

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 1 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

## Campo di TEA-LAVANDA-ARNICA

Aggiornamento al 31/12/2019

Il campo di Tea, Lavanda e Arnica (acronimo TLA) è ubicato nell'offshore adriatico a una distanza di circa 58 km dalla costa prospiciente Ravenna, in corrispondenza di un fondale marino di circa 40 m. Tale campo ricade nella concessione di coltivazione A.C34.AG, titolarità Eni 100% (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C34.AG	19/06/24	Eni	Eni	100%	Emilia Romagna

I livelli mineralizzati a gas dei giacimenti di Tea, di Lavanda e di Arnica sono costituiti da torbiditi sabbiose, della formazione P.to Garibaldi che si sono depositate in corrispondenza di una monoclinale regionale di età pre-pliocenica immergente verso SW. In tali livelli le sabbie, più o meno siltose e talora con sottili livelli argillosi, di genesi turbiditica, sono riconducibili a una situazione deposizionale tipo "lobo turbiditico prossimale" in brusca chiusura laterale per *onlap* contro la rampa di avanpaese. La successione più alta della serie mineralizzata presenta una significativa variazione di facies, riferibile a una fase di sedimentazione turbiditica a minore efficienza di trasporto conseguente a una diminuzione di volume dei flussi di torbida. La successione inferiore, più marcatamente sabbiosa, presenta banchi amalgamati, talora associati a livelli di ciottoli argillosi (*Clay chips*) imballati in matrice siltoso-sabbiosa. Tali strutture sono legate a fenomeni di rielaborazione di orizzonti argillosi che erano asportati dalle sovrastanti correnti di torbida, a marcata efficienza.

**Il giacimento di Tea** è stato scoperto nel novembre 1998 con la perforazione del pozzo esplorativo Tea 1, che è stato in seguito ripreso in *side-track* come Tea 1dirA. Il pozzo è stato poi chiuso minerariamente dopo aver eseguito le prove di produzione.

La struttura mineralizzata di Tea è, di fatto, una trappola mista stratigrafico-strutturale, estesa per circa 7 km<sup>2</sup>, che s'impone su un "naso" del substrato pre-pliocenico, con chiusura a NW, SE e SW per pendenza e a NE per *pinch-out*. L'estensione dei principali livelli mineralizzati coincide con un evidente fenomeno di anomalia d'ampiezza sismica.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 2 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

Tali livelli, appartenenti al PL3-H della parte basale della formazione P.to Garibaldi (Figura 2 –), sono stati denominati dall’alto verso il basso: PL3-H, PL3-H1 e PL3-H2: il loro spessore lordo varia dai circa 14 m del livello PL3-H1 ai 4 m del PL3-H.

**Il giacimento di Lavanda** è stato scoperto nell’ottobre 1999 dopo aver perforato il pozzo esplorativo Lavanda 1 dir, che ha trovato mineralizzato il livello PL3-F1 a una distanza di circa 1600 m in direzione SE dal pozzo Tea 1. Il pozzo è stato poi ripreso in *side-track* come Lavanda 1 dir A con funzione di *appraisal* e, sia pure senza l’esecuzione di prove, ha fornito utili indicazioni sull’andamento strutturale di entrambi i giacimenti. Al termine degli accertamenti minerari il pozzo è stato sospeso con tecnologia *mudline suspension*.

**Il giacimento di Arnica** è stato scoperto nel gennaio 2000 con la perforazione del pozzo esplorativo Arnica 1, ubicato a circa 4500 m dalla citata *mudline suspension*. Il pozzo è stato chiuso minerariamente al termine delle prove di produzione che hanno interessato il livello PL3-H3. Il campo di Tea-Lavanda-Arnica (TLA) è stato sviluppato nel periodo febbraio 2007 - settembre 2007, perforando dalla piattaforma Tea i seguenti 4 pozzi, completati poi in doppio per un totale di 8 *string*:

- Lavanda 1 dir A e Tea 2dir per la coltivazione del giacimento di Tea;
- Arnica 2 dir per la coltivazione del giacimento di Arnica;
- Lavanda 2 dir per la coltivazione del giacimento di Lavanda.

Tutti i pozzi di sviluppo sono stati completati con tecnologia “*sand control*”, del tipo OHGP (*Open Hole Gravel Pack*) nel pozzo Arnica 2 dir, e ICFP (*Inside Casing Frac Pack*) nei pozzi Tea 2 dir, Lavanda 1 dir A e Lavanda 2 dir.

Nel documento SIA del 04/02/02 è riportato il profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse 3D* del 10/2000).

La subsidenza massima prevista in relazione a tale profilo e valutata con un modello Geertsma semianalitico (*Eni-GEDA: giacimento di Tea, Lavanda, Arnica - modellizzazione di subsidenza - Nota tecnica - MOGI-RIGE luglio 2001*) è risultata pari a 1,8 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 7 anni dall’inizio produzione; l’estensione massima del cono di subsidenza è risultata limitata all’area complessiva dei tre giacimenti.

Allo scopo d’accertare l’esistenza d’eventuali interazioni geomeccaniche tra il campo di Tea, Lavanda e Arnica e quello di Naomi e Pandora si sono confrontati i risultati del modello semianalitico di Geertsma (2001) con quelli del modello elasto-plastico a elementi finiti Isamgeo

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 3 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

(2003) realizzato per la previsione della subsidenza di Naomi e Pandora (*Eni-GEDA: campo di Tea, Lavanda, Arnica - nota integrativa del 28/01/03*). Come si rileva dalla Figura 3, tale confronto ha escluso ogni possibilità d'interazione fra i coni di subsidenza dei due campi. Nel marzo del 2003 si è aggiornato il modello *Eclipse* di Tea, Lavanda, Arnica (*Eni-MOGI-RIGE - Campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell'acquifero - marzo 2003*), unificando i modelli dei tre giacimenti - originariamente distinti - sia per le zone mineralizzate sia nell'acquifero, onde tener conto d'eventuali interazioni idrauliche e, quindi, meglio valutare la propagazione del disturbo di pressione nell'area circostante i giacimenti stessi. La possibile subsidenza indotta dalla coltivazione è stata a sua volta valutata per l'insieme di tali giacimenti con un modello geomeccanico elasto-plastico a elementi finiti (*ISAMGEO: campi a gas di Tea, Lavanda e Arnica-modello predittivo di subsidenza - marzo 2003*).

Nel corso delle simulazioni geomeccaniche si sono altresì eseguiti test di sensitività per valutare in quale misura influiscano sulla previsione di subsidenza le scelte sia dei valori di compressibilità uniassiale  $C_m$  dei sedimenti sia di permeabilità dell'acquifero, fatte sulla base di modelli statistici e geostatistici.

In particolare, lo studio Isamgeo ha considerato due scenari di compressibilità  $C_m$ :

- **caso A**: si è utilizzata la legge di compressibilità proposta in letteratura da *Baù et al.*<sup>1</sup>;
- **caso B**: si è utilizzata una stima di compressibilità derivata dall'interpretazione delle misure in situ con marker fatte nel pozzo Naomi 4D.

Per ciascuno scenario di compressibilità (casi A e B) sono stati considerati, inoltre, due possibili scenari di depressurizzazione:

- **scenario "press 1"** nel quale si è assunta la permeabilità dell'acquifero pari a quella del giacimento. Tale scenario corrisponde a una maggiore depressurizzazione delle zone esterne nell'acquifero e a una minore depressurizzazione di quelle interne al giacimento per effetto della maggior spinta d'acqua, il che comporta anche un minor recupero di gas;
- **scenario "press 2"** nel quale si è assunta la permeabilità dell'acquifero pari a 1/10 rispetto a quella di giacimento sulla base di evidenze indirette di possibili fenomeni di

<sup>1</sup> Baù D., Ferronato M., Gambolati G., and Teatini P., Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique, *Géotechnique*, Vol. 52, No. 8, pp. 605-616, 2002.

 <p>Eni spa</p>	<p>Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020</p>	<p>Documento GEODCS_REL2020_TLA</p>	<p>Page - 4 - of 63</p>
---	---	---	-------------------------

diagenesi nei livelli ad acqua; fenomeni che nelle zone mineralizzate sarebbero, invece, inibiti dalle alte saturazioni in gas.

Sulla base delle simulazioni fatte e considerata la configurazione più probabile (**caso A** - scenario "press 1"), il valore di subsidenza massimo previsto al termine del periodo di coltivazione dei giacimenti è stato pari a 1.7 cm in corrispondenza della culminazione strutturale del giacimento di Tea. Tale valore si riduce a circa 1 cm a una distanza massima di 4.5 km in direzione SW dal centro del complesso dei giacimenti, ovvero a più di 50 km dalla costa. In seguito a ulteriori approfondimenti, richiesti da MATTM, è stato assegnato al Dipartimento per i Metodi e i Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) della Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Padova l'incarico di verificare e validare la previsione di subsidenza eseguita da Isamgeo, per conto di Eni, nel 2003.

A tale scopo DMMMSA ha realizzato uno studio previsionale della subsidenza nei giacimenti in oggetto (*DMMMSA-Università di Padova: studio previsionale con modello ad elementi finiti della subsidenza attesa dalla coltivazione dei campi di Tea, Lavanda ed Arnica – novembre 2005*) basandosi sulla già citata revisione dei modelli statico e dinamico di giacimento (*Eni-MOGI-RIGE: campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell'acquifero - marzo 2003*), e prendendo in esame diverse ipotesi in merito al valore del coefficiente di compressibilità  $C_m$  dei sedimenti (per maggiori dettagli in merito si rimanda alla relazione DMMMSA).

In sintesi, i risultati ottenuti da DMMMSA sono stati:

- 1) la subsidenza massima attesa si verifica all'interno dell'involuppo delle tracce dei giacimenti ed è dell'ordine di qualche centimetro a seconda della legge di compressibilità adottata. Il valore di subsidenza con lo scenario più probabile (*forecast 1 e compressibilità media*) è di 2 cm, mentre nelle condizioni più cautelative (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) è di 4.6 cm;
- 2) in ogni scenario previsto, l'isolinea di subsidenza 1 cm rimane circoscritta all'involuppo delle tracce dei giacimenti. Nella condizione più sfavorevole (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) la distanza massima raggiunta dall'isolinea 1 cm rispetto al baricentro delle tracce dei giacimenti è di circa 8 km, cioè circa 50 km dalla linea di costa e completamente a sud del parallelo passante per la foce del Po di Goro;

 <p>Eni spa</p>	<p>Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020</p>	<p>Documento GEODCS_REL2020_TLA</p>	<p>Page - 5 - of 63</p>
---	---	---	-------------------------

- 3) con lo scenario di *forecast 1*, il massimo della subsidenza attesa si verifica alla fine della produzione con un lieve rebound dopo l'abbandono del campo. Al contrario, con lo scenario di *forecast 2*, il processo di abbassamento prosegue anche in fase post-produttiva con una lieve subsidenza residua stimabile in pochi millimetri.

Lo studio eseguito dal DMMMSA di Padova ha completamente confermato, quindi, i risultati della precedente valutazione di Isamgeo, ovvero che la possibile subsidenza indotta dalla coltivazione dei campi a gas di Tea-Lavanda-Arnica secondo i programmi di produzione previsti da Eni è minima, del tutto trascurabile anche nella zona dei giacimenti e, inoltre, non interessa la fascia costiera a sud del delta del Po e il litorale ravennate.

Nel gennaio del 2010 è stato nuovamente aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica con risultati che hanno portato ad un aumento del 6% delle riserve a vita intera producibili del campo. Un ulteriore aggiornamento di tale studio è stato poi fatto nell'ottobre del 2013 (*rel. GISE n° 19/13 del 20/10/2013*). I risultati hanno mostrato un incremento del 4% del valore del GOIP (da 2737 MSm<sup>3</sup> stimati al 12/2010 a 2839 MSm<sup>3</sup> stimati al 10/2013) e una riduzione delle riserve a vita intera dell'8% (da 1751 MSm<sup>3</sup> valutati al 12/2010 a 1617 MSm<sup>3</sup> valutati al 10/2013).

Nel corso del 2011 sono state a loro volta aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA n° 10/2011 – Campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza - Management Summary*) giungendo alle seguenti conclusioni:

- la subsidenza massima prevedibile sulla verticale dei giacimenti è di 7 cm;
- la corrispondente estensione del relativo cono (curva d'iso-subsidenza di 2 cm)<sup>2</sup> è di circa 5 km dal centro del complesso dei giacimenti verso costa, ossia a più di 50 km dalla costa stessa.

Tale previsione è riferita al caso più cautelativo, mentre nel caso ritenuto più probabile l'impatto della subsidenza è ancora più ridotto (max 3 cm).

<sup>2</sup> Nei modelli geomeccanici di Tea, Lavanda e Arnica realizzati nel periodo 2002-2003 da Eni (Geertsma semianalitico del 2001) e da Isamgeo (FEM del 2003), l'estensione del cono di subsidenza è stata fatta corrispondere alla linea d'iso-subsidenza di 1 cm. All'epoca, infatti, non erano ancora disponibili gli studi condotti dalla Commissione Scientifica Internazionale (CSI) nominata da Eni e presieduta dal Prof. E. Boschi che, su tale argomento, ha concluso che la linea d'iso-subsidenza di 2 cm è da considerarsi "*the limit of any physical identification of induced subsidence effects*". Gli studi e le conclusioni della CSI sono stati resi pubblici con il volume "*Land Subsidence – Special Volume*" edito in occasione del *7th International Symposium on Land Subsidence – Shanghai (P.R. China) – 23-38 Oct. 2005*. Pertanto solo a partire da tale data Eni ha considerato nei propri studi la linea d'iso-subsidenza di 2 cm come il contorno esterno che delimita il cono di subsidenza.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 6 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

Nel maggio del 2015 si è ancora aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica (*rel. GISE n°.01/2015 Campi di Tea Lavanda Arnica - Aggiornamento studio di giacimento - Scheda riassuntiva di maggio 2015*) con il calcolo di nuovo profilo di produzione che prevedeva un recupero di gas pari a 1722 MSm<sup>3</sup> entro il 2018. Sulla base dei risultati dello studio di giacimento del 2015 furono aggiornate anche le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA 05/2015 – campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza – Management Summary*).

Un ulteriore aggiornamento dello studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica è stato eseguito a dicembre 2019 (*rel. IPET E9DFED83-0 - Campi di Tea Lavanda e Arnica – Aggiornamento dello Studio di giacimento – Scheda riassuntiva di dicembre 2019*) con il calcolo del nuovo profilo di produzione, che prevede un recupero di gas pari a 1873 MSm<sup>3</sup> entro il 2023. In Figura 4 sono riportati gli andamenti storici delle portate di gas, d'acqua e la produzione cumulativa di gas al 31/12/19 pari a 1819 MSm<sup>3</sup>. Si noti che il volume di gas prodotto ad oggi ha già quasi raggiunto il valore previsto a fine vita del campo (Figura 5, Figura 6 e Figura 7). Le portate attuali sono, comunque, esigue e in linea con il comportamento di un giacimento nelle fasi produttive terminali.

In Figura 8, sono presentati i confronti tra i profili di pressione calcolati dal modello *Eclipse* 2019 e le pressioni statiche misurate per i livelli ritenuti più rappresentativi del campo. Tali confronti mostrano come la previsione modellistica sia in buon accordo con il comportamento reale di detti livelli.

Sulla base dei risultati dello studio di giacimento del dicembre 2019 sono state contestualmente aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*doc. IPET-4CFD33A0-0 – Campi di Tea Lavanda Arnica – Modello Geomeccanico di Subsidenza-Management Summary del 20/12/2019*).

Per descrivere il comportamento del materiale delle formazioni nel modello geomeccanico a elementi finiti è stato usato un modello costitutivo elasto-viscoplastico (modello 'Soft Soil Creep' di Vermeer e Neher) considerando il nuovo profilo produzione con uno start up del campo a novembre 2007 ed una fine produzione prevista per il 2023.

Le simulazioni effettuate sia con il modello di giacimento, sia con quello geomeccanico sono state protrate fino al 2054 in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 7 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

I risultati delle previsioni di subsidenza sono riportati nella tabella seguente:

Data	Subsidenza massima (cm)	Estensione massima (km)	Distanza minima dalla costa (km)
2023 (fine produzione)	5	7	53
2054 (fine simulazione)	4	6	54

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza attesa è pari a 5 cm ed è previsto che venga raggiunto alla fine della produzione (2023);
- alla fine della produzione del campo la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm - calcolata come la massima distanza del punto di massima subsidenza da tale linea - è pari a 7 km. Tale estensione si riduce a 6 km alla fine della simulazione per effetto della ripressurizzazione del giacimento (Figura 9);
- il fenomeno si esaurisce a circa 53 km dalla linea di costa.

A partire dai primi anni '70, Eni ha progettato e realizzato lungo la costa adriatica una rete di livellazione geometrica che, su richiesta degli Enti di Controllo a livello regionale e nazionale (Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna e Ministero dell'Ambiente), è rilevata con cadenza periodica. A partire dalla campagna 2011, tale periodicità ha una cadenza triennale come raccomandato nelle *"Linee Guida per lo Studio dei Fenomeni di Subsidenza nell'Ambito dei Progetti di Sviluppo Sostenibile di Campi ad Olio e Gas"* emesse dal Dip. DMMMSA dell'Università di Padova nel 2007.

Le specifiche tecniche adottate sono quelle ora in uso per i rilievi della rete Eni e rispettano le indicazioni contenute nelle già citate linee guida emesse dall'Università di Padova.

Eni, inoltre, ha affidato la certificazione della documentazione e della metodologia utilizzata a un ente esterno, che attualmente è il Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna.

La rete di livellazione rilevata nel 2017 (ultimo rilievo eseguito), è stata ampliata con l'aggiunta di uno sbraccio esteso all'area del campo di Agosta.

Tale rete è suddivisa nei seguenti tronchi di livellazione:

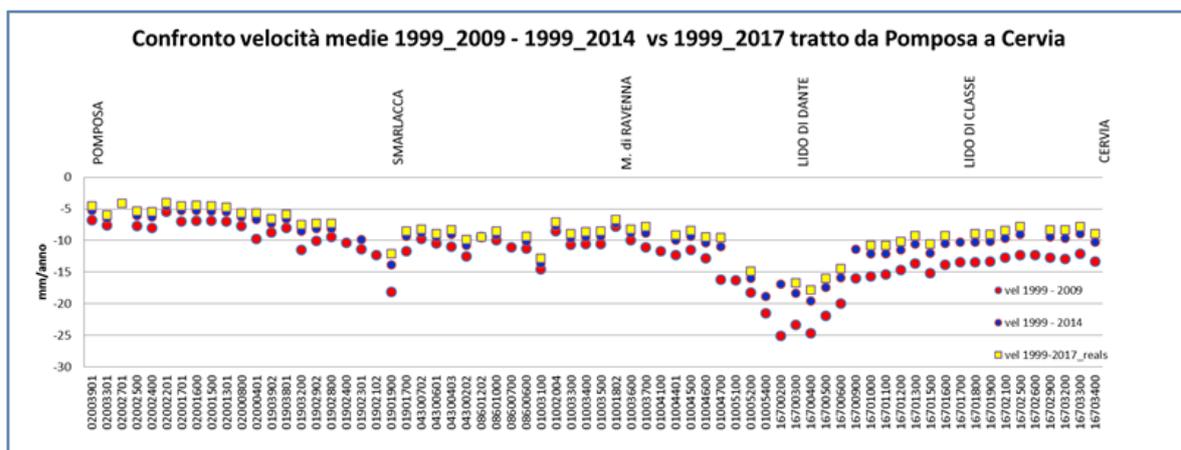
- dorsale Adriatica, da Treviso fino a Pesaro, compreso lo sviluppo degli sbracci sul delta del Po, per un totale di circa 1200 km di sviluppo lineare;

- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 210 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.

Le operazioni di campagna si sono svolte nel periodo compreso tra agosto e ottobre 2017 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell'ente certificatore.

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. Per il tratto di costa da Pomposa a Cervia - prospiciente i campi di Naomi-Pandora, Guendalina e Tea-Lavanda-Arnica - le livellazioni disponibili non sono completamente omogenee tra loro poiché le quote di alcuni capisaldi sono state misurate solo a partire dal 2003. Di conseguenza si sono stimate con regressione lineare solo le velocità medie d'abbassamento del suolo per quei capisaldi che presentano una serie storica ininterrotta di misure a partire dal 1999. Tali velocità sono riportate in Figura A per i seguenti periodi: 1999-2009, 1999-2014 e 1999-2017. Il loro confronto mostra come negli ultimi anni si sia registrata una generale diminuzione di dette velocità; diminuzione che è mediamente dell'ordine di 2.4 mm/a.

**Figura A – Tratto Pomposa-Cervia: velocità medie di subsidenza**



 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 9 - of 63
--	--	---------------------------------	------------------

Le misurazioni di campagna si sono svolte nel pieno rispetto delle specifiche tecniche, con il controllo periodico dei supervisor e con la verifica di chiusura di tutti i tratti in andata e ritorno, nonché di tutti i poligoni realizzati. I parametri matematici della compensazione rientrano nei canoni previsti, sia per i valori di chiusura, sia per i valori legati alla propagazione dell'errore. Come programmato in precedenza, l'ente certificatore ha iniziato, da questa campagna, ad introdurre la compensazione sviluppata utilizzando i valori di velocità desunti dalle stazioni CGPS permanenti della rete Eni. A questo proposito, però, è necessario anche segnalare che i valori delle quote dei capisaldi ottenuti con questo procedimento possono differire da quelli che si ottengono con la compensazione classica, che è invece vincolata a un solo caposaldo di riferimento. In effetti, ciò è stato osservato nel caso dei risultati del rilievo 2017, in cui le misure delle quote di alcuni capisaldi sono risultate maggiori dei corrispondenti valori rilevati con la livellazione del 2014. Valori questi ultimi che erano stati ottenuti con la compensazione classica vincolata al solo caposaldo di Treviso.

I risultati del rilievo 2017 sono, comunque, compatibili con il quadro generale di una diminuzione della velocità di subsidenza osservata anche con il monitoraggio SAR.

Si deve osservare, inoltre, che i dati di livellazione misurati sul singolo caposaldo non sono di solito sufficienti per caratterizzare la distribuzione areale della subsidenza. Tali misure, infatti, possono essere talvolta alterate da "disturbi" accidentali intervenuti nel tempo sui manufatti su cui i capisaldi stessi sono stati materializzati.

