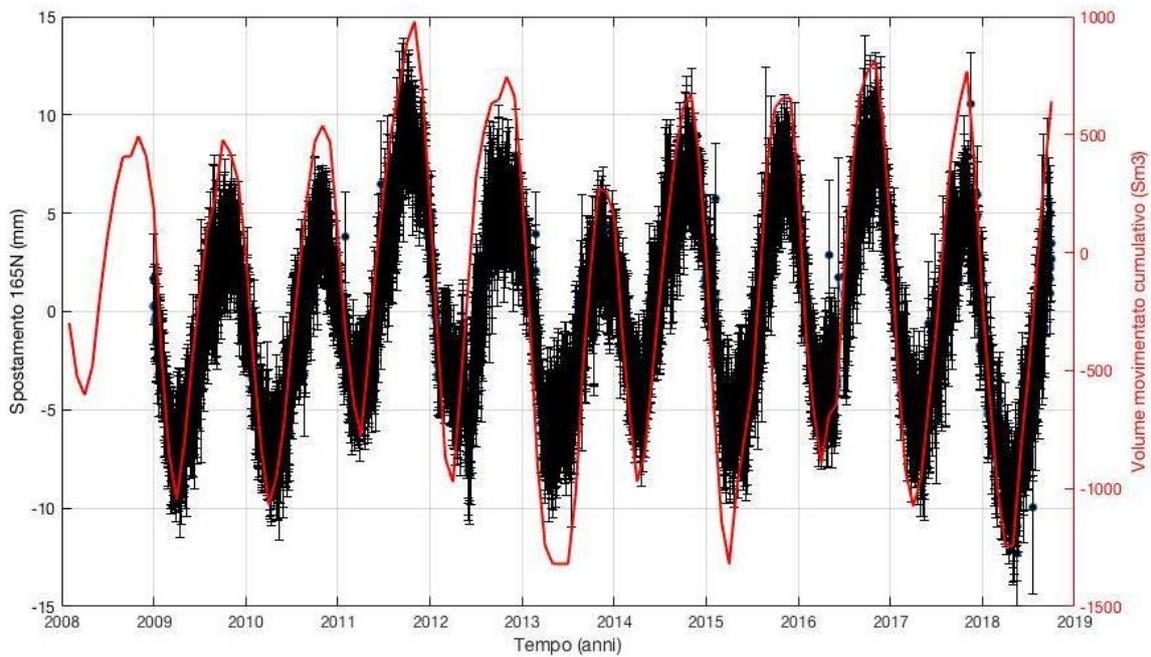


Figura 14. Serie temporale di spostamento orizzontale lungo la direzione 165°N indicata dai punti neri con barre d'errore 1σ . Curva rossa: curva cumulativa di stoccaggio del campo di stoccaggio gas di Minerbio (in Standard m^3 , Sm^3).

2.9 Integrazione della Rete GPS

Per quanto riguarda il monitoraggio delle deformazioni del suolo a Minerbio, sulla base delle elaborazioni dei dati GPS effettuate dall'INGV, e delle considerazioni espresse nei paragrafi 4 e 5, l'INGV ritiene che sia necessario installare almeno una nuova stazione GPS in continuo ad integrazione di quella esistente. Le analisi svolte ed il confronto con i prodotti InSAR forniti dal Concessionario, infatti, mostrano come se da un lato i dati SAR permettano di misurare un segnale verticale stagionale con ampiezze degli spostamenti maggiore al centro del giacimento, ai margini dello stesso la deformazione indotta dall'attività di produzione risulta essenzialmente orizzontale, ed il SAR perde in capacità risolutiva anche nella componente verticale.

In generale, una ulteriore stazione GPS permanente, ubicata più a Nord, tra il centro e il limite settentrionale del giacimento, migliorerebbe la stima della deformazione lungo la componente orizzontale N-S, non rilevabile da interferometria SAR, e fornirebbe una informazione utile per la scomposizione geometrica degli spostamenti lungo la linea di vista nelle componenti E-W e verticale.