Al fine d'ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori. Considerando, infatti, nel tratto di costa da Pomposa a Cervia solo i capisaldi con una serie storica ininterrotta di misure, se ne possono analizzare le relative velocità medie di abbassamento del suolo<sup>3</sup> ( $V_a$ ) - stimate con regressione lineare - raggruppandole nelle seguenti 5 classi:

- classe 4: include i capisaldi con  $V_a \geq 10$  mm/a;
- classe 3: include i capisaldi con  $5 \leq V_a < 10$  mm/a;

<sup>3</sup> Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie del suolo) sono riportate con valori negativi. Per comodità d'interpretazione, però, nell'elenco che segue, le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 10 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

- classe 2, include i capisaldi con  $3 \leq V_a < 5$  mm/a;
- classe 1: include i capisaldi con  $0 \leq V_a < 3$  mm/a;
- classe 0: include i capisaldi con  $V_a < 0$  (sollevamento del suolo).

L'elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2014 mostra un trend di generale abbassamento di questo tratto di costa. Il 51% dei punti ricade, infatti, nella classe 3, il 47% dei punti ricade nella classe 4 e solo un caposaldo, con una velocità  $V_a$  di 4.5 mm/a, ricade nella classe 2.

L'analisi aggiornata con i dati del 2017 conferma, come detto in precedenza, il rallentamento della velocità di subsidenza, che è diffuso per tutto il tratto analizzato. Si collocano, infatti, nella classe 2 il 12% dei punti analizzati, il 69% dei punti ricade nella classe 3 ed è in diminuzione la percentuale dei punti in classe 4 (19%).

Le campagne future (il prossimo rilievo è previsto nel 2020), insieme al progressivo miglioramento della nuova metodologia di compensazione dei dati di campagna basata sulle velocità delle stazioni CGPS, potranno eventualmente meglio definire i trend di movimento del tratto analizzato, al netto di eventuali movimenti anomali localizzati sui singoli capisaldi, movimenti che saranno oggetto di verifica durante le prossime campagne di misura.

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (dicembre 2019) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 10).

Le attività di monitoraggio sono state progressivamente potenziate mettendo in opera un numero crescente di stazioni CGPS sulle piattaforme offshore operate da Eni. Dal 2007, infatti, ne sono state installate sulle piattaforme di Regina e Calpurnia (giugno 2007), di Anemone B (agosto 2007), di Annalisa (ottobre 2007), di Calipso, Tea-Lavanda-Arnica, Clara Est e Clara Nord (novembre 2007), di Barbara NW (gennaio 2008), di Bonaccia (febbraio 2008), di Annamaria A e Annamaria B (gennaio 2010), di Clara W (ottobre 2010) e di Guendalina (agosto 2011). Le stazioni CGPS di Naide e PCC sono, invece, operative dal luglio 2005, mentre la postazione Naomi-Pandora è attiva dal giugno 2002. In tempi più recenti sono state installate anche le nuove stazioni CGPS di Elettra (luglio 2014), di Fauzia (settembre 2014), di Barbara E (novembre 2014), di Bonaccia NW (settembre 2015), e, infine di Clara NW (marzo 2016).

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 11 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche *SSU (Satellite Survey Unit)* equipaggiate ciascuna con un CGPS, un caposaldo di livellazione geometrica e 2 bersagli radar solidalmente connessi tra loro tramite una trave di cemento armato. Le 3 stazioni *SSU* sono state realizzate nelle Centrali Eni di Rubicone, di Fano e di Falconara nel dicembre 2007; negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche tre pozzi assestometrici per il monitoraggio della compattazione superficiale del terreno. Tali stazioni si sono aggiunte a quelle preesistenti, installate più a Nord lungo la costa ravennate nelle località di Fiumi Uniti, di Smarlacca e di Spinaroni (Appendice B).

Inoltre, come detto in precedenza, sono state monumentate altre 4 stazioni CGPS in Ortona, Pineto, Grottammare e P.to Sant'Elpidio, il cui completamento è avvenuto nel dicembre 2009, tutte equipaggiate con 2 bersagli radar e con un caposaldo di livellazione.

Allo stato attuale la stazione di Ortona non è più operativa dal 19 aprile 2013 per l'alienazione dell'area.

Nel novembre 2016, infine, è stata messa in opera una nuova postazione CGPS a Miglianico (completata con i *corner reflector* nel mese di maggio 2017) che, una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, entrerà a fare parte delle stazioni utilizzate per il monitoraggio della stabilità della costa.

Analogamente a quanto avviene per le livellazioni, anche i dati del monitoraggio CGPS sono validati da un ente esterno. Attualmente questa attività è svolta dall'Università degli Studi di Bologna, facoltà di Fisica – Dipartimento di Fisica e Astronomia DIFAS.

I dati CGPS acquisiti sulla piattaforma Tea-Lavanda-Arnica, certificati fino al 2017 e in fase di certificazione per gli anni successivi, sono stati elaborati con il software scientifico Bernese dalla ditta e-GEOS.

Per rappresentare in grafici plano-altimetrici la serie storica più completa di misure, ovvero quella estesa al 18/06/2019 – Figura 11), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato nella seguente Tabella1.

**Tabella 1 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2017**

Stazione	Dati Non Certificati			Dati Certificati			Delta (Non Cert. - Cert.)		
	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	D-N mm/a	D-E mm/a	D-H mm/a
TLA	17.73	19.97	-3.7	17.94	19.4	-4.5	-0.21	0.57	0.8

A questo proposito è opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche CGPS, da utilizzarsi per una verifica/taratura dei modelli previsionali di subsidenza, non possono essere considerate sufficientemente attendibili per dataset relativi a periodi di osservazione inferiori ai 36 mesi, come indicato dall'Ente che certifica tali dati con cadenza biennale.

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine di avere un numero sufficiente di osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza sulle misure e poter filtrare il "rumore" che per piccole velocità di subsidenza è dello stesso ordine di grandezza del valore del fenomeno fisico osservato.

Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, quindi, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori sufficientemente elevati. In questi casi sarà possibile monitorare solo eventuali anomalie di trend, ma non procedere a un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

- dataset < 12mesi: solo follow up per monitoraggio dei dati acquisiti
- dataset di 12÷36 mesi e
  - piccoli valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il trend previsionale;
  - grandi valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;
- dataset > 36 mesi: analisi di trend e calibrazione dei modelli geomeccanici confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 13 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Le elaborazioni sono state fatte con software scientifico Bernese, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Come anticipato nella precedente relazione, le elaborazioni dei dati CGPS sono state effettuate utilizzando il sistema di riferimento ITRF2014 con il software BERNESE 5.2.

Per le nostre elaborazioni il sistema di riferimento è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli *outliers* delle serie storiche è effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo.

Per il campo di Tea-Lavanda-Arnica, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, - anche se parzialmente incompleta a causa di work-over e successivi problemi di malfunzionamento della strumentazione - è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale<sup>4</sup> pari a -4.08 mm/a (Figura 11 e Figura 13), senza variazioni significative rispetto a quanto riportato nella precedente relazione d'aggiornamento (-4,24 mm/a).

Si segnala che, a causa di un guasto al ricevitore, la serie storica si è interrotta al 18/06/2019. Nel 2020 l'acquisizione è stata comunque ripristinata. Si noti inoltre che eventuali piccole differenze nelle stime delle velocità, che si possono verificare rielaborando in epoche successive i dati CGPS, dipendono anche dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta sia l'elaborazione di un modello periodico più attendibile, sia la ridefinizione degli outliers, che sono determinati mediante il test a tre sigma su tutta la serie storica esistente. Come riportato nella precedente relazione, si ricorda che le elaborazioni delle nuove serie storiche sono state influenzate sia dal cambio del sistema di riferimento (da ITRF2008Igb08 a ITRF2014) sia dall'utilizzo della nuova release del software scientifico Bernese (da 5.0 a 5.2). Entrambe le condizioni hanno introdotto modeste variazioni nelle velocità medie pregresse, dovute anche al ricalcolo delle serie storiche delle stazioni di riferimento. In particolare, le verifiche effettuate hanno mostrato che tali condizioni possono determinare un aumento della velocità di subsidenza dell'ordine di 0.5 mm/anno, anche sulle serie storiche

---

<sup>4</sup> La "subsidenza totale" rappresenta in questo caso l'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma su cui è installato il CGPS. A determinare tale "subsidenza totale" concorrono vari fenomeni: la compattazione di strati profondi per estrazione di gas (subsidenza antropica), movimenti tettonici e costipazione naturale dei sedimenti (subsidenza naturale), compattazione dei sedimenti più superficiali a fondo mare per effetto del peso della piattaforma. Quest'ultimo fenomeno è evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 14 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

delle stazioni di riferimento. Utilizzando un software realizzato dall'Università di Roma La Sapienza (software FEED – Fast Elbow Effect Detector), creato per migliorare le analisi dei dati delle serie storiche GNSS, per rilevare variazioni di velocità nella distribuzione temporale di misure CGPS, si può osservare una variazione di velocità, correlabile con la storia produttiva del campo (Figura 12).

In particolare:

- una velocità media di subsidenza totale di -6.00 mm/a nel periodo novembre 2007 (installazione del CGPS) - aprile 2012;
- una velocità media di subsidenza totale di -3.65 mm/a nel periodo aprile 2012- gennaio 2017;
- una velocità media di subsidenza totale di +0.38 mm/a nel periodo gennaio 2017- giugno 2019; a partire dal 2017 i dati CGPS evidenziano quindi una maggiore stabilità altimetrica.

L'evoluzione temporale del dato CGPS nell'ultimo periodo analizzato, può essere posta in relazione con l'attuale fase di declino della produzione.

I dati CGPS sono stati utilizzati per la calibrazione del modello geomeccanico senza depurare tali misure dalla componente di subsidenza naturale. La Figura 14 mostra l'ottimo accordo raggiunto tra le due serie di valori, a conferma dell'attendibilità dell'attuale modello di subsidenza.

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza e i monitoraggi fatti da Eni hanno confermato come eventuali fenomeni di subsidenza connessi alla produzione di gas dal campo di Tea-Lavanda-Arnica siano di piccola entità e, soprattutto, non abbiano alcun impatto sull'andamento altimetrico del tratto di costa antistante.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 15 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 16 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.



Figura 1 – Ubicazione del campo di TLA

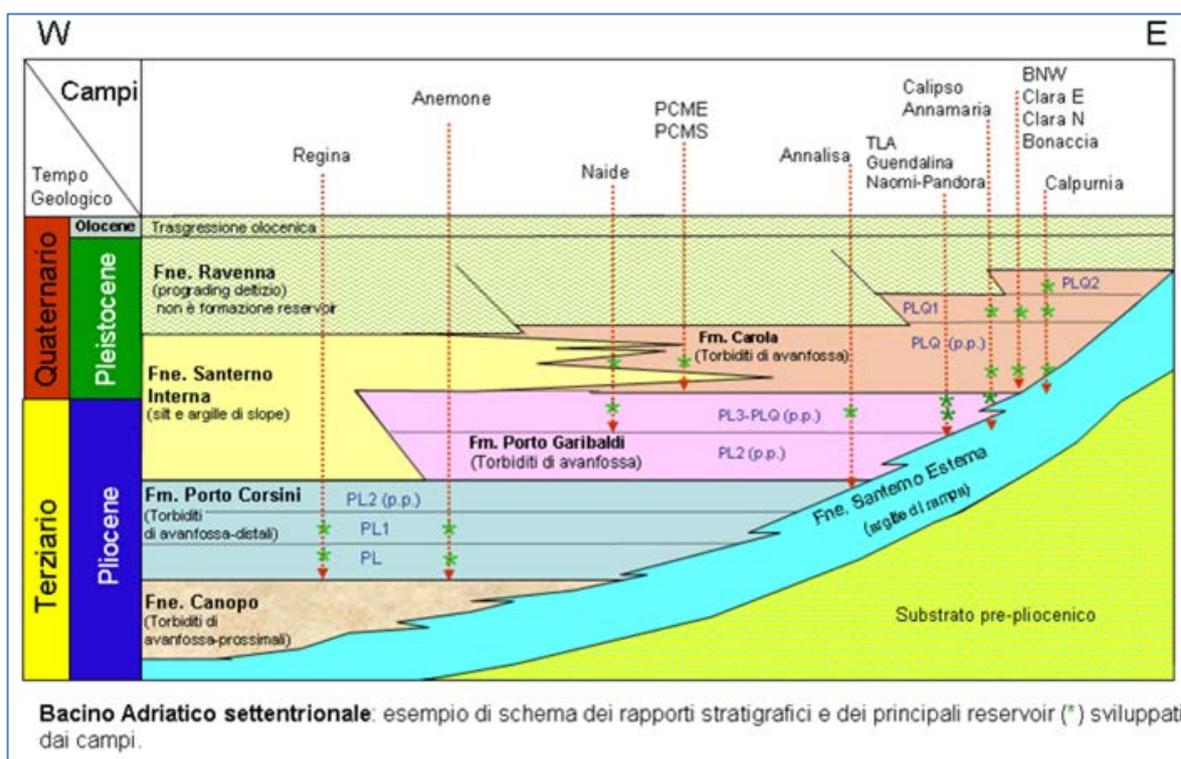


Figura 2 – Schema dei rapporti stratigrafici

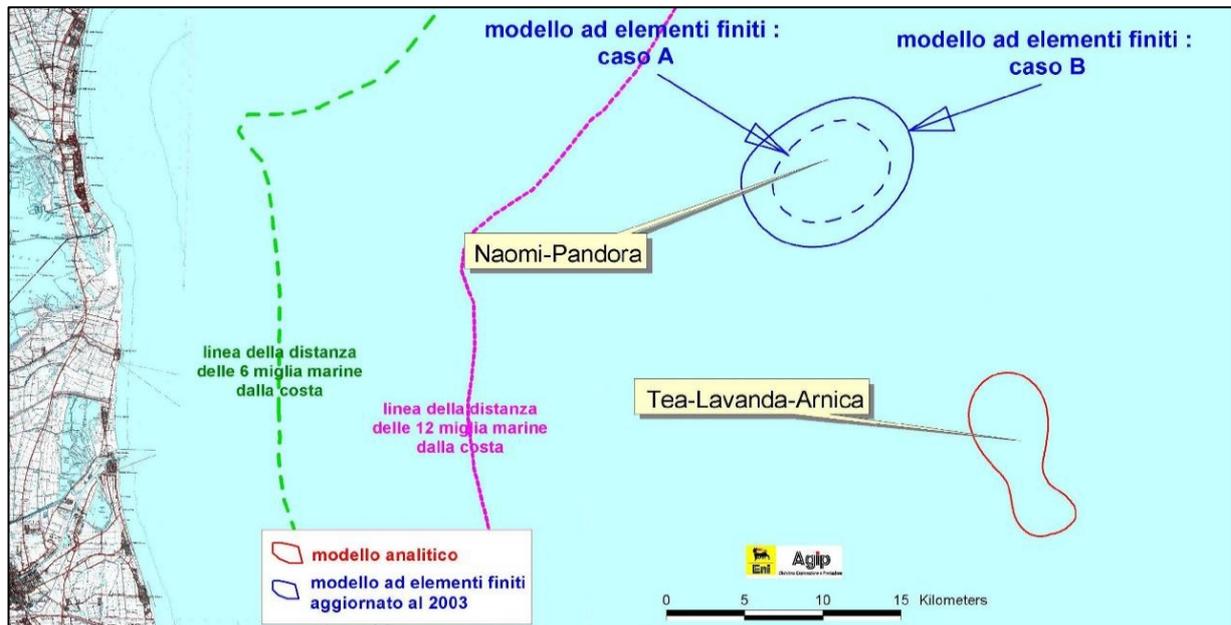


Figura 3 – Verifica dell’interazione geomeccanica fra i campi di TLA e di Naomi-Pandora

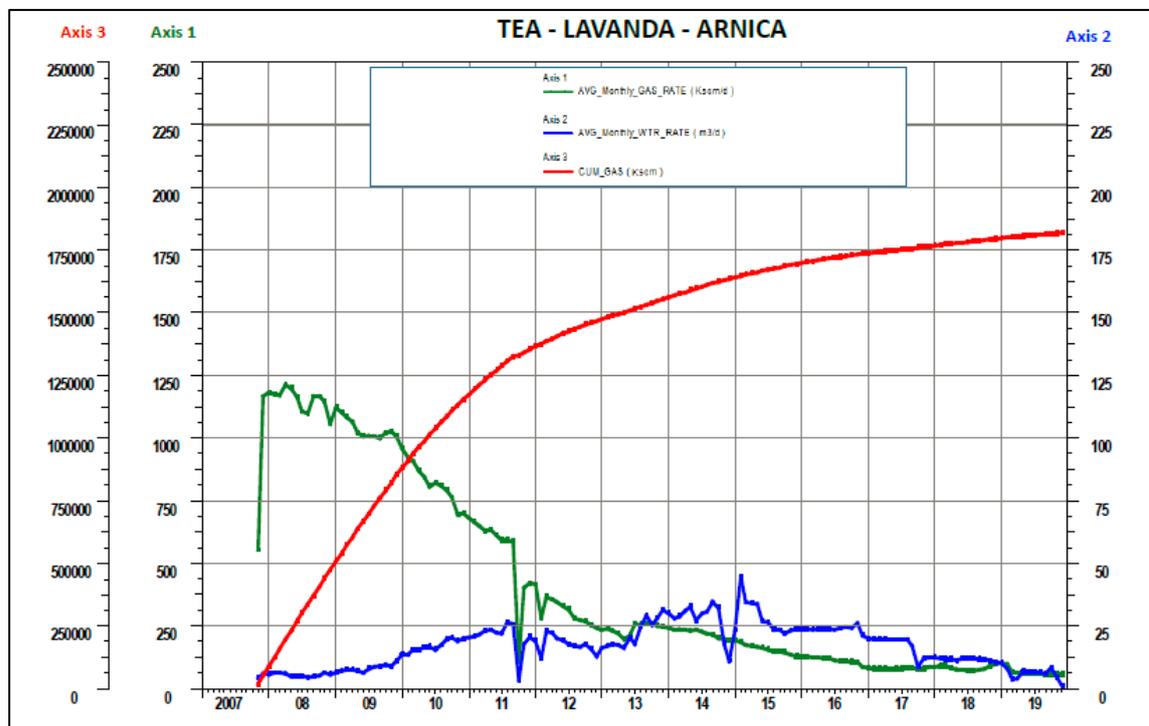
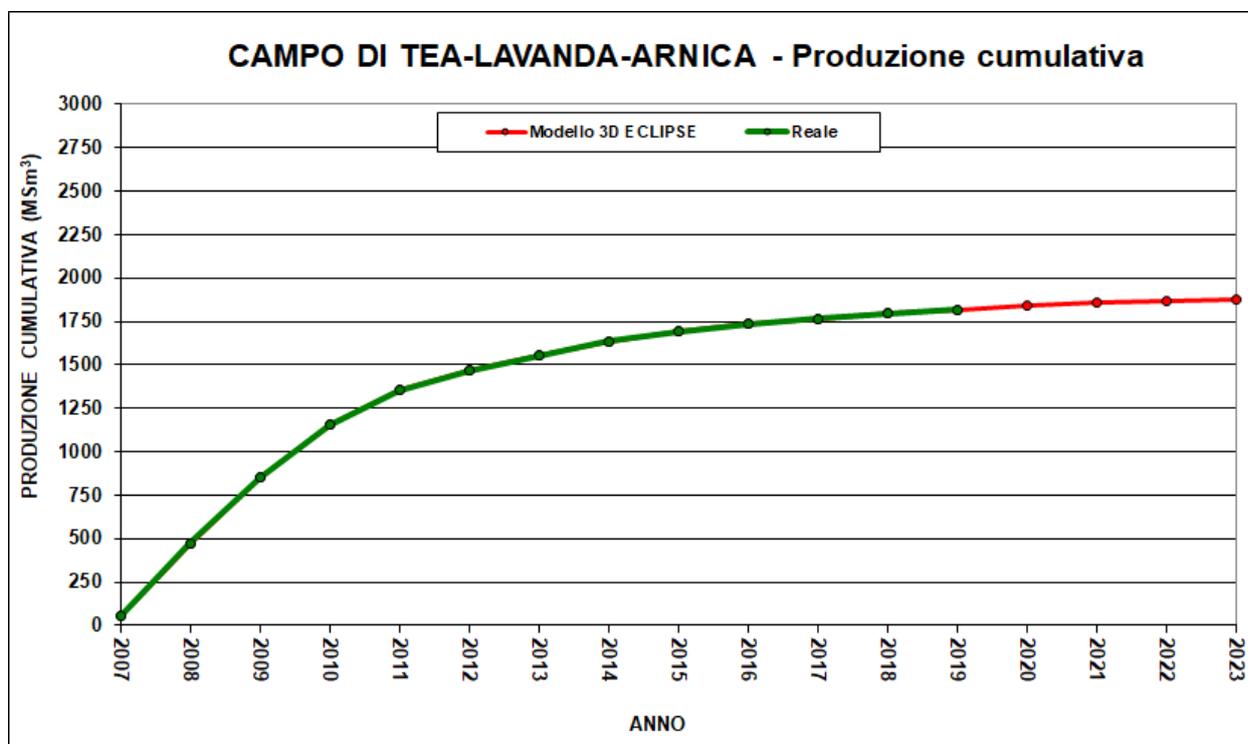


Figura 4 - Campo di TLA: produzione storica



CAMP DI TEA-LAVANDA-ARNICA					
ANNO	Produzione annuale (MSm <sup>3</sup> )		Produzione cumulativa (MSm <sup>3</sup> )		Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE
	Reale	Modello 3D ECLIPSE	Reale	Modello 3D ECLIPSE	
2007	53	53	53	53	3%
2008	422	422	474	474	25%
2009	379	379	853	853	46%
2010	300	300	1154	1154	62%
2011	199	199	1353	1353	72%
2012	114	114	1467	1467	78%
2013	87	87	1554	1554	83%
2014	81	81	1635	1635	87%
2015	58	58	1694	1694	90%
2016	42	42	1735	1735	93%
2017	30	30	1765	1765	94%
2018	30	30	1795	1795	96%
2019	24	24	1819	1819	97%
2020		21		1840	
2021		18		1858	
2022		12		1870	
2023		3		1873	

Figura 5 - Campo di TLA: produzione reale e da modello *Eclipse* 2019Figura 6 - Campo di TLA: grafico di produzione reale e da modello *Eclipse* 2019

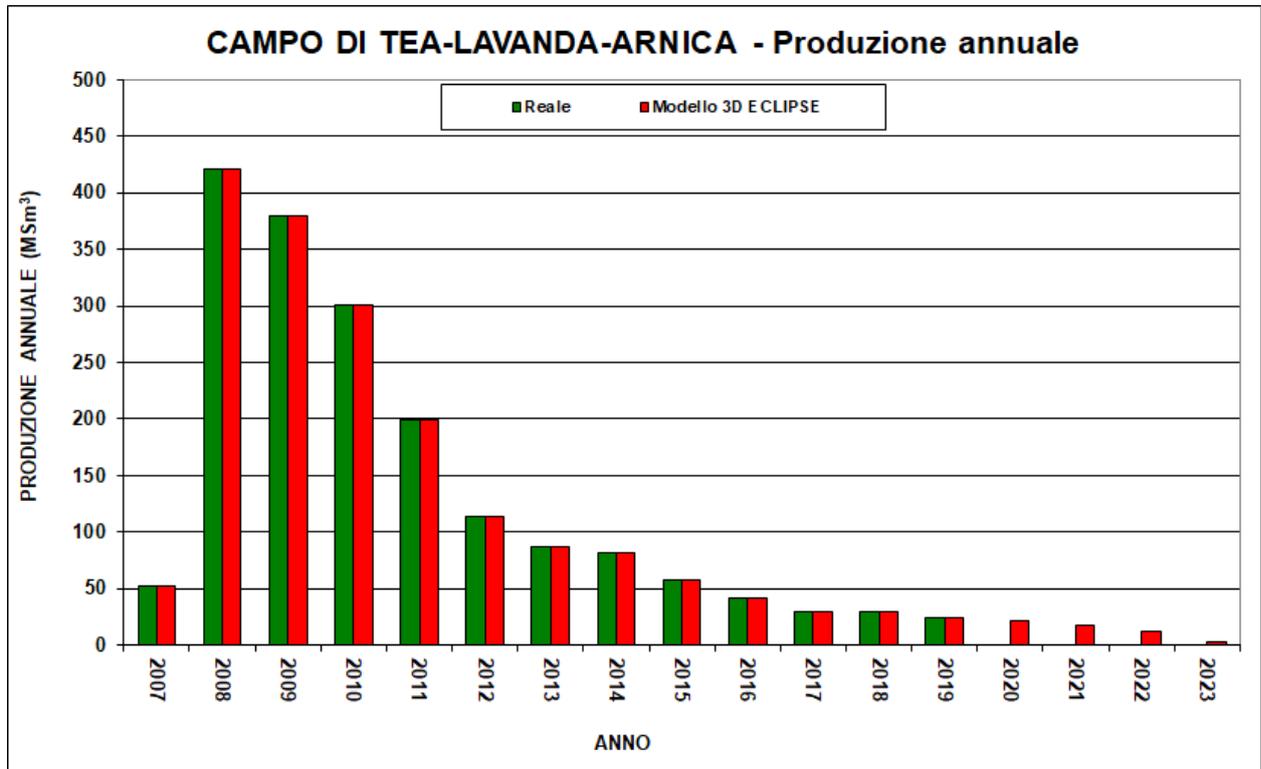


Figura 7 - Campo di TLA: produzioni (annuale) reale e da modello *Eclipse* 2019

CAMPI DI TEA-LAVANDA-ARNICA									
Data	Livello PL3-H			Livelli PL3-H+H1			Livello PL3-F1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
19/10/1999	304	Lav 1 Dir		305	Lav 1 Dir		300	Lav 1 Dir	
29/07/2008	255		Lav 1 C/L	264		Tea 2 C	233		Lav 2 C/L
02/05/2009	220		Lav 1 C/L	235		Tea 2 C	195		Lav 2 C/L
09/06/2011	166		Lav 1 C/L				159		Lav 2 C/L
17/10/2011	167		Lav 1 C/L	183		Tea 2 C	174		Lav 2 C/L
13/12/2013	145		Lav 1 C/L						
16/10/2014	140		Lav 1 C/L				195		Lav 2 C/L
24/07/2015	134		Lav 1 C/L				235		Lav 2 C/L
08/12/2016	134		Lav 1 C/L				256		Lav 2 C/L
30/12/2017	169		Lav 1 C/L				265		Lav 2 C/L
02/12/2018	181		Lav 1 C/L				272		Lav 2 C/L
14/01/2020	195		Lav 1 C/L				277		Lav 2 C/L

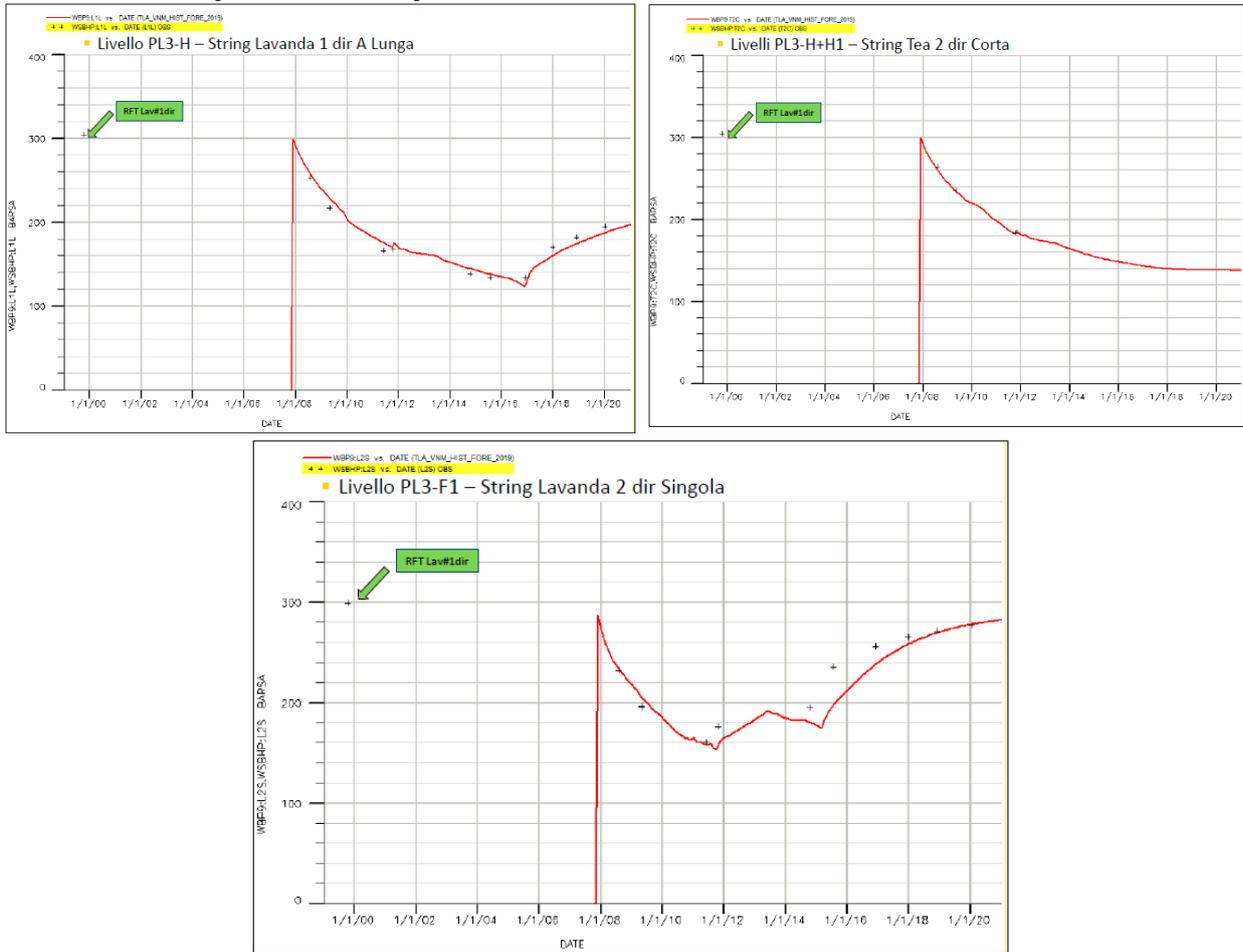


Figura 8 – Campo di TLA: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello *Eclipse* 2019

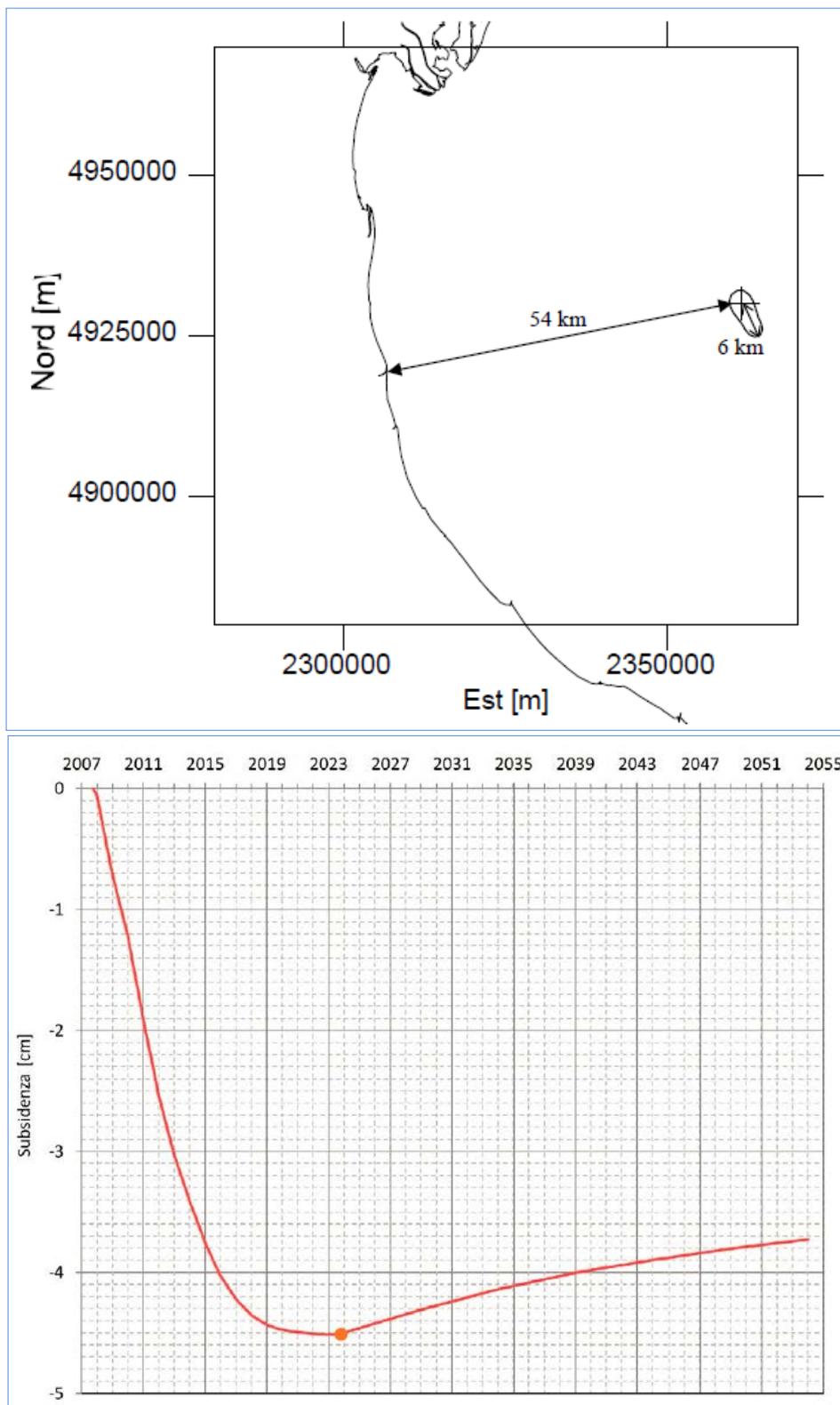


Figura 9 - Campo di TLA: curve di iso-subsidenza (in alto) a fine simulazione (2054) ed evoluzione nel tempo della subsidenza massima (in basso). Il cerchio arancione indica l'abbassamento atteso al termine della produzione (settembre 2023).

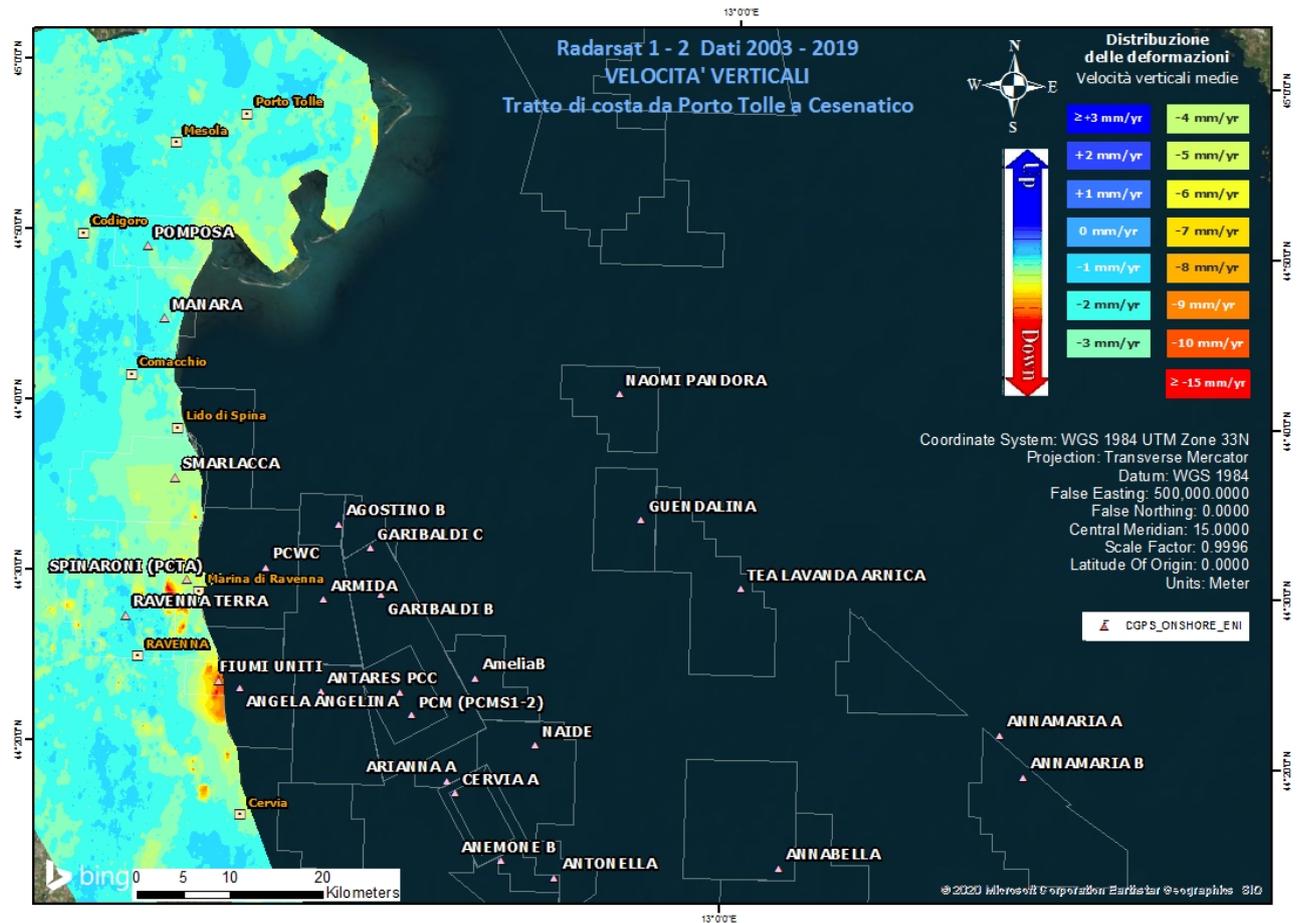


Figura 10 - Campo di TLA: analisi dati SAR dal 2003 al 2019

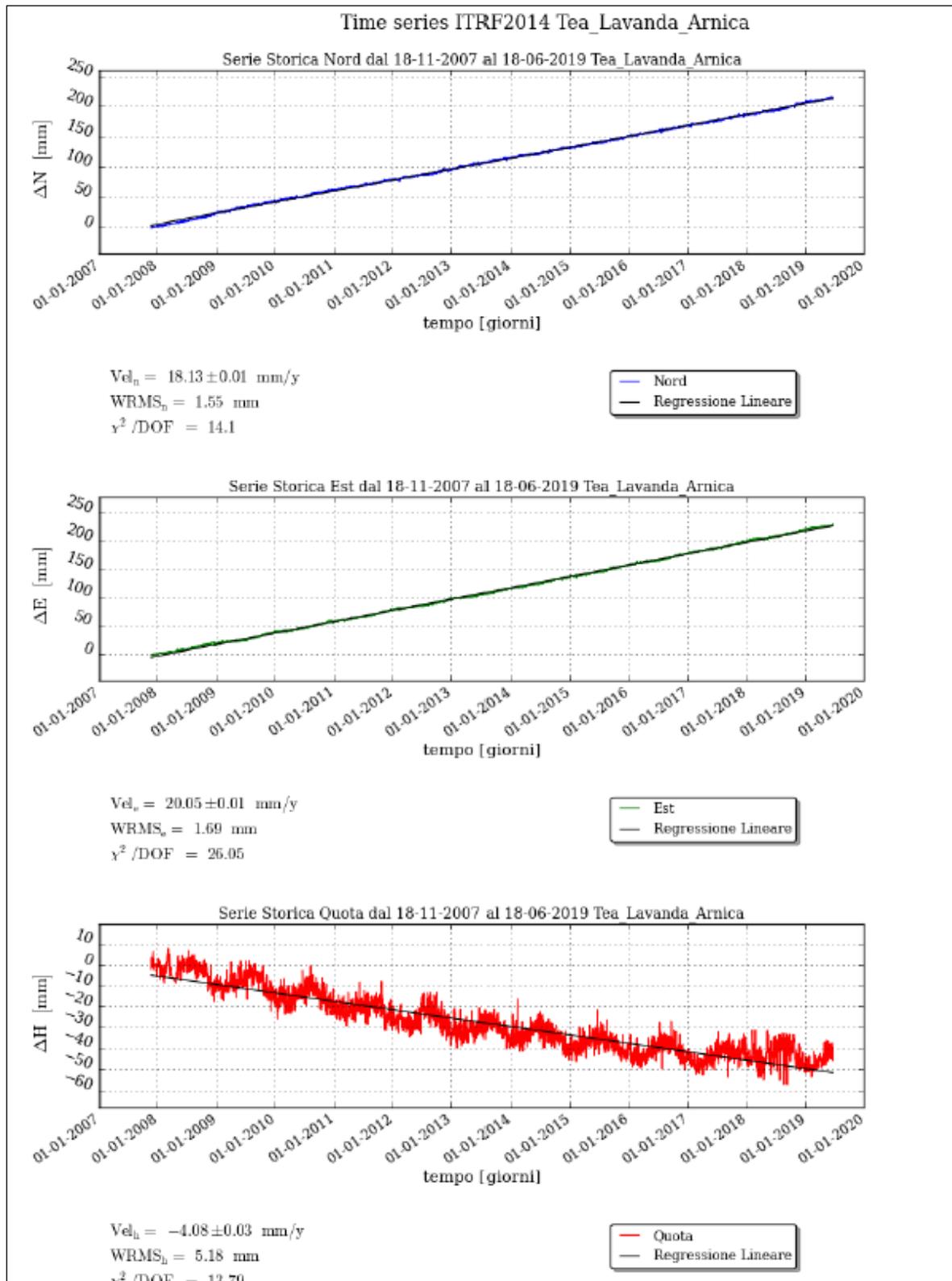
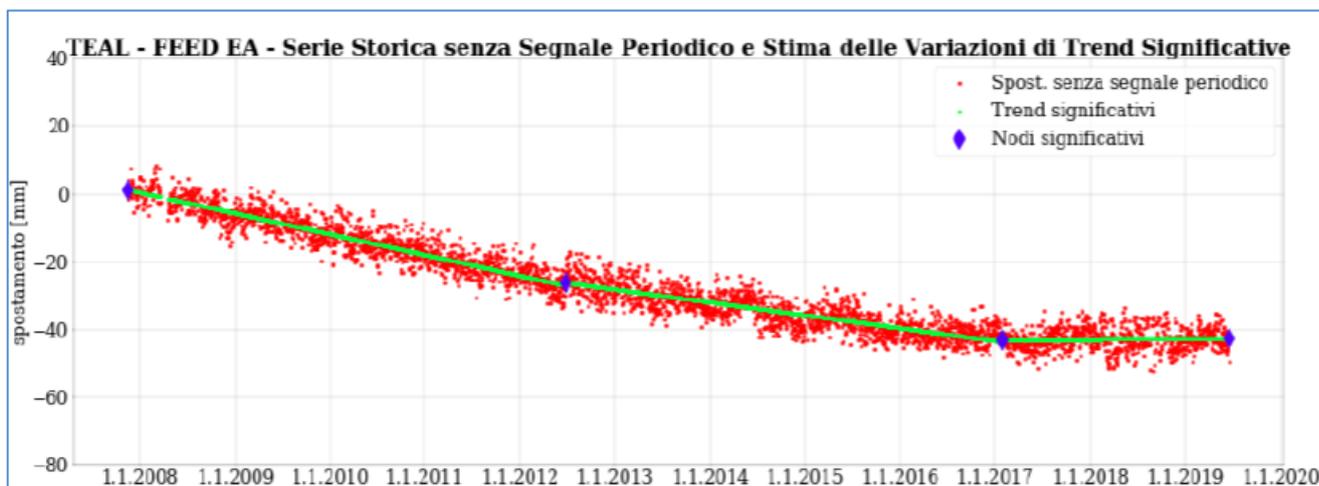


Figura 11 - Campo di TLA: serie storiche di misure CGPS

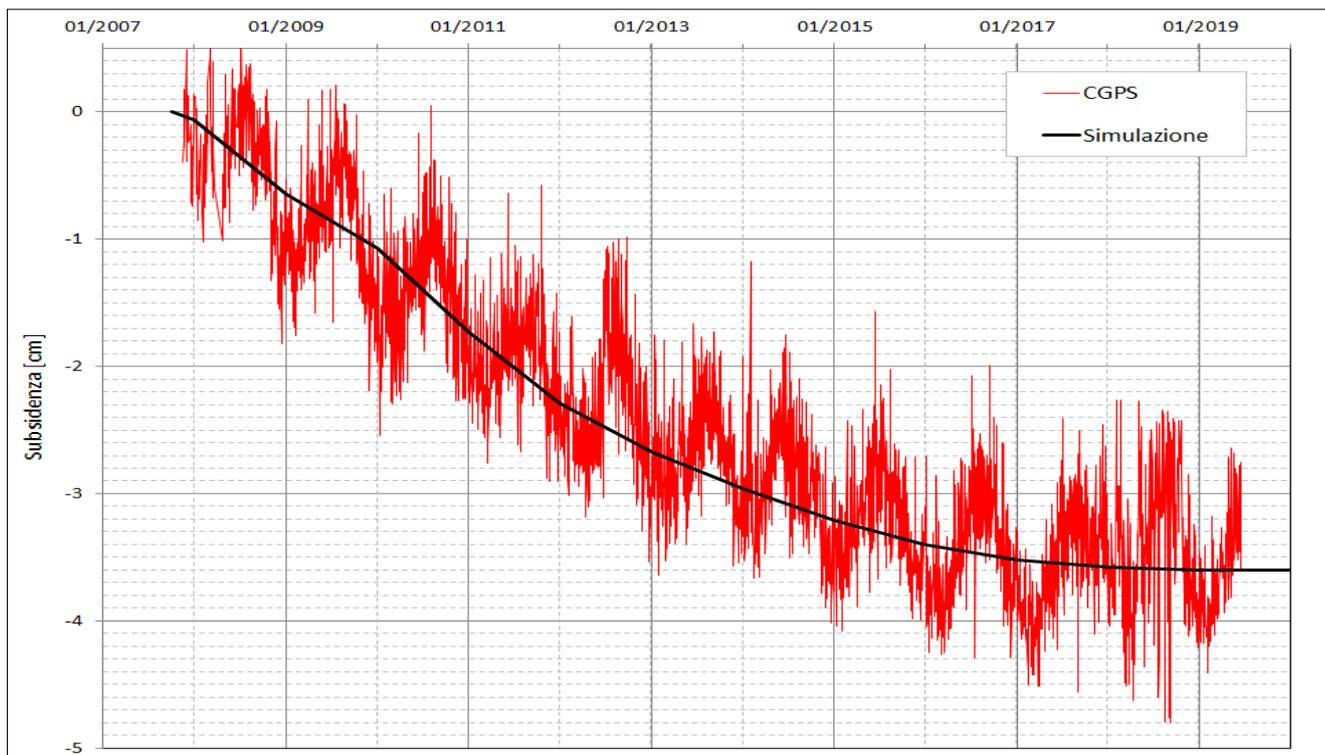


FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo		velocità	sigma
		[mm/y]	[mm/y]
18/11/2007 - 24/04/2012		-6.00	0.1
24/04/2012 - 29/01/2017		-3.65	0.1
29/01/2017 - 31/12/2019		0.38	0.15

Figura 12 - Campo di TLA: analisi della serie storica di misure CGPS (misure disponibili fino al 18/06/2019).