Questa osservazione è stata pienamente condivisa dal Concessionario che si è immediatamente reso disponibile e attivato per valutare le condizioni logistiche che agevolino l'installazione di una nuova stazione GPS. Ad aprile 2019 è stato effettuato un sopralluogo congiunto al fine di valutare, tra le varie soluzioni proposte dal Concessionario, il sito più idoneo dal punto di vista della logistica (esistenza di siti attrezzati, recintati, forniti di energia elettrica, ecc...). Sono stati identificati due possibili siti, il Cluster A e il Cluster E (Figura 15), localizzati in posizioni utili per la misura di deformazioni stagionali sia in Est-Ovest sia nella componente verticale. In Figura 16 sono mostrate alcune foto dei due siti. Il sito scelto per la nuova installazione è il Cluster A, avendo già a disposizione una struttura adatta per la monumentazione e il collegamento con l'energia elettrica.

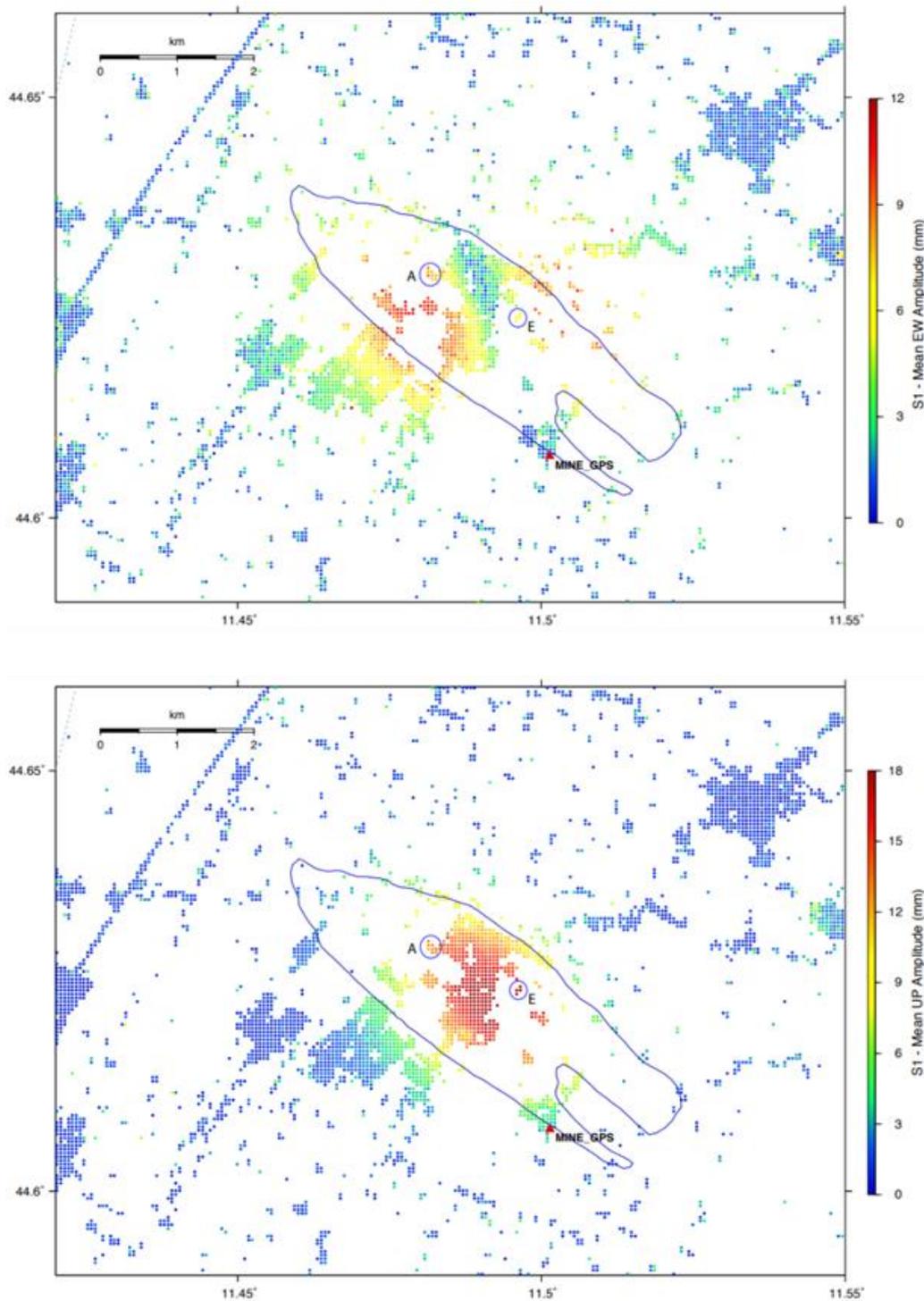


Figura 15. Posizione dei Cluster A ed E rispetto all'intensità dei segnali stagionali misurati dai satelliti SAR Sentinel-1 forniti dal Concessionario. Sopra: ampiezza media (in mm) degli spostamenti stagionali in direzione Est-Ovest. Sotto: ampiezza media (in mm) degli spostamenti stagionali lungo la verticale.



Figura 16. Foto dei siti proposti per l'installazione di una nuova stazione GPS presso i due siti proposti dal concessionario: Cluster A (sopra) e Cluster E (sotto).

2.10 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG

Parte rete GPS

Gli ILG a pag. 17 raccomandano che *“la rete locale GPS preveda la presenza di stazioni permanenti di precisione (di tipo geodetico), distribuite opportunamente in funzione dell’estensione e delle caratteristiche dell’area da monitorare ed installate con una adeguata monumentazione adatta a scopi geofisici (ad esempio UNAVCO)”*.

Il termine *“di tipo geodetico”* risulta troppo generico, senza dare indicazioni chiare sulle accuratezze e le precisioni attese. Si potrebbe specificare che *“la rete GPS deve prevedere stazioni di tipo geodetico, in grado di misurare la posizione con precisione sub-centimetrica e le velocità di spostamento con precisioni sub-millimetriche, in un sistema di riferimento internazionale”*.