CAMPO	Inizio produzione	Fine produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse)	Riserve prodotte @ dic.2019	Max subsidenza prevista (scenario di riferimento)	Ultimo aggiornamento studio	CGPS		
						inizio registrazione	vel.media (mm/a) @ dic.2019	anni di registrazione
ANEMONE	1978	2018	100%	-49cm al 2049	2019	2007	-4,6	12
ANNALISA	2000	2021	99%	-9cm al 2027	2018	2007	-3,5	12
ANNAMARIA	2009	2030	79%	-163cm al 2051	2017	2005	-100,9	14
BARBARA NW	1999	2035	79%	-44cm al 2029	2017	2008	-26,9	11
BONACCIA	1999	2026	95%	-233cm al 2073	2018	2008	-68,1	11
BONACCIA NW	2015					2015	-43,5	4
CALIPSO	2002	2025	92%	-84cm al 2026	2017	2007	-13,7	12
CALPURNIA	2000	2022	99%	-14cm al 2015	2017	2008	-0,4	11
CLARA EST	2000	2038	74%	-81cm al 2038	2017	2007	-14,4	12
CLARA NW	2016					2016	-24,8	3
CLARA NORD	2000	2021	99%	-34cm al 2016	2017	2007	-17,8	12
ELETTRA	2014	2029	69%	-11cm al 2061	2017	2014	-17,8	5
FAUZIA	2014	2023	82%	-5cm al 2068	2017	2014	-4,1	5
GUENDALINA	2011	2022	89%	-8,5cm al 2055	2018	2011	-6,3	8
NAIDE	2005	2020	100%	-8cm al 2020	2017	2005	-3,6	14
NAOMI - PANDORA	2001	2037	55%	-2,6cm al 2049	2017	2002	-2,1	17
PCME (PCMS)	2001	2014	100%	-5,4cm al 2020	2016	2005	-3,9	14
REGINA	1997	2030	99%	-130cm al 2061	2017	2007	-23	12
TEA - LAVANDA - ARNICA	2007	2023	97%	-5cm al 2023	2019	2007	-4,1	12

Figura 13 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli



**Figura 14 - Campo di TLA: confronto tra spostamento simulato da modello (linea rossa) e spostamento misurato (linea nera), in corrispondenza della stazione CGPS di Tea**

campo TEA-LAVANDA-ARNICA (Eni 100%)																					
<b>DATI DI CAMPO</b>		DECRETO VIA n. 00149 del 02 marzo 2004 (notifica DSA n. 0010973 del 13 aprile 2006)																			
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (TEA-LAVANDA ARNICA)																			
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #0056b3; color: white;">STUDIO DI GIACIMENTO</th> <th style="background-color: #0056b3; color: white;">SIA</th> <th style="background-color: #0056b3; color: white;">ULTIMO AGGIORNAMENTO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"</td> <td>MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"</td> <td>Agg. studio giac. - Scheda riassuntiva - Rel. IPET E90FED83.0 (dicembre 2019)</td> </tr> <tr> <td>RISERVE (MSm<sup>3</sup>)</td> <td>1536</td> <td>1873</td> </tr> <tr> <td>MOD. GEOMECCANICO</td> <td>GEERTSMA SEMANALITICO (luglio 2001)</td> <td>ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ dicembre 2019</td> </tr> <tr> <td>MAX SUBS AL CENTRO (cm)</td> <td>1,8 (dopo 7 anni)</td> <td>5 cm @ 2023 a fine produzione (scenario di riferimento)</td> </tr> <tr> <td>MINIMA DISTANZA DALLA COSTA (km)</td> <td>#</td> <td>54 Km @ 2054 (FINE SIMULAZIONE)</td> </tr> </tbody> </table>		STUDIO DI GIACIMENTO	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"	Agg. studio giac. - Scheda riassuntiva - Rel. IPET E90FED83.0 (dicembre 2019)	RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	1536	1873	MOD. GEOMECCANICO	GEERTSMA SEMANALITICO (luglio 2001)	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ dicembre 2019	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	1,8 (dopo 7 anni)	5 cm @ 2023 a fine produzione (scenario di riferimento)	MINIMA DISTANZA DALLA COSTA (km)	#	54 Km @ 2054 (FINE SIMULAZIONE)
STUDIO DI GIACIMENTO	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO																			
MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"	Agg. studio giac. - Scheda riassuntiva - Rel. IPET E90FED83.0 (dicembre 2019)																			
RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	1536	1873																			
MOD. GEOMECCANICO	GEERTSMA SEMANALITICO (luglio 2001)	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ dicembre 2019																			
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	1,8 (dopo 7 anni)	5 cm @ 2023 a fine produzione (scenario di riferimento)																			
MINIMA DISTANZA DALLA COSTA (km)	#	54 Km @ 2054 (FINE SIMULAZIONE)																			
CONCESSIONE		STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI																			
DATA SCADENZA CONCESSIONE		<b>LIVELLAZIONI</b>																			
N. POZZI		<b>MARKERS</b>																			
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )		<b>CGPS</b>																			
START UP PRODUZIONE		<b>SAR</b>																			
FINE PRODUZIONE PREVISTA		ACQUISITI DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA) ANTISTANTE IL CAMPO NEL PERIODO 1999-2009, 2011, 2014 e 2017. I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM IL PROSSIMO RILIEVO DELLA RETE DI LIVELLAZIONE (DORSALE ADRIATICA) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO  NON PRESCRITTI  OPERATIVO DAL 2007  ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ DIC 2019 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DEI CAMPI DI TLA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA. ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO																			
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> )																					
% RISERVE PRODOTTE																					

**Figura 15 - Campo di TLA: Scheda di sintesi dei dati del campo**

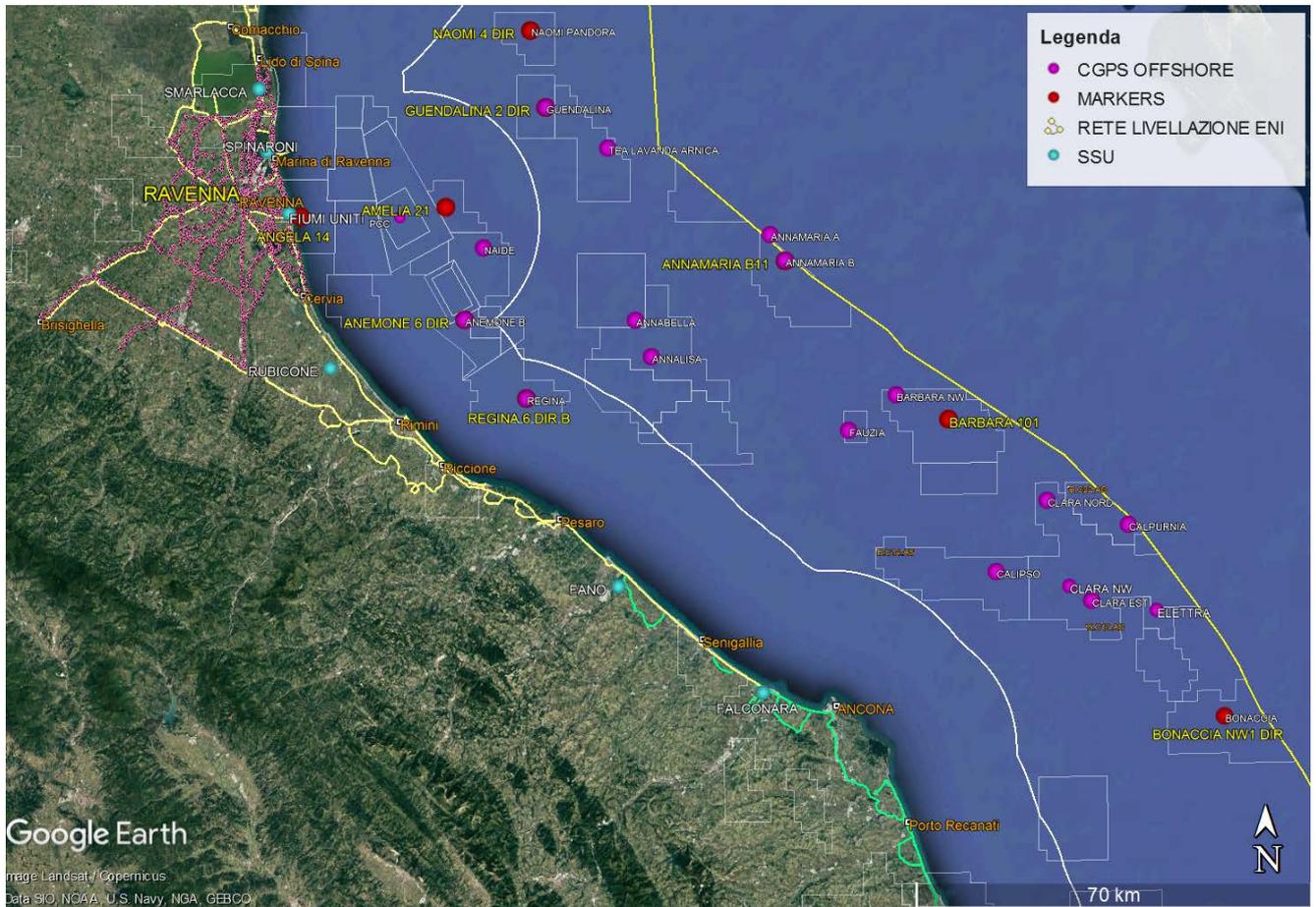


Figura 16 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

## Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2019

Le elaborazioni dei dati InSAR per il periodo 2003 – 2019 sono state effettuate con lo stesso algoritmo utilizzato per le analisi dei dati dell'anno precedente.

In seguito verrà descritto con maggior dettaglio l'algoritmo utilizzato (vedi nota a fondo paragrafo "Tecnica PSP-DIFSAR"), cercando di mettere in luce le differenze dei principali algoritmi utilizzati in interferometria radar.

### Analisi dati InSAR 2003 – 2019

L'analisi dei dati SAR ha interessato una serie di data-set, elaborati in fase di processamento in modo tale da garantire continuità spaziale dei dati.

Da un'analisi delle differenze tra le velocità medie annuali misurate dai CGPS presenti nell'area di interesse e quelle dei PS (Permanent Scatterer) presenti in un intorno di circa 300 m centrato nel corrispondente CGPS (Tab. 1), si è scelto di accorpate i data-set in due macro-aree, in modo tale che la taratura del dato InSAR minimizzi le differenze tra quest'ultimo e le misure CGPS.

In Tab. 1 vengono presentate: le velocità verticali dei CGPS ( $V_{vert\_CGPS}$ ), e il corrispondente scarto quadratico medio ( $sqm\_CGPS$ ); la media delle velocità verticali dei permanent scatterers nell'intorno avente come centro il CGPS corrispondente ( $Media\_V\_SAR$ ) e il corrispondente scarto quadratico medio ( $sqm\_SAR$ ); la differenza tra le velocità CGPS e SAR e il relativo scarto quadratico medio. Tutte le misure sono in millimetri/anno.

	CGPS	$V_{vert\_CGPS}$ [mm/yr]	$sqm\_CGPS$ [mm/yr]	$Media\_V\_SAR$ [mm/yr]	$sqm\_SAR$ [mm/yr]	$Diff\_VEL$ $CGPS-SAR$ [mm/yr]	$sqm\_diff$ [mm/yr]
RAVENNA	SMARLACCA	-6,16	0,01	-3,39	1,21	-2,77	1,22
	SPINARONI	-7,80	0,01	-3,97	0,91	-3,83	0,92
	FIUMI UNITI	-13,73	0,02	-11,19	3,35	-2,54	3,37
FANO-AN- CONA	RUBICONE	-2,64	0,03	-2,93	1,81	0,29	1,84
	FANO	0,1	0,02	0,13	0,82	-0,03	0,84
	FALCONARA	-0,31	0,02	-0,22	1,50	-0,09	1,52
	ITALGAS	-0,06	0,02	0,46	0,72	-0,52	0,74

Tab. 1. Taratura dato InSAR con misure CGPS

La stazione CGPS di Manara è stata dismessa, pertanto non rientra nei calcoli per la taratura del dato InSAR 2019.

Come si può vedere in Tab. 1, le differenze di velocità tra dati CGPS e le velocità medie dei dati InSAR rappresentati nella penultima colonna hanno andamenti diversi nell'intera area, con differenze che si aggirano intorno 3 mm/anno di media per i primi 3 CGPS, mentre per gli ultimi 4 CGPS si notano differenze massime intorno a 0,5 mm/anno. Di conseguenza si è scelto di mosaicare i diversi data-set in due macro-aree (Fig. 1):

1. Area di Ravenna
2. Area di Fano-Ancona

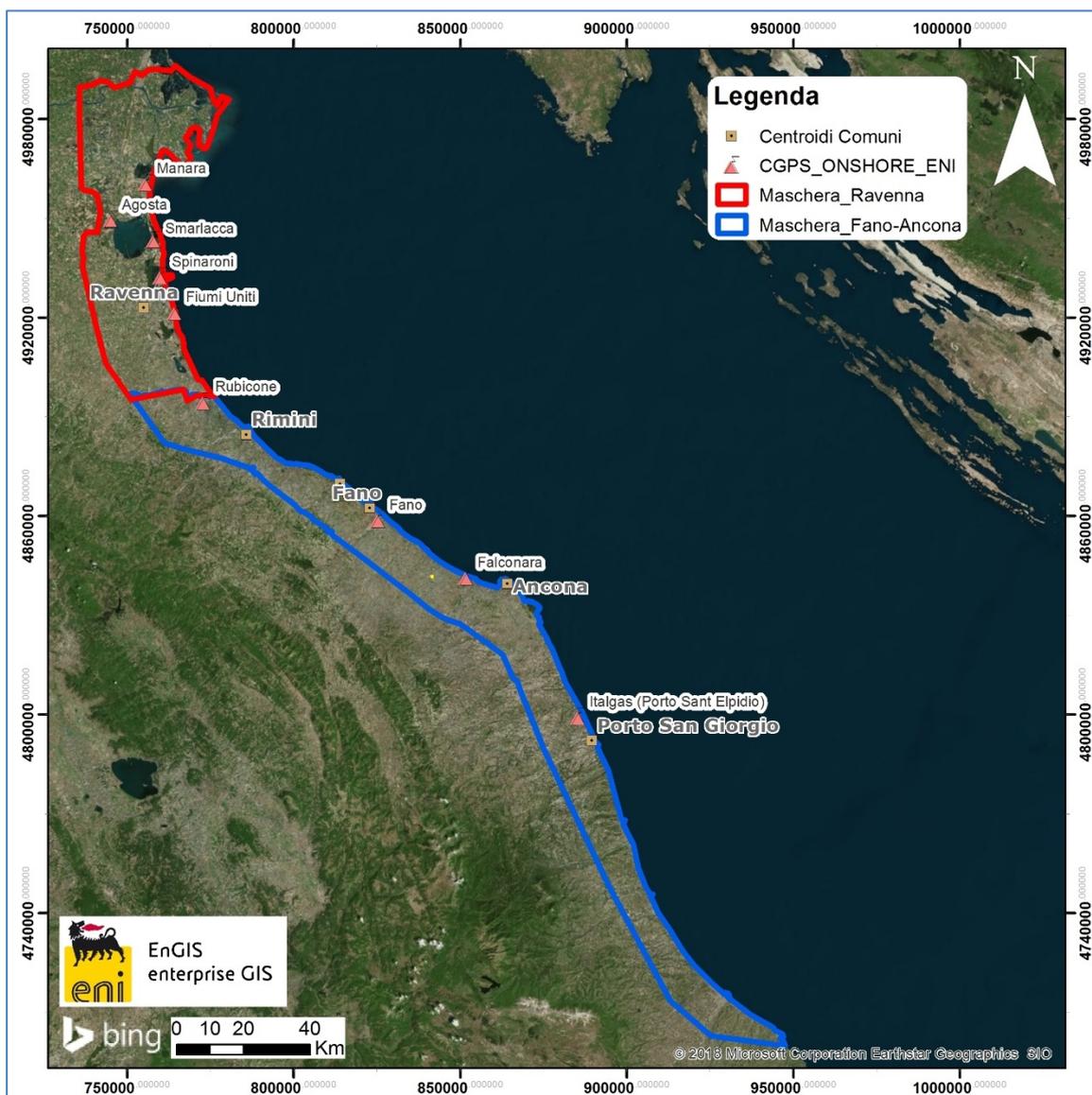


Fig. 1 – Mappa mosaicatura dati InSAR

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 28 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Complessivamente risultano presenti le seguenti stazioni CGPS afferenti alla rete Eni:

1. **Area Ravenna:** *Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti*
2. **Area Fano-Ancona:** *Rubicone, Fano, Falconara, Italgas*

Il processo di calibrazione è stato realizzato utilizzando le informazioni derivanti dalle stazioni di monitoraggio CGPS esistenti all'interno delle aree analizzate, partendo dalle stazioni che presentano una serie storica più consistente (Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti).

Si è realizzata quindi la calibrazione dei dati SAR partendo dall'area più a nord (area Ravennate), utilizzando i dati di velocità della stazione di Smarlacca; i dati delle stazioni di Fiumi Uniti e di Spinaroni sono stati utilizzati esclusivamente come valore di verifica dei risultati ottenuti con la calibrazione. La determinazione delle velocità verticali con dati CGPS è stata calcolata sulla serie storica totale del dato, che per quanto riguarda le postazioni di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti ha un inizio di acquisizione leggermente anteriore rispetto a quello dei dati SAR. Queste velocità così calcolate hanno una differenza sotto il decimo di millimetro/anno, rispetto a quelle calcolate sullo stesso periodo di acquisizione, da considerarsi pertanto trascurabile ai fini di questo studio.

L'analisi dei dati SAR non calibrati, relativi all'area Ravennate nell'intorno della stazione CGPS di Smarlacca per un raggio di 300 metri, ha evidenziato una velocità media pari a  $-3,39 \pm 1,21$  mm/anno. Considerando la velocità determinata con il CGPS di  $-6.16 \pm 0,01$  mm/anno, si rileva una differenza di  $-2,77 \pm 1,22$  mm/anno. Per questo motivo ai valori di velocità media della componente verticale determinata con il monitoraggio SAR, è stato aggiunto il valore di  $-2,77 \pm 1,22$  mm/anno. Successivamente sono stati confrontati i punti SAR, che ricadevano in un intorno di raggio pari a 300 m, rispetto ai CGPS di Fiumi Uniti e Spinaroni. Il confronto mostra delle differenze, tra i singoli CGPS e i dati SAR calibrati, sotto il millimetro: ciò conferma la validità della calibrazione effettuata.

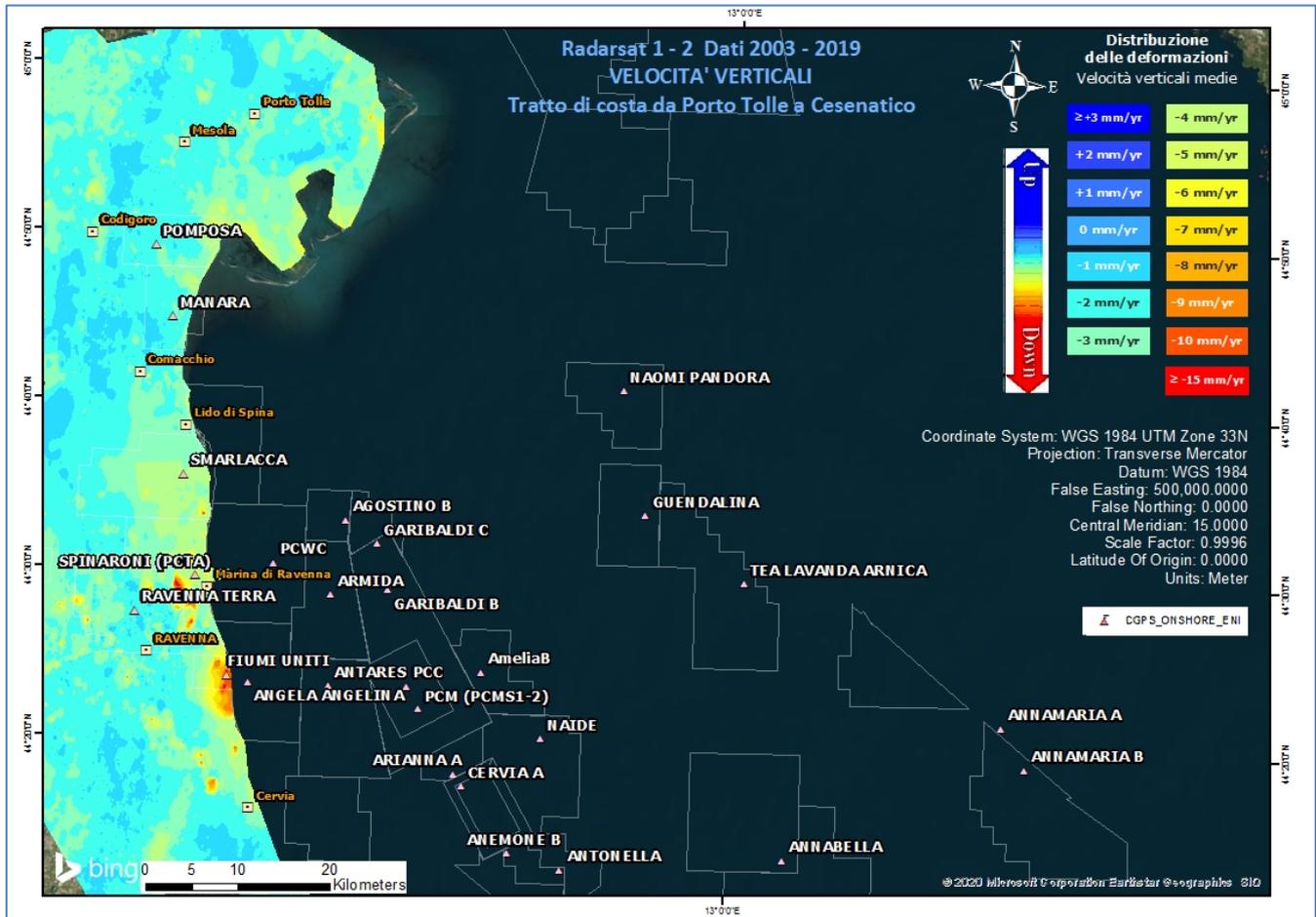


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2019, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

Come già effettuato nel 2018, l'altro data set (Area di Fano-Ancona, vedi Fig. 1) verrà analizzato separatamente dall'area Ravennate in quanto è stata rilevata una coerenza delle misure SAR con le misure delle stazioni CGPS interne a ciascun area.

Analizzando l'area SAR di Fano-Ancona, si evidenzia come le velocità dei CGPS di Rubicone, Fano, Falconara e Italgas siano allineate con le velocità misurate dal SAR, con uno scarto inferiore al mezzo millimetro (Tab. 1). Si fa presente che per il confronto viene considerato un intorno di circa 300 m, e la velocità dei dati SAR è una media delle velocità verticali dei Permanent Scatterer (PS) che ricadono all'interno di questo intorno. Considerata l'esiguità della differenza tra il valore misurato dal CGPS di FANO e quella del dato SAR ( $-0,03 \pm 0,84$  mm/anno), non si è ritenuto necessario eseguire una calibrazione. Come è possibile notare in Tab.1 per i vari CGPS presenti nell'area, il confronto mostra delle differenze rispetto ai dati SAR puri di circa 0,5 mm/anno in media.

In Fig. 3 è visualizzata l'interpolazione dei dati mosaicati, per l'area Fano-Ancona nel tratto di costa da Rimini ad Ortona. L'interpolatore utilizzato è l'algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) con Tool ArcGis Spatial Analyst®.

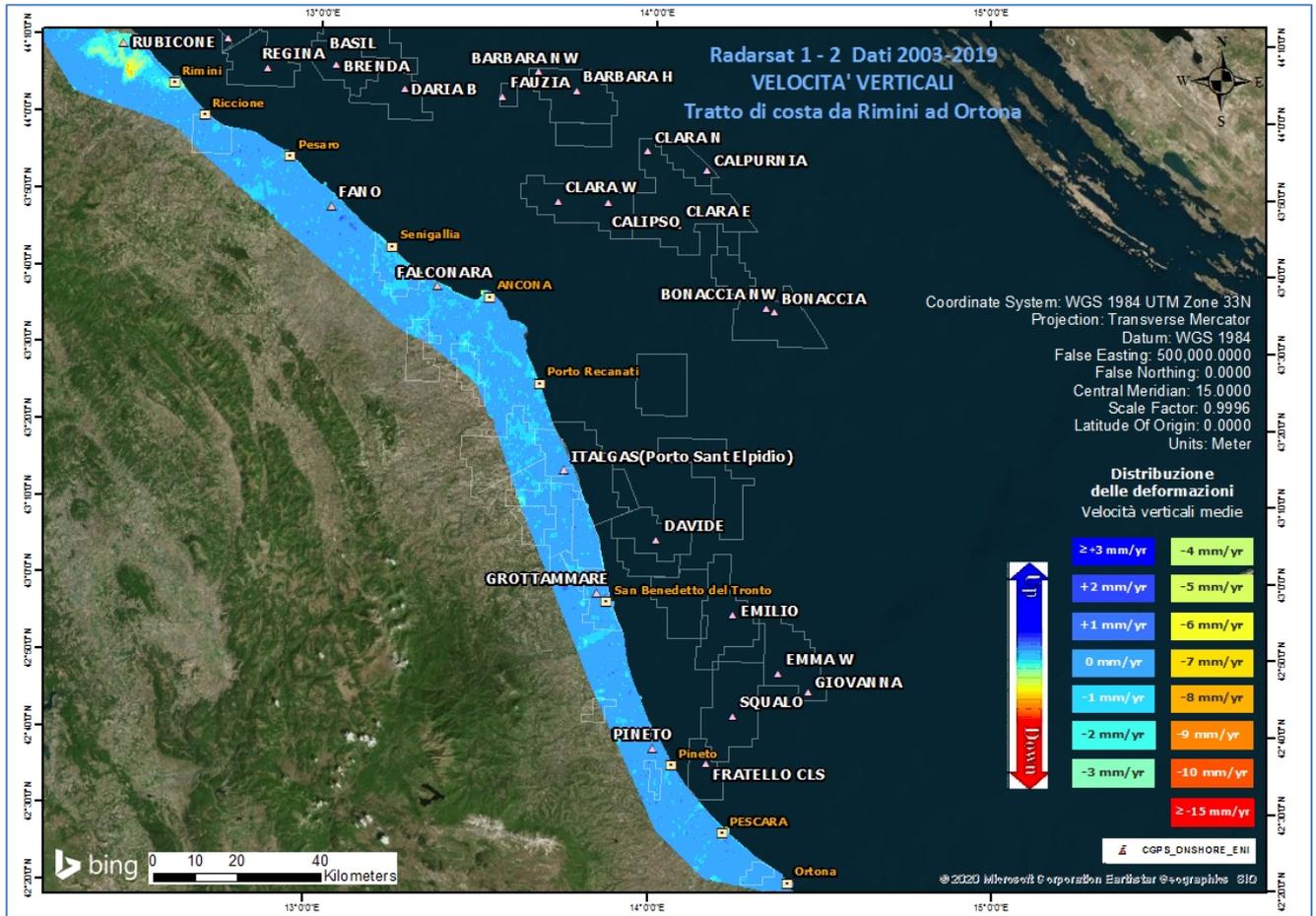


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2019, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

### Confronto dati SAR 2003 – 2018 vs 2003 – 2019

Il processo di sottrazione tra IDW 2019 e IDW 2018 permette di evidenziare graficamente eventuali differenze nell'andamento medio delle velocità verticali.

Come mostrato in Fig. 4 e Fig. 5 la sottrazione tra i due IDW non mostra differenze importanti, ed in ogni caso rientranti all'interno della deviazione standard dichiarata. Per quanto riguarda punti spot che mostrano differenze più marcate, da un'attenta analisi del dato si è riscontrato come si tratti di aree prevalentemente industriali o di recente edificazione, o zone in cui i dati SAR sono assenti o molto esigui, per cui l'interpolazione IDW ha generato un dato attendibile per un anno o il successivo, da cui derivano differenze non realistiche. Si sta studiando la possibilità di intervenire sul tool di interpolazione per evitare le zone di ambiguità in caso di aree con mancanza o esiguità di dati.

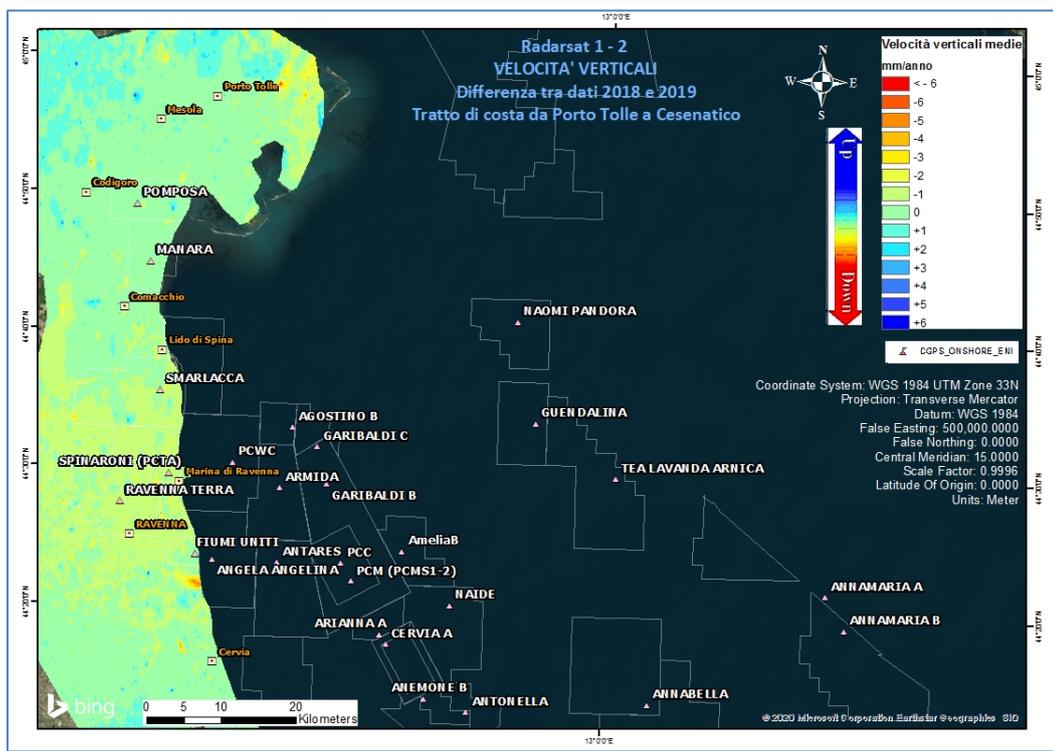


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2018 e il 2003-2019, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

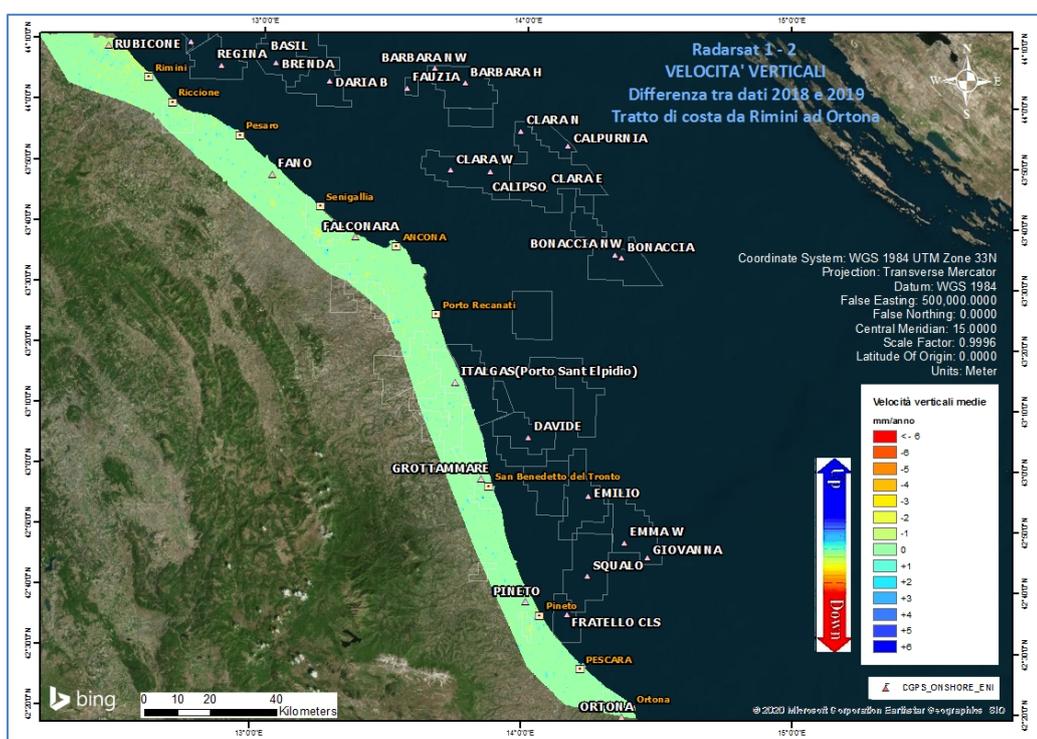


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2018 e il 2003-2019, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 32 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

### **Tecnica PSP-DIFSAR (Estratto dalle Linee guida MATTM 2009)**

La tecnologia interferometrica PSP-DIFSAR sviluppata da Telespazio/e-GEOS (<http://www.telespazio.it> / <http://www.e-geos.it>) è una tecnica d'interferometria differenziale SAR di tipo Persistent Scatterer Interferometry (PSI) che utilizza una procedura algoritmica proprietaria per l'individuazione e l'analisi dei Persistent Scatterers (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare movimenti lenti del terreno dovuti a frane, subsidenza, fenomeni vulcanici e sismici (Costantini et al., 2005). I PS corrispondono generalmente ad elementi al suolo, come manufatti (ad esempio, parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici in genere) oppure corpi naturali (ad esempio, rocce esposte) che si distinguono dagli altri, presenti nell'area esaminata, per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar". Questi punti presentano caratteristiche tali da permettere misure estremamente accurate della distanza sensore-bersaglio così da poter evidenziare spostamenti relativi dei PS nel tempo anche solo di pochi millimetri. L'interferometria differenziale si basa su un sensore SAR a bordo di un satellite che invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e riceve il segnale retrodiffuso. Misurando il ritardo di fase tra il segnale inviato e quello retrodiffuso si può determinare con estrema precisione la distanza tra il sensore ed il bersaglio. Se l'oggetto si trova in un'area soggetta a fenomeni di deformazione superficiale, il sensore, passando in istanti successivi sulla stessa area di interesse, rileva tra un'acquisizione e l'altra una variazione di distanza. Questo dato, dopo una complessa elaborazione per l'identificazione dei punti di misura e la rimozione dei contributi spuri (ritardi atmosferici, imprecisione nella conoscenza delle orbite, ecc.), rende possibili misure estremamente accurate di eventuali spostamenti superficiali lenti dell'area di interesse. Una delle peculiarità del metodo PSP è quella di sfruttare solo le proprietà del segnale relative a coppie di punti vicini, sia per identificare sia per analizzare i Persistent Scatterers. Infatti, due punti vicini sono affetti allo stesso modo da artefatti atmosferici ed orbitali, ed in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo). Il metodo PSP presenta le seguenti differenze rispetto alle tecniche PSI standard:

- non richiede calibrazione dei dati o interpolazioni basate su modelli (in particolare per la rimozione degli artefatti atmosferici ed orbitali);
- è meno sensibile alla densità dei PS;
- permette una migliore identificazione di PS in terreni naturali e di PS caratterizzati da movimenti non lineari nel tempo;
- in aggiunta è computazionalmente efficiente ed altamente parallelizzabile.

La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone vegetate o perennemente innevate. L'insieme dei PS sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 33 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

rete di stazioni GPS (Global Positioning System) permanente. La loro densità su scala regionale è però ordini di grandezza superiore a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali, fornendo un quadro d'insieme a costi decisamente più bassi rispetto a queste, dato che il sensore rileva punti di misura che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione trovandosi già sul terreno.

## Appendice B: stazioni *EPSU* lungo la fascia costiera compresa tra Comacchio e Cervia - aggiornamento dicembre 2019

Il monitoraggio della compattazione superficiale, lungo la fascia costiera adriatica compresa tra Comacchio e Cervia, è effettuato tramite 3 stazioni *EPSU* (*Extensometric Piezometric Survey Unit*) denominate: Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti. L'ubicazione di tali stazioni, installate tra il 1994 e il 1997, è riportata in Figura 1B.

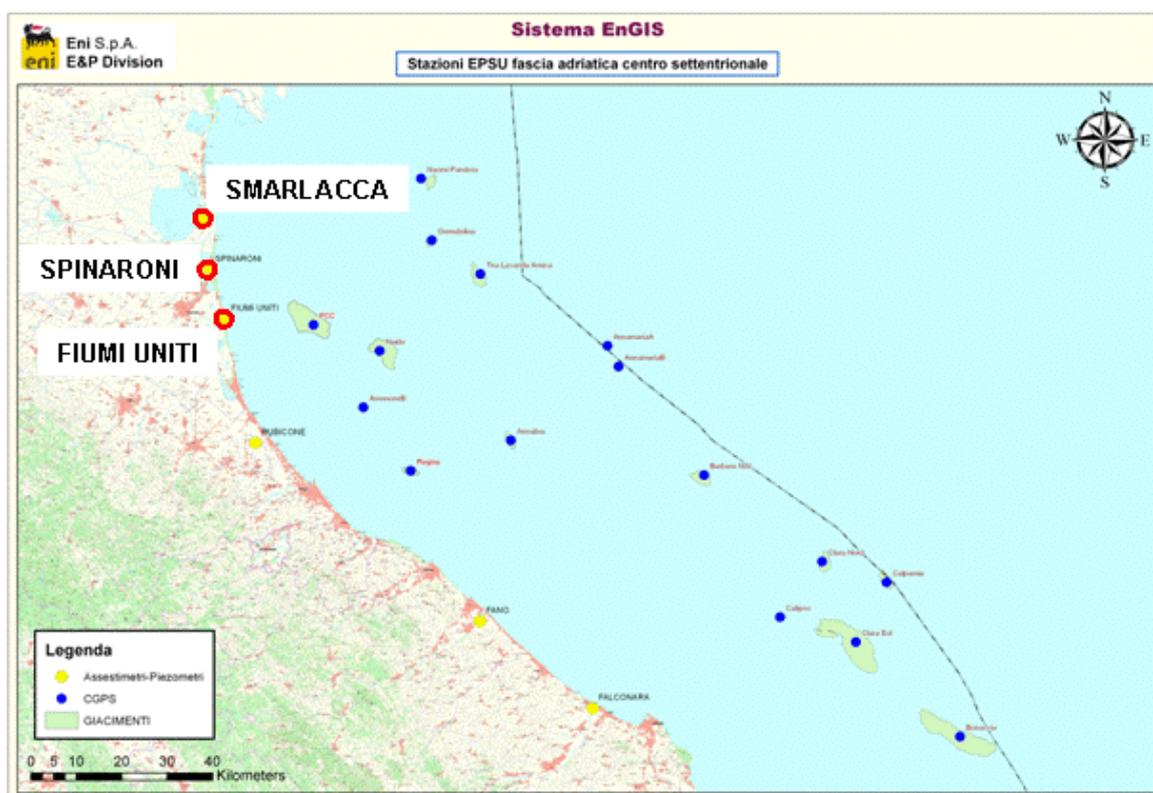


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

In generale una stazione *EPSU* è costituita da un assestmetro, associato a uno o più piezometri, con il corredo di strumentazione meteorologica per la misura della temperatura e della pressione atmosferica (termometri sia in foro che in superficie, e un barometro in modo da compensare le misure assestmetriche e piezometriche per le variazioni di temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in Figura 2B.

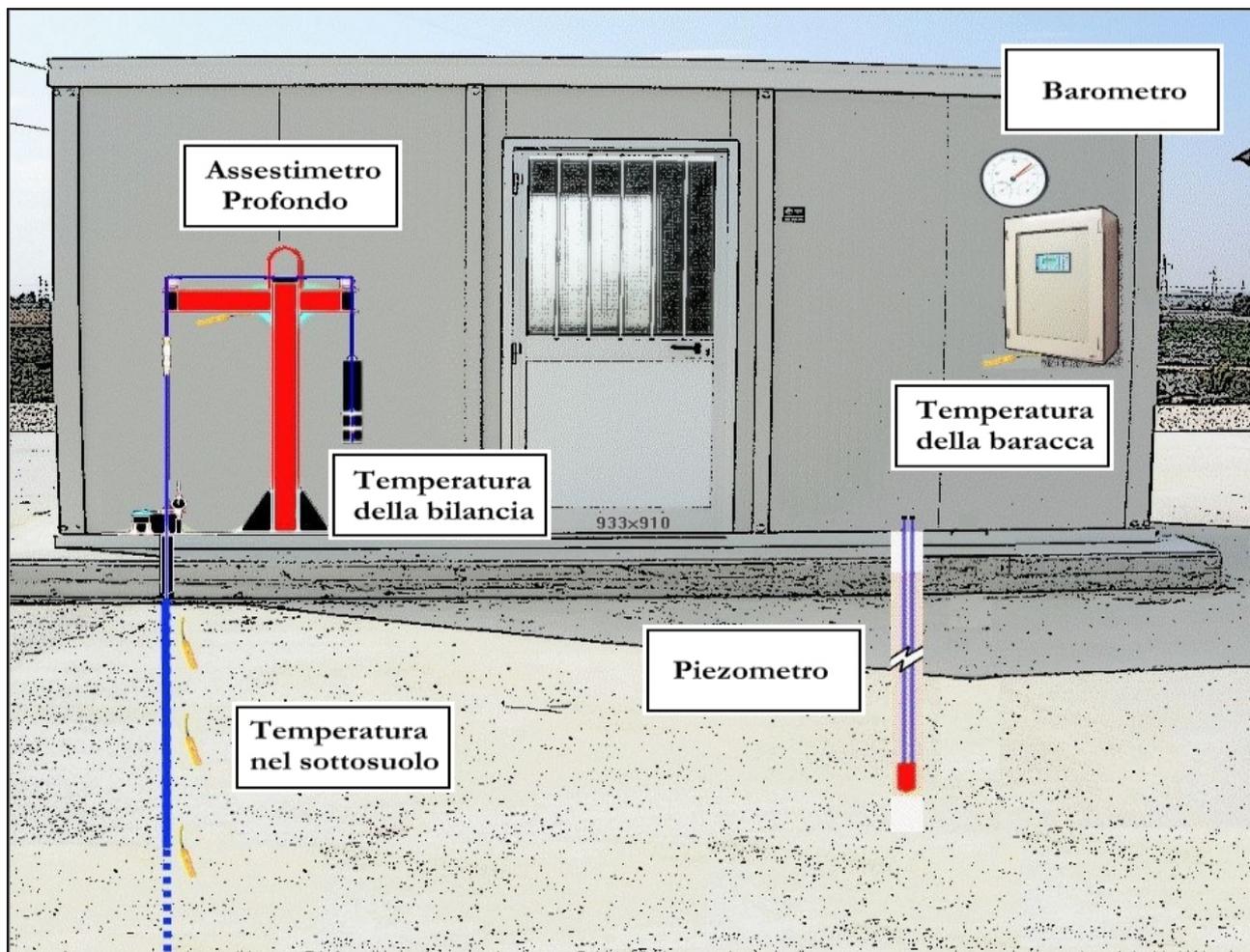


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

Più in dettaglio, in ciascuna delle 3 stazioni *EPSU* sono stati installati i seguenti dispositivi di misura:

Località'	Pozzo	Strumentazione	Profondità' (da P.C.)	Data d'installazione
<b>Smarlacca</b>		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Assestimetro superficiale	30 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
<b>Spinaroni</b>		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
<b>Fiumi Uniti</b>		Assestimetro profondo	372.85 m	Set. 1994
		Assestimetro superficiale	224.2 m	Set. 1994
		Piezometro profondo	360 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro intermedio	243 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro superficiale	148 m (disattivato)	Set. 1994
	PS-1	Piezometro tubo aperto	10.5 m	Dic. 2011
	PS-2	Piezometro tubo aperto	30.5 m	Dic. 2011
	PP-1	Piezometro tubo aperto	373.5 m	Dic. 2011
	PP-2	Piezometro tubo aperto	257 m	Dic. 2011
	PP-3	Piezometro tubo aperto	163 m	Dic. 2011

Per ciascuna stazione *EPSU* vengono di seguito presentati:

1. le principali caratteristiche;
2. grafici con tutti i dati registrati.