Anche la descrizione della monumentazione *“ad esempio UNAVCO”* non dà indicazioni utili. Per *“tipo UNAVCO”* si intende, probabilmente il classico tripode usato per la rete Plate Boundary Observatory negli Stati Uniti occidentali. Tale tipo di monumentazione è di difficile realizzazione su sedimenti sciolti, ad esempio in pianura Padana. L’analisi effettuata per il sito di Minerbio, evidenzia come nonostante la stazione MINE non sia stata installata con monumentazione *“tipo UNAVCO”*, ma su edificio, il fatto che sia caratterizzata da elevata qualità e continuità temporale del dato ha permesso di misurare con precisioni molto elevate gli spostamenti 3D ed evidenziare una relazione diretta con l’attività di stoccaggio. Si propone di specificare che la stazione deve essere installata *“prestando la massima cura ed attenzione alla scelta del monumento, al fine di garantire la massima stabilità del caposaldo geodetico, elevata qualità del dato (valori di multipath confrontabili con i valori medi delle stazioni di reti di tipo geofisico, ad esempio la rete RING) e continuità dell’acquisizione.”*

Gli ILG a pag. 17, richiedono *“In particolare, si richiede che le stazioni” (GPS) “abbiano interdistanze inferiori a 10-15 km e che una di esse sia co-locata con la stazione a banda larga della rete di monitoraggio sismico...”*.

Questa definizione risulta troppo vincolante, senza essere particolarmente importante, vista anche la breve inter distanza (se confrontata ad esempio con la spaziatura caratterizzante le stazioni sismiche della Rete Sismica Nazionale). Potrebbe inoltre verificarsi il caso che le migliori condizioni logistiche per l’installazione di un apparato GPS siano in un dominio estremamente rumoroso dal punto sismico o viceversa. Potrebbe essere modificato in: *“In particolare, si richiede che le stazioni abbiano interdistanze inferiori a 10-15 km e che una di esse sia **possibilmente** co-locata con la stazione a banda larga della rete di monitoraggio sismico, se le condizioni di noise sismico/ambientale lo consentono...”*.

Si concorda pienamente con il principio generale espresso negli ILG per il sistema di monitoraggio delle deformazioni del suolo, così come per il monitoraggio sismico, che tale sistema debba essere realizzato o adeguato secondo un principio di opportuna valorizzazione della strumentazione (e dei relativi archivi dati) già esistente.