**N.B.:** Nella lettura dei dati riportati sui grafici relativi agli assestimetri, i valori positivi costituiscono la componente della compattazione (riduzione dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro); al contrario i valori negativi costituiscono la componente dell'espansione (aumento dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro).

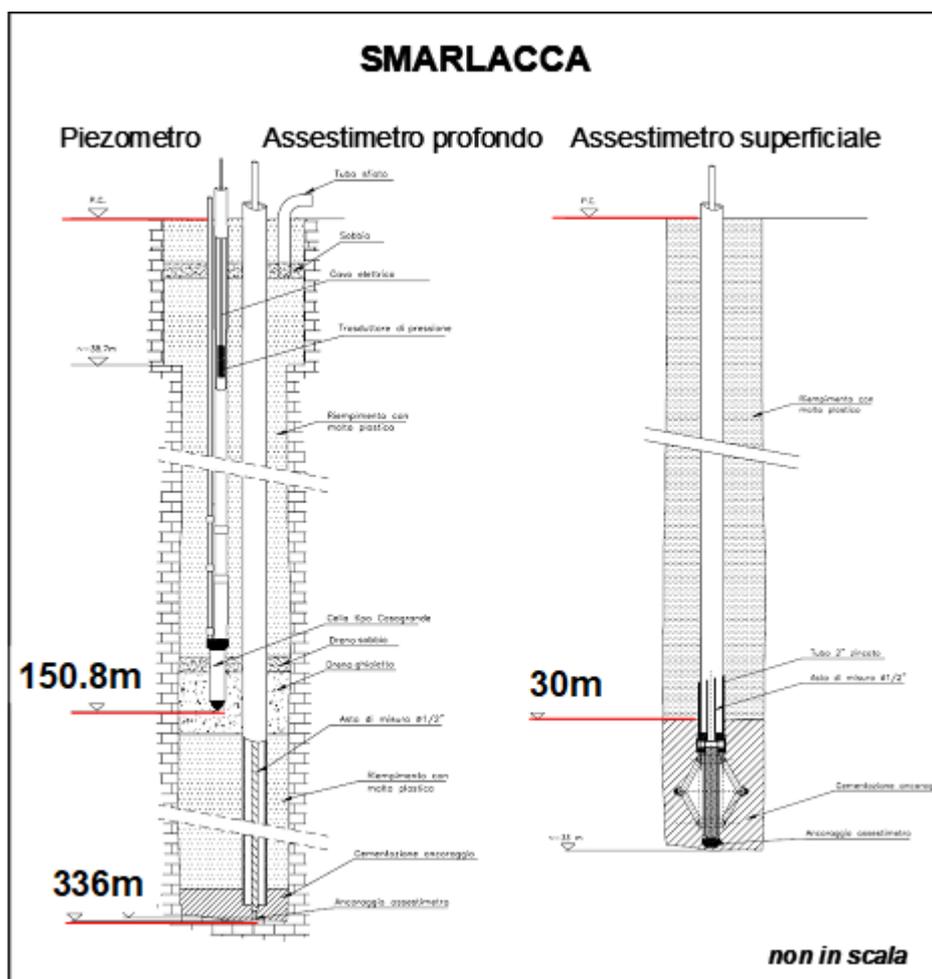
## **Stazione EPSU di Smarlacca** (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°35'40.00"N e 12°14'49.44"E.

La stazione è ubicata presso la località Valli di Comacchio, in provincia di Ravenna, a circa 2 Km a sud della foce del fiume Reno ed all'interno dell'area pozzo Eni denominata "Dosso Angeli Sud", ad una quota di 1 m s.l.m. .

La strumentazione è costituita da:

- assestometro profondo - quota bottom 336 m da p.c.
- assestometro superficiale – quota bottom 30 m da p.c.
- piezometro- quota cella 150.8 m da p.c.



**Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Smarlacca**

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 38 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Le attrezzature installate (Figura 3B) sono costituite principalmente da una doppia verticale assestometrica, ovvero un assestometro profondo (334.15 metri d'asta di misura) e uno superficiale (29.5 metri d'asta di misura). La loro messa in opera è stata fatta nel periodo 15 luglio 1997 - 20 ottobre 1997; il sistema è poi stato completato nel novembre 1997 e collaudato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori di misura ("misura di zero").

All'interno del pozzetto assestometrico è stato installato anche un piezometro Casagrande con la cella porosa posta alla profondità di 150.80 m dal piano campagna (p.c.).

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con la frequenza di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel periodo settembre 2003 – ottobre 2003 si sono persi dei dati per un guasto all'apparecchiatura di misura. A fine agosto del 2008 si è spurgato il piezometro che dopo l'intervento è stato ritenuto funzionante. Nell'ottobre del 2012, perdurando le registrazioni di valori anomali nei due tubi della cella Casagrande, si è fatto un nuovo intervento di pulizia al termine del quale lo strumento è stato giudicato non più in grado di fornire misure attendibili e, pertanto, non più funzionante.

Da inizio agosto 2017 e fino a inizio luglio 2018 l'acquisizione dati si è interrotta a causa di infiltrazioni nella copertura della struttura di ricovero delle apparecchiature di registrazione e raccolta dati, che sono state danneggiate. L'apparecchiatura è stata sostituita e la registrazione dei dati è ripresa il 10 luglio 2018. Per tutto il 2019 la strumentazione ha funzionato correttamente e non sono presenti lacune nelle serie dei dati registrati.

L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali e taratura di tutti i sensori è stata fatta in agosto e dicembre 2019.

### **Analisi dei dati assestometrici**

L'assestometro più profondo (336 m) misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 334.15 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale (30 m) a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 29.5 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati i dati relativi all'assestometro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella dell'8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 39 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

dell'assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Nel periodo luglio - settembre 2003, si osserva nell'andamento del grafico dell'assestometro profondo un salto (corrispondente a una compattazione) di 2.7 mm in un intervallo di 72 giorni; tale evento compare, anche se in misura minore, nel grafico dell'assestometro superficiale (Figura 4B). Anche se per tale periodo mancano i dati registrati per un guasto al sistema d'acquisizione, tale salto è confermato anche dalle misure effettuate con il comparatore meccanico durante i sopralluoghi per le manutenzioni ordinarie. Si tratta di un comportamento anomalo se rapportato con gli andamenti precedenti e successivi a detto periodo di osservazione. Il grafico storico mostra, infatti, una compattazione a velocità più o meno costante in tutti i periodi dell'anno, tranne che nel luglio-settembre 2003 in cui il fenomeno ha avuto un'accelerazione. Una compattazione nello stesso periodo è comunque vista anche dal CGPS: nel grafico di confronto (Figura 7B) le due curve mostrano le medesime modulazioni nello stesso arco di tempo. L'estate del 2003 è stata caratterizzata da temperature atmosferiche molto elevate e assenza di precipitazioni piovose, condizioni che potrebbero aver favorito una compattazione superficiale maggiore.

Dopo questo periodo gli assestometri sono tornati a registrare il solito trend a velocità costante. Per quanto riguarda i termometri installati lungo la verticale assestometrica, si segnala un guasto al sensore posto a quota -4 metri con interruzione delle misure da marzo 2013.

Le registrazioni di entrambi gli assestometri (superficiale e profondo) mostrano lo stesso trend di compattazione ed espansione del terreno con una correlazione molto elevata fra i rispettivi andamenti anche se, le velocità medie di compattazione (Figura 4B) sono risultate rispettivamente di circa 0.25 mm/a (foro superficiale) e circa 0.94 mm/a (foro profondo).

In particolare, per quanto riguarda la curva di compattazione registrata dall'assestometro profondo, si può osservare che, anche se la relativa velocità media, calcolata su tutta la serie temporale è di circa 0.9 mm/a, essa presenta un andamento più articolato nel tempo. Infatti, verso l'inizio del 2012 tale velocità di compattazione si dimezza, portandosi a circa 0.5 mm/a (Figura 5B), forse per effetto di un minor emungimento delle falde più profonde. Quest'ultima ipotesi è supportata dalla constatazione che la maggior parte della compattazione misurata si verifica in una porzione di terreno compresa tra la base dell'assestometro superficiale e la base di quello profondo, per uno spessore complessivo di circa 300 m (l'assestometro superficiale

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 40 - of 63
---	--	---------------------------------	-------------------

registra una compattazione minima, pari a poco più di 6 mm totali in oltre 21 anni: circa 0,3mm/a). In prossimità della stazione assestimetrica è stato installato 4 anni più tardi (2002) anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare in quella zona una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a circa -6.1 mm/a.

Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi di quelli monitorati con la stazione assestimetrica (cioè quelli più profondi di 336 m, base dell'assestimetro). Il CGPS infatti nei quasi 18 anni (17.6) di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 11.5 cm mentre invece l'assestimetro nello stesso periodo (considerando il 2002 di inizio del GPS) ha registrato una compattazione totale di poco più di 1.5cm.

Anche la curva del GPS mostra un andamento più articolato nel tempo, infatti come illustrato in Figura 6B, si può osservare che sino a circa l'inizio del 2015 il trend di abbassamento è quasi costante ed in linea (6.7mm/a) con la velocità media totale di tutta la serie (come già detto sopra circa 6.1mm/a), mentre dal 2015 ad oggi si osserva una diminuzione della velocità media di abbassamento a circa 4.2mm/a (Fig. 6B). Nella stessa figura è di nuovo riportata anche la curva dell'assestimetro, che però, come già detto in precedenza, fa registrare l'inizio della diminuzione di velocità qualche anno prima nel 2012, come se la porzione più superficiale del terreno reagisse più prontamente al trend di diminuzione della subsidenza in atto nell'area.

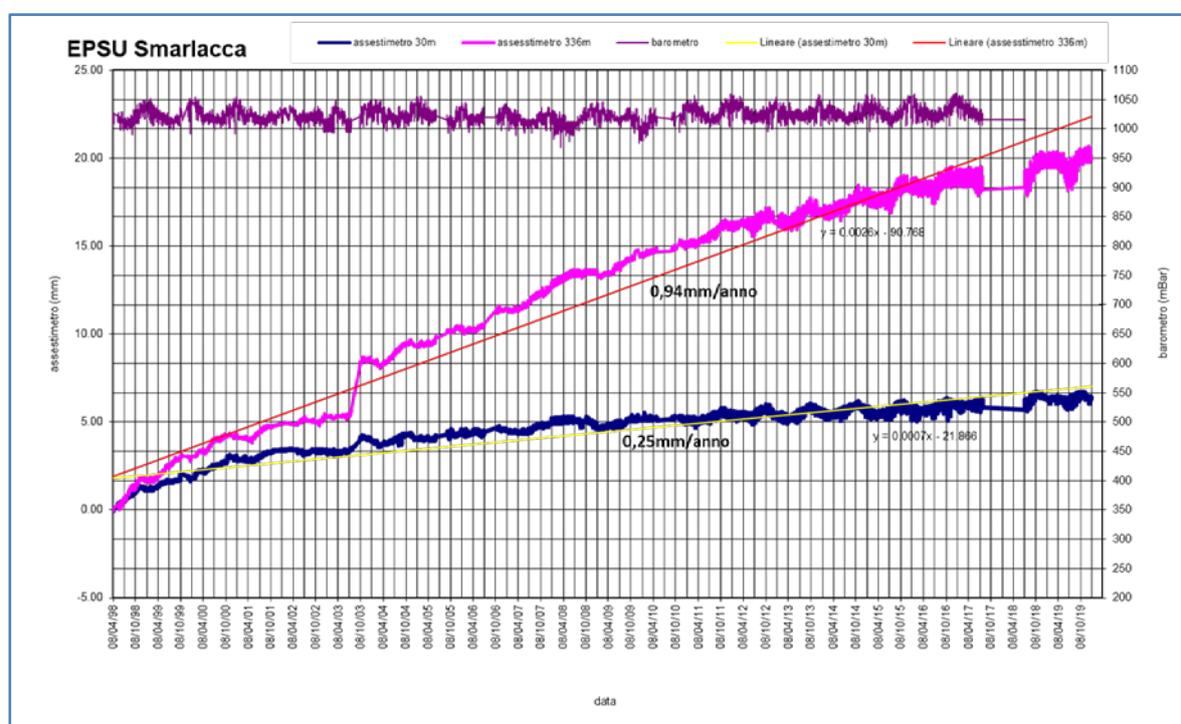
In Figura 7B è riportato il confronto fra le misure assestimetriche (sono riportate solo quelle registrate dalla strumentazione più profonda) e quella CGPS. Il grafico allegato mostra una buona correlazione tra entrambe le curve, che riflettono bene gli eventi stagionali.

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico:

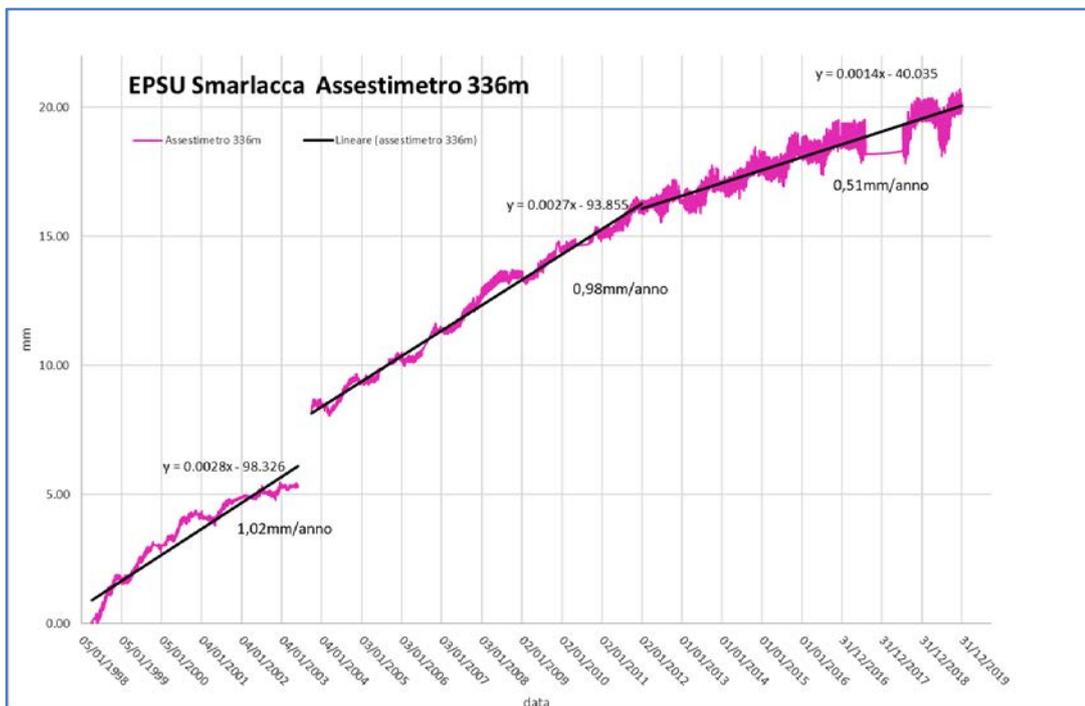
- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente con quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

## Analisi dei dati piezometrici

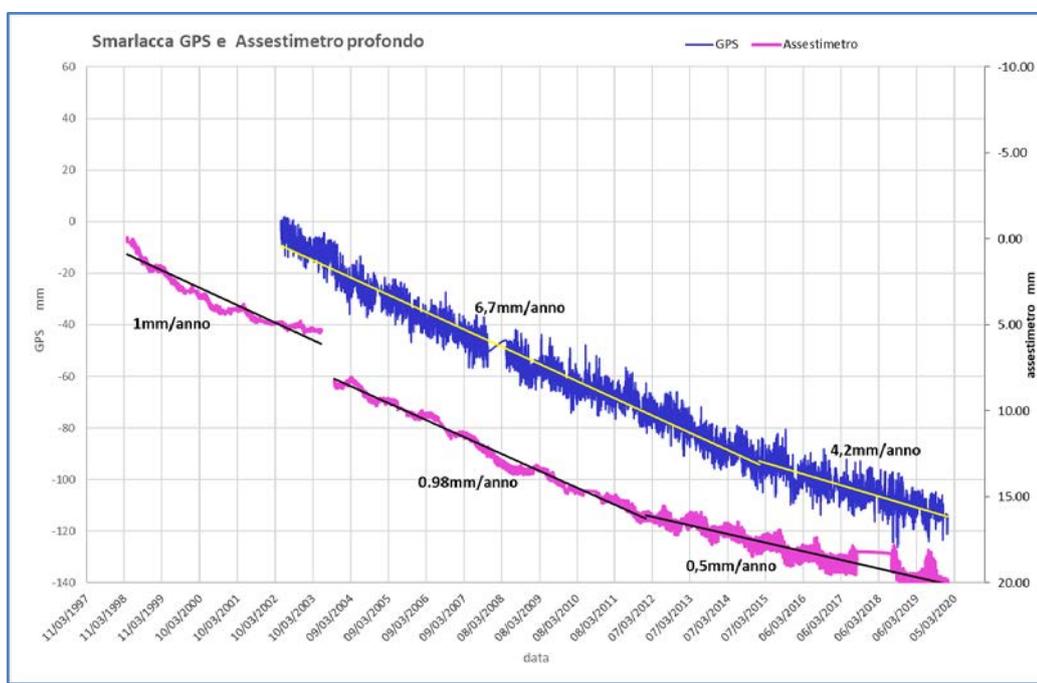
Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestimento, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.



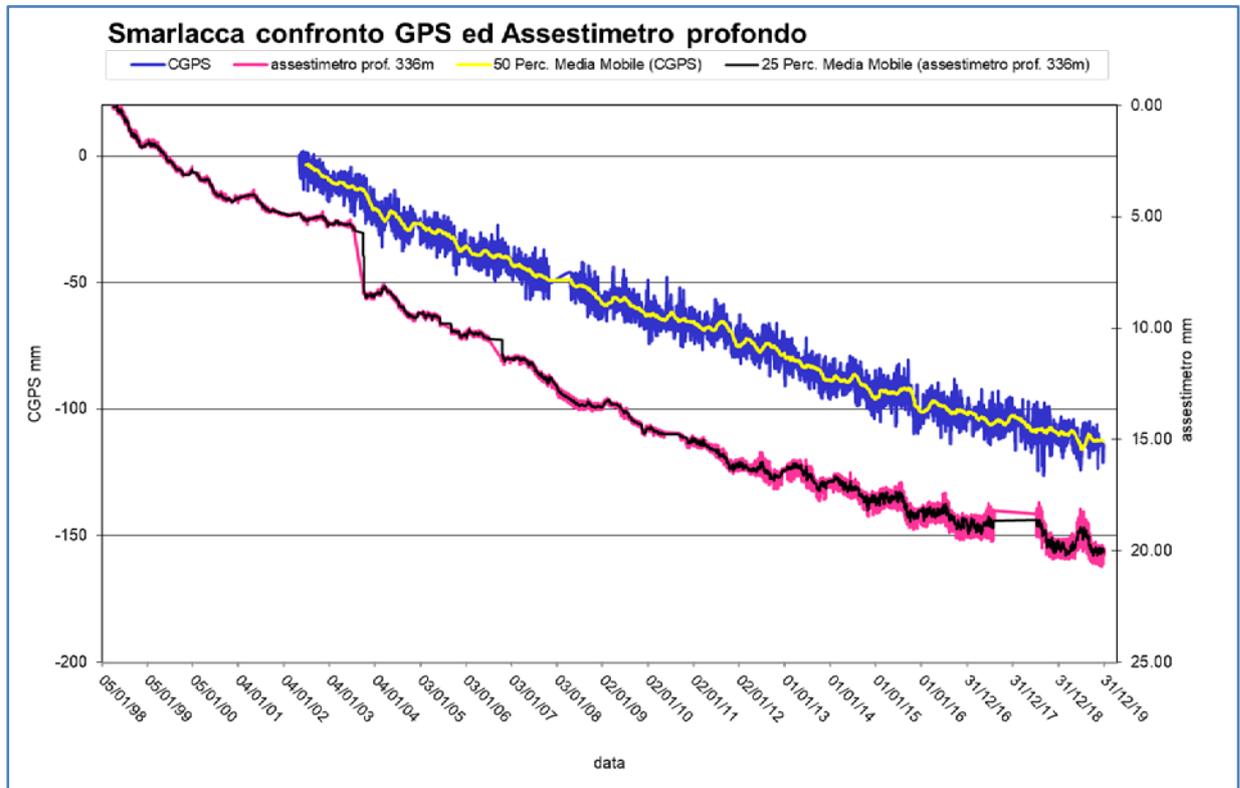
**Figura 4B - Serie storica delle misure assestimetriche e barometriche nella stazione EPSU di Smarlacca**



**Figura 5B – Trend curva di compattazione dell’assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca**



**Figura 6B – Confronto tra i trend di compattazione dell’assestimetro profondo e di subsidenza totale da CGPS per il sito di Smarlacca**



**Figura 7B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assestmetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca)**

N.B. nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS - spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa.

## Stazione *EPSU* di Spinaroni - (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°29'41.27"N e 12°16'01.27"E.

La stazione è ubicata in un'area, di proprietà del comune di Ravenna, adiacente all'impianto di depurazione HERA (ex AREA), a meno di un chilometro ad ovest dell'abitato di Porto Corsini e ad una quota di 1,5m s.l.m..

La strumentazione è costituita da:

- assestimetro - quota bottom 336 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella 150.8 m da p.c.

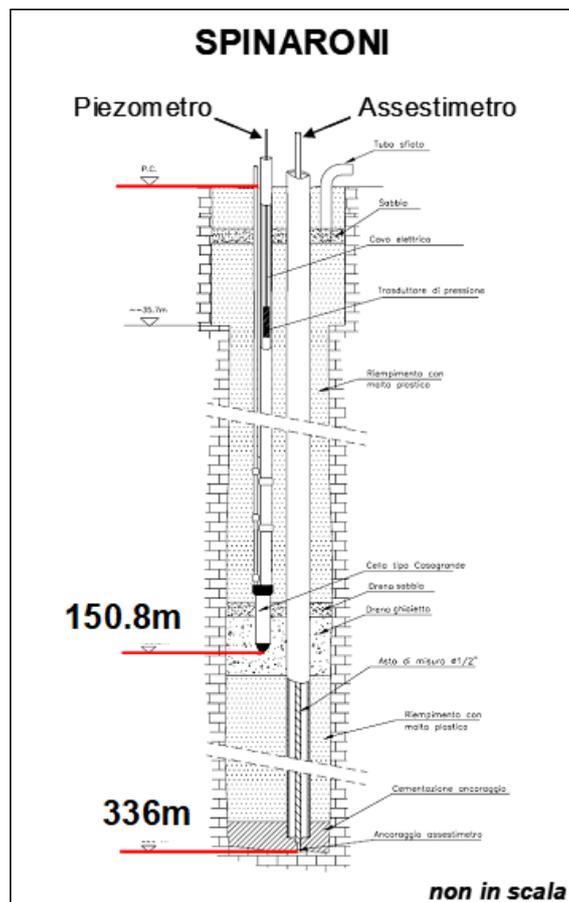


Figura 8B - Schema della stazione EPSU di Spinaroni

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 45 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Le attrezzature installate (Figura 8B) sono costituite principalmente da una verticale assestometrica e un piezometro, che sono stati messi in opera nel periodo 15 luglio 1997 - 20 settembre 1997. Il relativo sistema di misura è stato poi completato nel novembre 1997 e collaudato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori (“misura di zero”).

L’unità d’acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Di questa stazione si sono persi alcuni mesi di dati (da settembre 2001 ad aprile 2002) a causa del furto del pannello solare installato per l’alimentazione del sistema. Il ripristino è stato fatto nel mese di aprile 2002. Nel periodo gennaio 2003 – marzo 2003 si è avuto un blackout per un guasto all’apparecchiatura d’acquisizione dati. Nell’agosto 2007 si è di nuovo verificato il furto del pannello solare con la conseguente perdita delle misure nel periodo 14 agosto - 5 ottobre 2007.

Dall’inizio di dicembre 2005 il sensore di pressione del piezometro ha iniziato a fornire valori anomali per cui si è deciso d’ eseguire misure dirette del livello della falda. A tale scopo si è impiegato un freatometro con il quale si è accertato che la quota raggiunta dall’acqua all’interno del tubo piezometrico era pari a -5.22 m dal piano campagna (p.c.).

In data 31 gennaio 2006 è stato sostituito definitivamente il trasduttore di pressione nel tubo piezometrico, ponendolo alla profondità di 20 metri rispetto al piano campagna.

A fine agosto 2008 si è spurgato il piezometro e al 30 settembre è stata fatta una videoispezione. A seguito di tale controllo lo strumento è stato considerato non attendibile per una probabile rottura del tubo di diametro più piccolo ( $\varnothing \frac{1}{2}$ ”). Gli interventi sul piezometro hanno causato la perdita di 14 giorni di misure assestometriche (dal 30 settembre al 14 ottobre 2008). Il giorno 14 ottobre si è ritarato il trasduttore di spostamento, posizionandolo a 1.8 mm rispetto alla misura del 30 settembre. Di questo riposizionamento si è tenuto conto nell’elaborazione dei dati.

A fine 2014 e nel periodo marzo - maggio 2015 si sono verificate diverse mancate registrazioni di dati per guasti dell’unità d’acquisizione, che è stata definitivamente sostituita nel maggio 2015. Si è, però, accertato che questa perdita di dati non ha avuto influenza sulla significatività della serie storica registrata. Nel 2019 la registrazione dei dati è stata continua e regolare.

L’ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in agosto e dicembre 2019.

 <p>Eni spa</p>	<p>Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020</p>	<p>Documento GEODCS_REL2020_TLA</p>	<p>Page - 46 - of 63</p>
---	---	---	--------------------------

## Analisi dei dati assestimerici

L'assestometro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 336 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati i dati relativi all'assestometro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella dell'8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (espansione) degli strati di terreno monitorati.

In data 28 luglio 2004 è stata ripresa di 25.0mm la corsa del trasduttore di spostamento, poiché il sensore era troppo vicino al fondo scala. Nell'elaborazione delle misure è stato tenuto conto di tale variazione aggiungendo un offset della stessa entità alle misure. Un analogo intervento è stato rifatto in data 14 ottobre 2008.

Nel grafico allegato (Figura 9B) si nota un comportamento alquanto anomalo dello strumento se rapportato alla sua storia precedente che ha sempre avuto un trend in crescita. Nell'ottobre 2003, infatti, l'assestometro ha registrato un repentino sollevamento del piano campagna rispetto al punto profondo (4 mm in 5 giorni), in concomitanza con un abbassamento della falda di circa 40 – 50 cm. Dopo tale periodo (ca. fine ottobre 2003) è ripresa la compattazione del terreno, anche se, per circa 6 mesi, con un trend più veloce di quello del periodo precedente l'anomalia sopracitata. Dopo la metà del 2004 il trend di compattazione è tornato ad avere lo stesso andamento registrato nel periodo antecedente al 10/2003. Non sono state chiarite le ragioni di tale anomalia.

Per questa stazione si hanno a disposizione poco più di 22 anni di osservazioni (22.13 anni). In questo periodo si è registrata una compattazione totale di circa 49.5 mm (49.46mm- lettura strumento al 31/12/2019) corrispondente a una velocità di media annua di 2.26 mm/a (valore ottenuto con regressione lineare su tutta la serie temporale di registrazioni - Figura 9B). Anche in questo caso però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestometro mostra un andamento più articolato nel tempo di quanto sia semplicemente espresso dal sopracitato valore medio. Nella figura 10B si può osservare infatti che, da inizio monitoraggio sino a circa "fine 2006-inizio 2007", si passa da una velocità di compattazione di circa 4.2 mm/a ad una riduzione notevole di tale valore, che passa prima a circa 1.4mm/anno tra il 2007 e fine 2014,

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 47 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

poi praticamente quasi a zero dal 2015 ad oggi. Infatti, il *trend* della compattazione superficiale misurato negli ultimi 5 anni è pressoché nullo (0.03mm/anno), la strumentazione reagisce solamente alle pulsazioni stagionali del terreno, mostrando espansioni durante i periodi autunno-invernali e contrazioni durante quelli estivo-primaverili; la retta di regressione calcolata sui dati degli ultimi 5 anni è praticamente orizzontale (Figura 10B). Analogamente al caso di Smarlacca, tale diminuzione potrebbe essere correlata ad un minor, o nullo, emungimento delle falde acquifere entro i primi 300m di profondità.

Nella stazione *EPSU* di Spinaroni è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo di circa -7 mm/a. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetria), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 336 m). Il GPS infatti nei 17.28 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 12 cm (17.28a x 7mm/a) mentre invece l'assestometro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 3.9cm (17.28a x 2.26mm/a).

Anche il GPS, come mostrato in Figura 11B fa vedere verso l'inizio del 2016, una diminuzione della velocità di subsidenza dell'area, il cui il valore decresce da circa 7.4mm/anno a 5.4mm/anno, confermando un trend di diminuzione della subsidenza totale.

Nella stessa figura è riportata anche la curva dell'assestometro, che però, come già detto in precedenza, fa registrare l'inizio della diminuzione di velocità diversi anni prima. Anche qui lo spessore di terreno superficiale reagisce con anticipo alla diminuzione della subsidenza in atto nell'area, che sembra restare attiva e svilupparsi (ma con un rallentamento) solo negli strati più profondi di 336m (base dell'assestometro).

La correlazione nel tempo dell'andamento delle due curve (geodetica CGPS e assestimetria) non è molto elevata come mostrato nel grafico allegato (Figura 12B); le misure CGPS presentano un andamento più regolare con una dinamica legata alla stagionalità. Nel periodo tra inizio ottobre 2003 sino a oltre la metà del 2004, la curva CGPS mostra, però, oscillazioni molto simili a quelle registrate dell'assestometro nello stesso periodo, avvalorando l'ipotesi che possano essere reali e non "artefatti strumentali" i movimenti "anomali" di cui si è detto in precedenza.

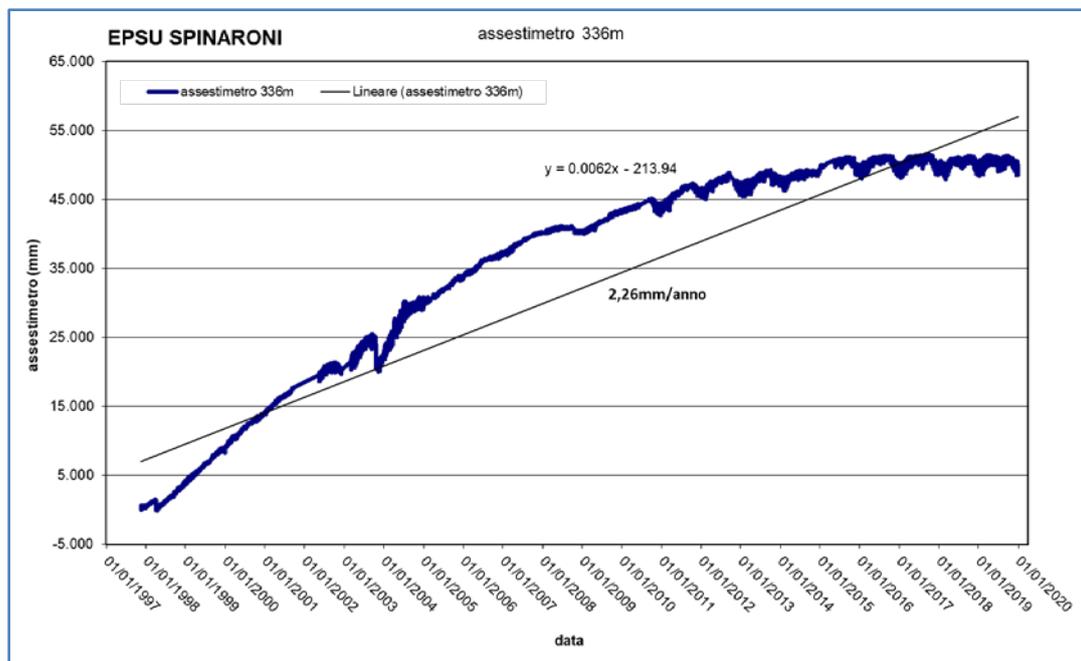
 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 48 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico:

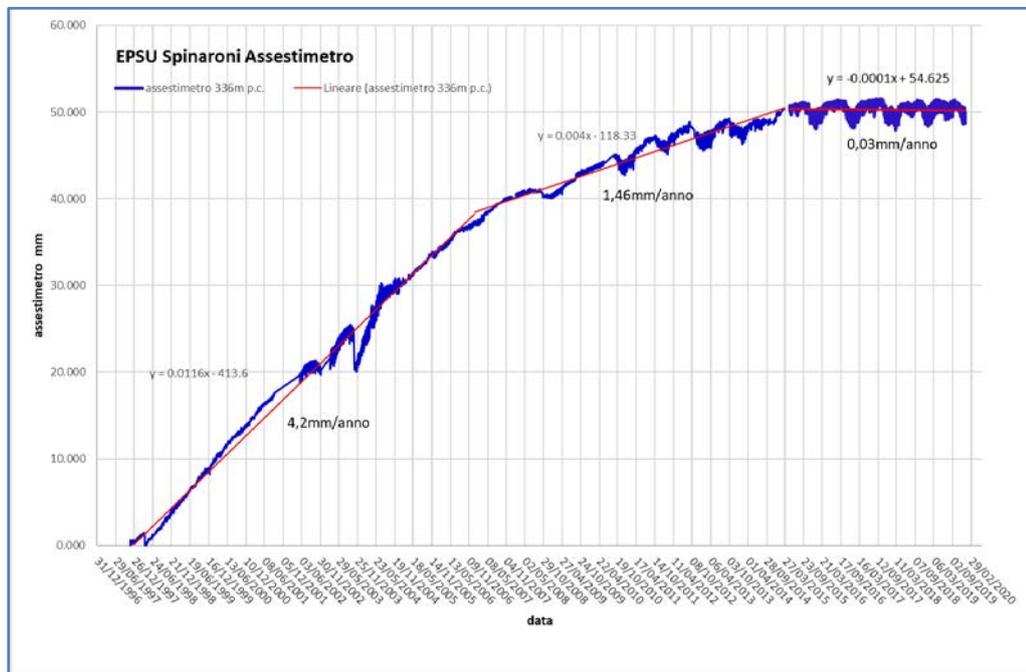
- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

### **Analisi dei dati piezometrici**

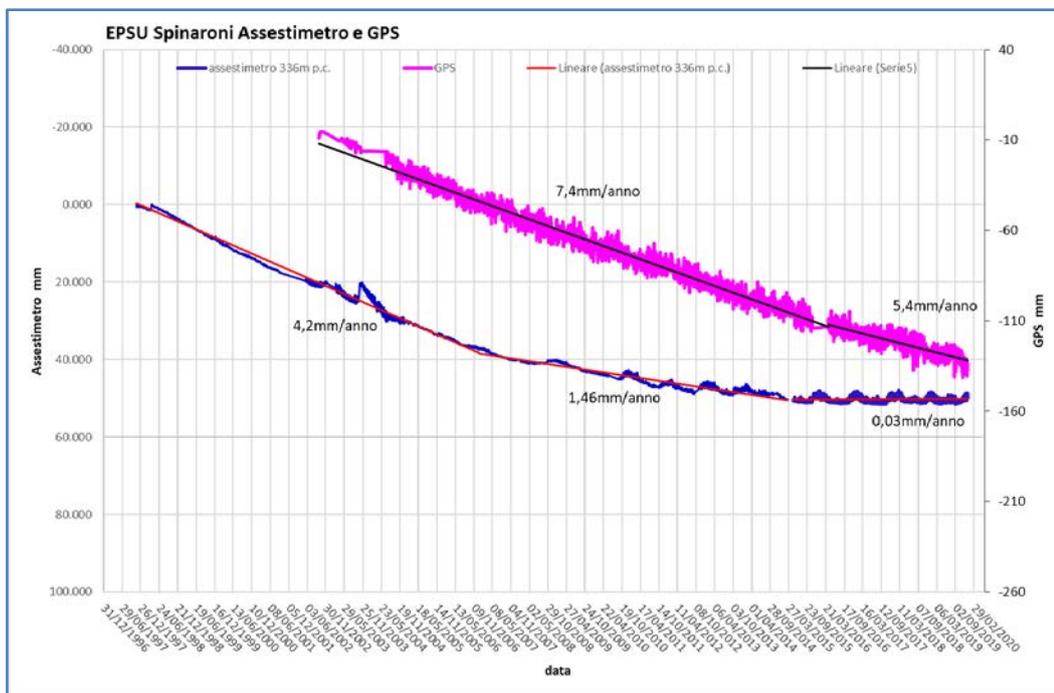
Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Anche per questa stazione, analogamente a quella di Smarlacca, si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestimetro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.



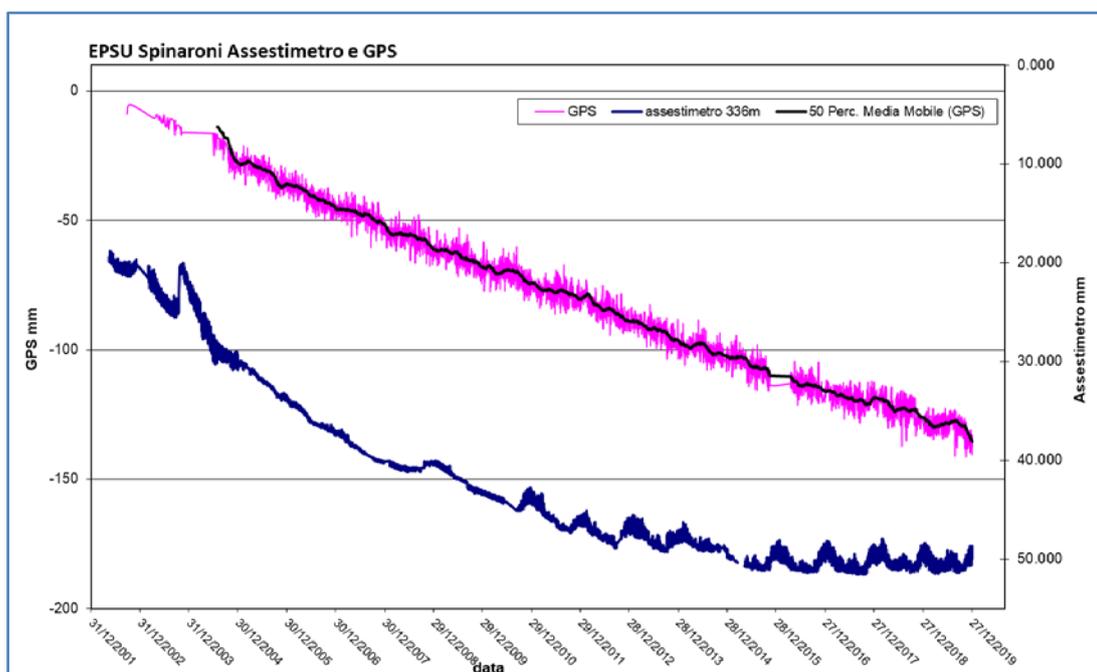
**Figura 9B - Serie storica delle misure assestmetriche nella stazione EPSU di Spinaroni**



**Figura 10B – Trend curva di compattazione dell’assestmetro della stazione EPSU di Spinaroni**



**Figura 11B - Confronto tra i trend di compattazione dell'assesimetro profondo e di subsidenza totale da CGPS per il sito di Spinaroni**



**Figura 12B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assesimetro della stazione EPSU di Spinaroni)**

N.B. Nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assesimetrica è stata graficaata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS - spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa.

## **Stazione EPSU di Fiumi Uniti** (installata settembre 1994)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°23'50.09"N e 12°18'57.44"E.

La stazione è ubicata tra le località di Lido Adriano a nord e quella di Lido di Dante a sud, immediatamente a nord dell'argine sinistro della foce del fiume Fiumi Uniti a circa 60m dal mare Adriatico (linea di riva), all'interno dell'area pozzo Eni denominata "Angelina1", ad una quota di 0m s.l.m. .

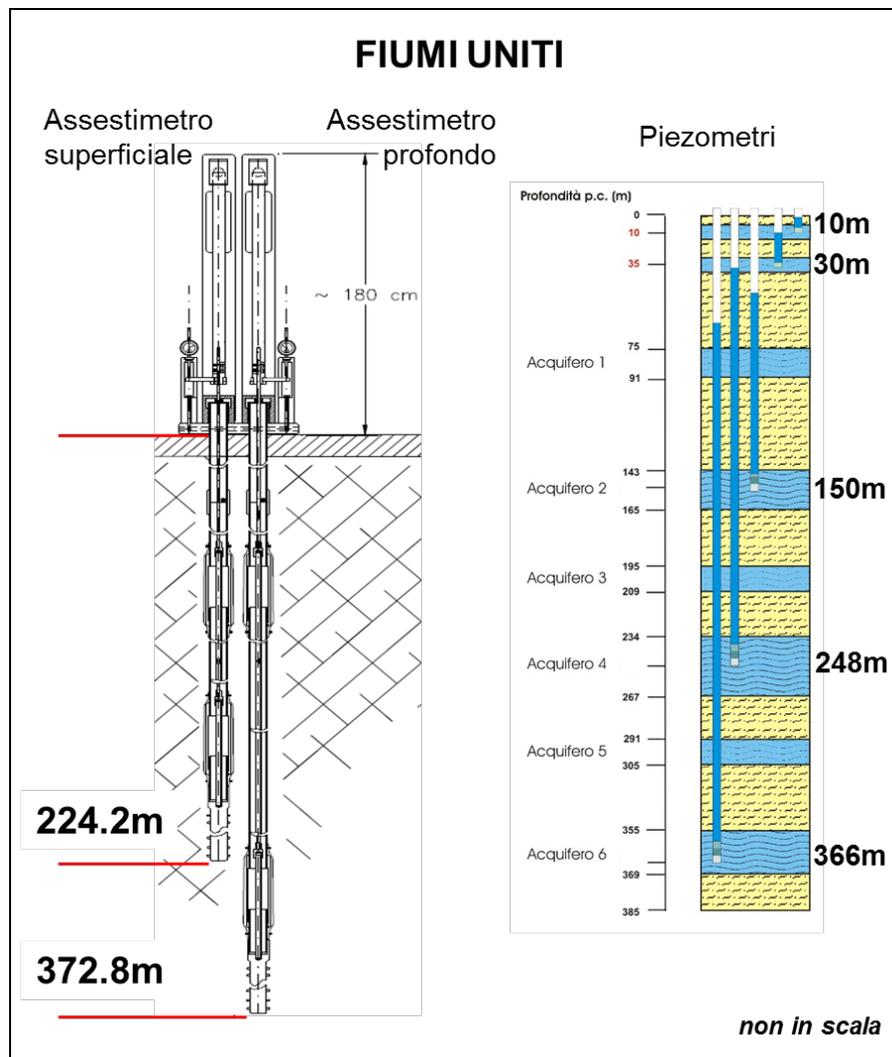
La strumentazione è costituita da:

- assestometro profondo - quota bottom 372.85 m da p.c.
- assestometro superficiale – quota bottom 224.2 m da p.c.
- Piezometro profondo a 360 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro intermedio a 243 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro superficiale a 148 m p.c. (disattivato da agosto/2011)

I piezometri, sopra elencati, sono stati sostituiti nel 2011 con la nuova strumentazione descritta nella tabella seguente, sono stati rimpiazzati i piezometri originali e ne sono stati aggiunti 2 superficiali a 10 e 30 m da piano campagna.

<b>Sigla</b>	<b>Profondità fondo foro (da p.c.)</b>	<b>Tipo Piezometro</b>	<b>Tratto Filtrante</b>
PS-1	10.50	Tubo aperto	da 6.40 a 9.50 m da p.c.
PS-2	30.50	Tubo aperto	da 25.40 a 29.50 m da p.c.
PP-1	373.50	Tubo aperto	da 361.00 a 365.00 m da p.c. da 366.50 a 372.50 m da p.c.
PP-2	257.00	Tubo aperto	da 241.00 a 245.00 m da p.c. da 250.00 a 256.00 m da p.c.
PP-3	163.00	Tubo aperto	da 141.10 a 153.20 m da p.c. da 156.00 a 162.00 m da p.c.

Le principali caratteristiche della strumentazione attuale sono illustrate in Figura 13B.



**Figura 13B - Schema della stazione EPSU di Fiumi Uniti. Le profondità dei piezometri sono riferite alla quota centrale del tratto filtrante**

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel luglio 2003 si è avuto il furto dei pannelli solari installati per l'alimentazione del sistema di misura, con conseguente perdita di 2 mesi di registrazioni (7 agosto 2003 - 2 ottobre 2003). Nel giugno 2004 è stata sostituita integralmente la baracca di protezione del sistema; in tale occasione è stato fatto l'allacciamento alla rete elettrica, eliminando, così, il ricorso ai pannelli solari. Nel marzo 2008 sono stati spurgati i 3 piezometri. L'operazione ha consentito d'accertare che il piezometro superficiale e quello intermedio non erano di fatto funzionanti, poiché in comunicazione idraulica tra di loro e con i filtri intasati.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 53 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

Molto dubbio era anche il funzionamento del piezometro profondo.

Nel periodo 9 agosto 2010 - 8 settembre 2010 si sono perse le misure per un guasto alle apparecchiature. Analogo problema si è verificato nell'ottobre 2010. A seguito dei lavori di ripristino dei pozzi piezometrici, a partire da metà luglio 2011, sono stati definitivamente sigillati i tre vecchi tubi piezometrici (dati in Figura 14B). Nel dicembre 2011 sono entrati in funzione i cinque nuovi pozzi piezometrici descritti nella precedente tabella, tre in sostituzione dei precedenti piezometri e due nuovi.

Da circa fine giugno 2012 sino a fine febbraio 2013 il trasduttore di pressione del piezometro superficiale a 30 m non ha funzionato correttamente registrando valori non attendibili; detto sensore è stato poi correttamente riscaldato dopo il ripristino dell'alimentazione elettrica a ottobre 2013. Si segnala la mancanza di dati di questa stazione dal 28 febbraio 2013 al 17 ottobre 2013 per un guasto alle apparecchiature di alimentazione elettrica del sistema d'acquisizione. Fino a fine luglio 2017 la registrazione dei dati è stata poi regolare. Ad agosto del 2017 si è verificato un nuovo guasto elettrico alle apparecchiature d'acquisizione, per cui sino a dicembre 2017 si sono fatte letture manuali della strumentazione piezometrica ed assestometrica anche se con frequenza ridotta. A dicembre 2017 si sono spurgati/lavati tutti e 5 i piezometri della stazione. A tale scopo si è fatta circolare acqua a pressione e portata costanti attraverso una linea di spurgo dal basso verso l'alto, per favorire il deflusso dei sedimenti depositatisi sia nel tratto cieco che in colonna attraverso le microfessurazioni dei filtri e nei boccafori. Dopo il lavaggio di ogni singolo piezometro, sono state fatte prove di dissipazione d'energia dell'acqua immessa per la verifica del funzionamento dei tratti filtranti, seguite da prove di emungimento della falda. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione sono risultati integri e perfettamente funzionanti. L'avaria alle apparecchiature di acquisizione è perdurata anche nei primi tre mesi del 2018, dal mese di aprile l'acquisizione dei dati è stata, invece regolare. Nel novembre 2019 sono stati sostituiti i trasduttori di pressione dei piezometri PP3 e PS1. Nel periodo giugno 2019 – dicembre 2019 si hanno dei "buchi" nelle acquisizioni relative ai piezometri PP1, PP3 e PS1 dovuti a malfunzionamento della sensoristica. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in giugno, agosto, novembre e dicembre 2019.

 <p>Eni spa</p>	<p>Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020</p>	<p>Documento GEODCS_REL2020_TLA</p>	<p>Page - 54 - of 63</p>
---	---	---	--------------------------

## Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro più profondo misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 372.85 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 224.2 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati (Figura 20B e Figura 21B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella dell'8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

L'assenza delle misure nel periodo compreso fra settembre 1997 e aprile 1998 è da collegare al fatto che inizialmente non era ancora in funzione il sistema di teletrasmissione dei dati. Le misure sono state fatte con continuità a partire dall'8 aprile 1998.

In data 17/10/2006 è stata ripresa la corsa dei trasduttori di spostamento, precisamente di 16.3 mm per l'assestimetro profondo e di 14.4 mm per quello più superficiale. Nell'elaborazione dei dati si è tenuto in conto di queste variazioni, così da non rappresentare il "salto" nelle misure per effetto di un cambiamento di fondo scala e non di una reale variazione assestimetrica.

Per tutti circa i 25 anni (25.27) di misure fatte, le due curve assestimetriche (Figura 15B e Figura 16B) mostrano andamenti molto simili, con minimi scostamenti tra loro e con un trend costante di compattazione del terreno. Ciò sembrerebbe indicare una compattazione prevalentemente più superficiale, che interessa grosso modo i primi 220 m di terreno. La velocità di compattazione è poco meno di 2 mm/anno per entrambi gli assestimetri (1.94mm/anno per il più profondo e 1.88mm/anno per l'altro) e per tutto l'intervallo di tempo considerato.

In Figura 17B è rappresentato l'andamento della strumentazione EPSU nell'ultimo anno (2019). Quello che si può notare è che gli assestimetri hanno una escursione bassissima e con delle sinusoidi stagionali che hanno un comportamento anomalo rispetto alle usuali pulsazioni del terreno (espansioni in inverno-primavera e compattazioni in estate-autunno). Infatti si osserva un picco di compattazione intorno ad aprile, una successiva espansione intorno luglio-agosto e poi una successiva compattazione che ha il massimo verso la fine dell'anno.

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 55 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

C'è da dire che comunque l'ampiezza di tali escursioni è bassissima (circa 0.5mm) per una compattazione totale nell'anno (non recuperata) di circa 1mm. Per quanto riguarda le falde monitorate, sebbene i dati siano lacunosi (per i motivi tecnici sopra detti), possiamo dire che: il piezometro profondo (PP1) a 360 m di profondità, che dalla sua installazione è risultato sempre in pressione, nell'ultimo anno si è mantenuto sempre al di sopra dei 4m sul p.c. e tra quelli della stazione, è quello che mostra un comportamento più nella norma. Infatti presenta un aumento intorno ad aprile ed una diminuzione in estate (luglio-agosto). Il suo andamento è in fase con l'assestometro, e questa è un'anomalia in quanto le due curve dovrebbero solitamente avere un andamento opposto. Sicuramente la dinamica di tale falda profonda non influenza l'andamento dell'assestometro e sembra non contribuire alla compattazione della porzione di terreno indagata.

L'andamento delle altre falde monitorate non rispetta molto i tradizionali cicli stagionali. I piezometri a 30m(PS2) e 257m(PP2) sembrano non risentire di nessuna variazione stagionale (periodi piovosi e secchi) mostrando un andamento costante.

Il piezometro a 10m (PS1), per i mesi con presenza di dato, sembra essere l'unico con un andamento coerente con gli assestimetri, mostrando diminuzioni della quota piezometrica in corrispondenza delle compattazioni ed aumenti nelle espansioni, solamente che tali variazioni si verificano in periodi "meteorologicamente" anomali dell'anno. Il piezometro a 163m(PP3), presenta una serie di dati molto disturbata e lacunosa, ma per i tratti con una maggiore continuità sembra avere un andamento simile al PS1 e valgono le stesse considerazioni.

Presso la stazione *EPSU* è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a - 13.7 mm/anno. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetria), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 372 m). Il CGPS infatti nei 17.8 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 24 cm mentre invece l'assestometro nello stesso periodo (17.8 anni) ha registrato una compattazione totale di circa 2.8 cm (Figura 18B).

Sempre in Figura 18B è mostrato il confronto tra GPS e assestometro profondo, entrambe le curve mostrano una variazione della velocità di subsidenza/compattazione nel tempo ed il loro andamento è meglio rappresentato da 2 spezzate anziché da una regressione lineare su tutta

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 56 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

la serie. Entrambi gli strumenti rilevano una diminuzione di velocità, Il GPS verso la fine del 2014 passa da 14.9 a 9mm/anno, l'assestometro qualche anno prima passa da 1.8 a 1.2mm/anno. Anche nell'area, indagata dalla stazione in oggetto, come nei due casi precedenti, si rileva una diminuzione generale della subsidenza in atto e questo effetto inizia, anche qui, prima con una diminuzione della velocità di compattazione negli strati più superficiali.

Inoltre, l'esame delle curve CGPS e assestimetrica profonda non mostra particolari tratti di somiglianza, anche se la correlazione tra le due curve sembra aumentare negli ultimi anni, dal 2017 in poi, come si può osservare nel grafico allegato (Figura 19B).

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura di tale grafico:

- il confronto delle due curve è stato fatto per lo stesso periodo di osservazione (2002-2017), pur essendo la durata del monitoraggio con l'assestometro di circa 8 anni più lunga;
- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

## **Analisi dei dati piezometrici**

Come spiegato in precedenza, nella stazione sono stati posti inizialmente in opera tre piezometri verticali che, però, nel corso del tempo si sono guastati. Per un lungo periodo di tempo, le misure piezometriche utilizzate sono state solo quelle relative al piezometro più profondo, ritenuto più attendibile. In Figura 14B è illustrato l'andamento delle curve piezometriche sino al 2011. Da metà luglio 2011 tutti i vecchi tubi piezometrici sono stati poi definitivamente sigillati e dal 22 dicembre 2011 ad oggi si sono resi disponibili i dati dei nuovi tubi piezometrici (Figure 17B, 20B e 21B). A dicembre 2017 tutti e 5 i piezometri della stazione sono stati sottoposti ad una manutenzione straordinaria consistita in spurgo e lavaggio degli stessi. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione hanno risposto in modo positivo durante l'attività di spurgo/lavaggio, risultando integri e perfettamente funzionanti. Da segnalare che, dalla sua installazione, il piezometro profondo (PP1 a 360 m di profondità) è risultato sempre in pressione, con una altezza della falda al di sopra del piano campagna, variabile tra 0.5 e 5 m.

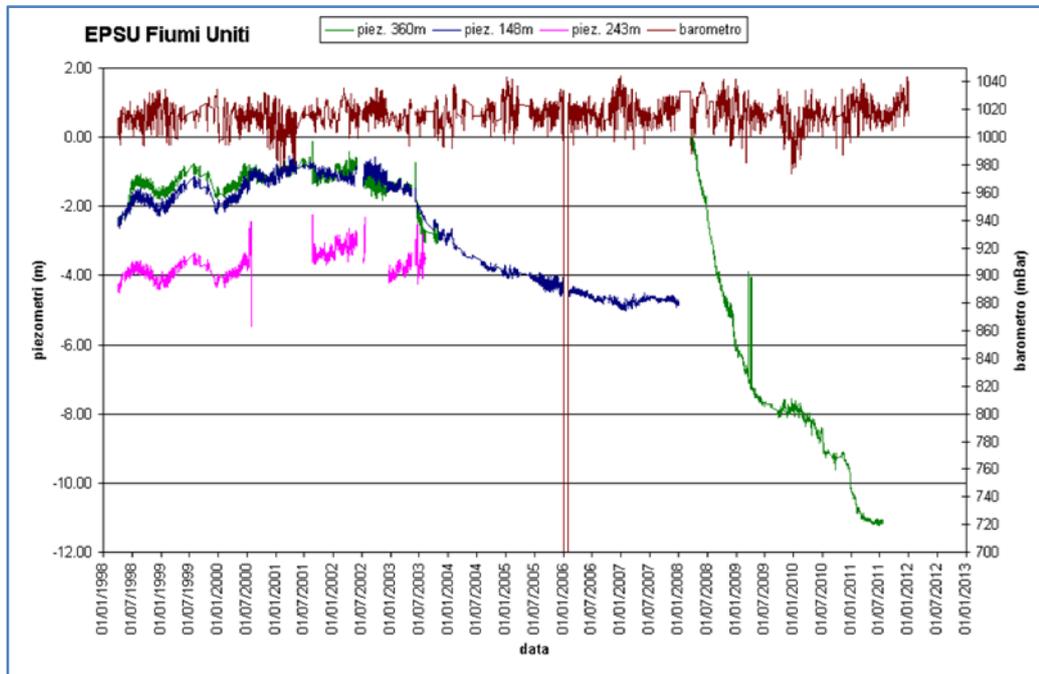


Figura 14B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure della vecchia strumentazione piezometrica attiva sino al 2011

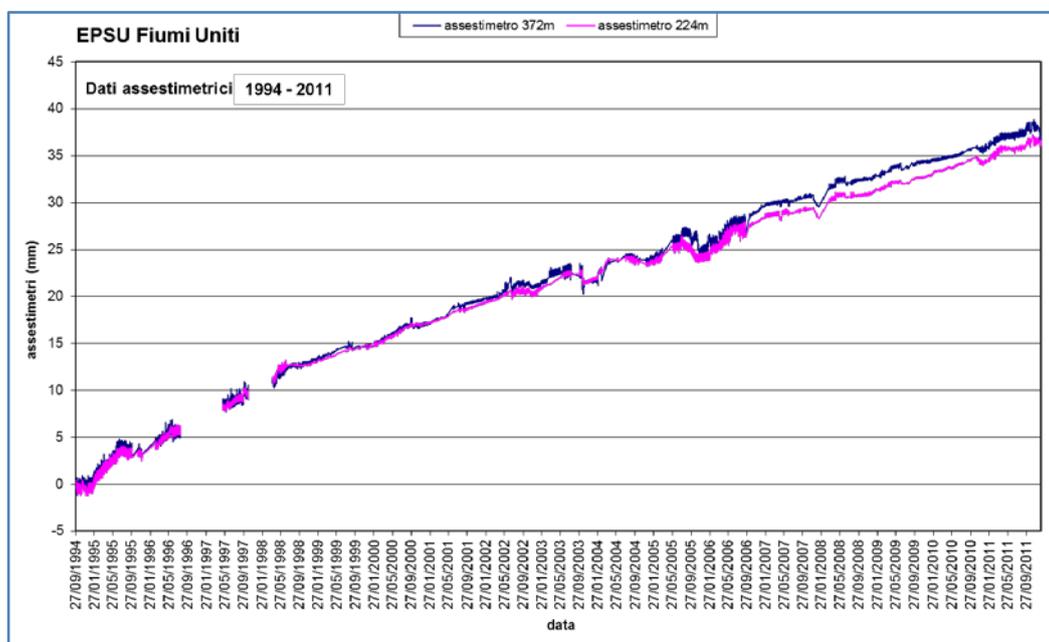
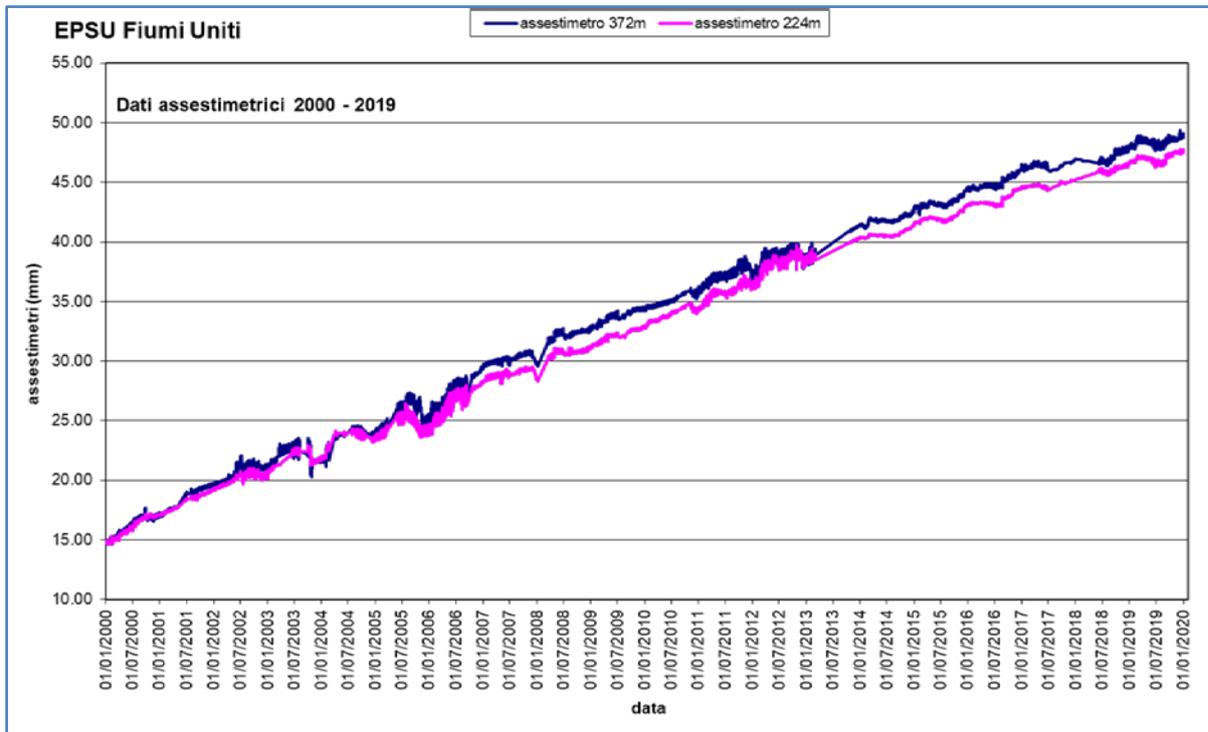
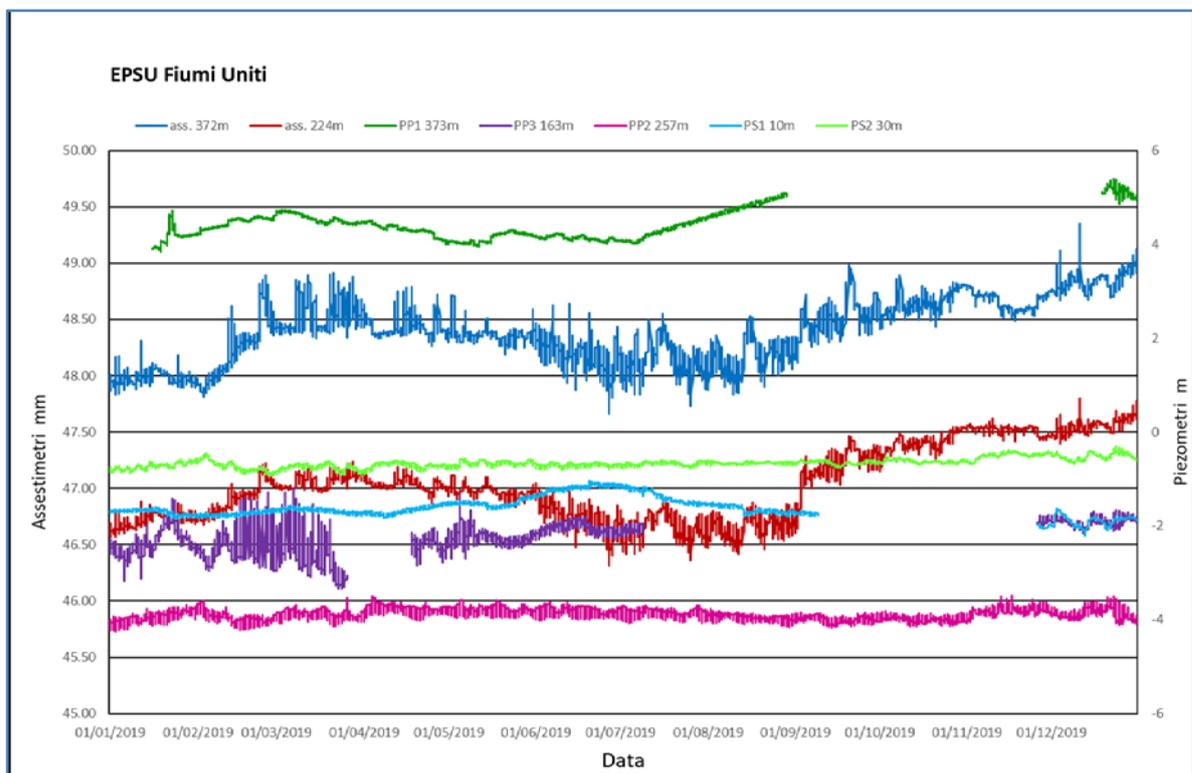


Figura 15B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 1994-2011)

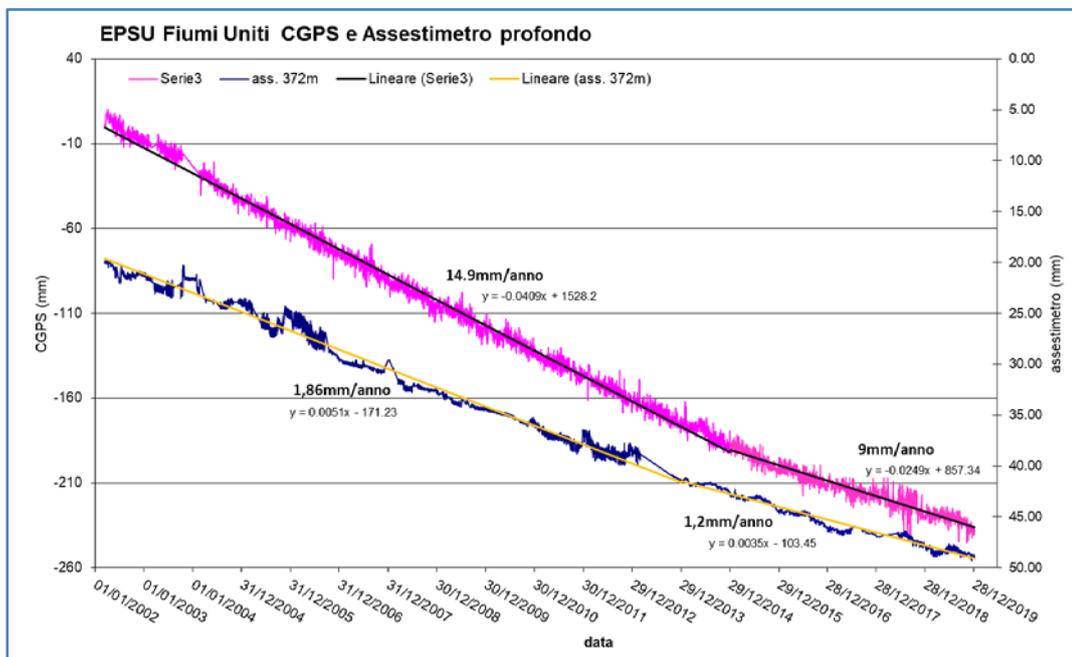
Valori positivi = abbassamento; Valori negativi = sollevamento



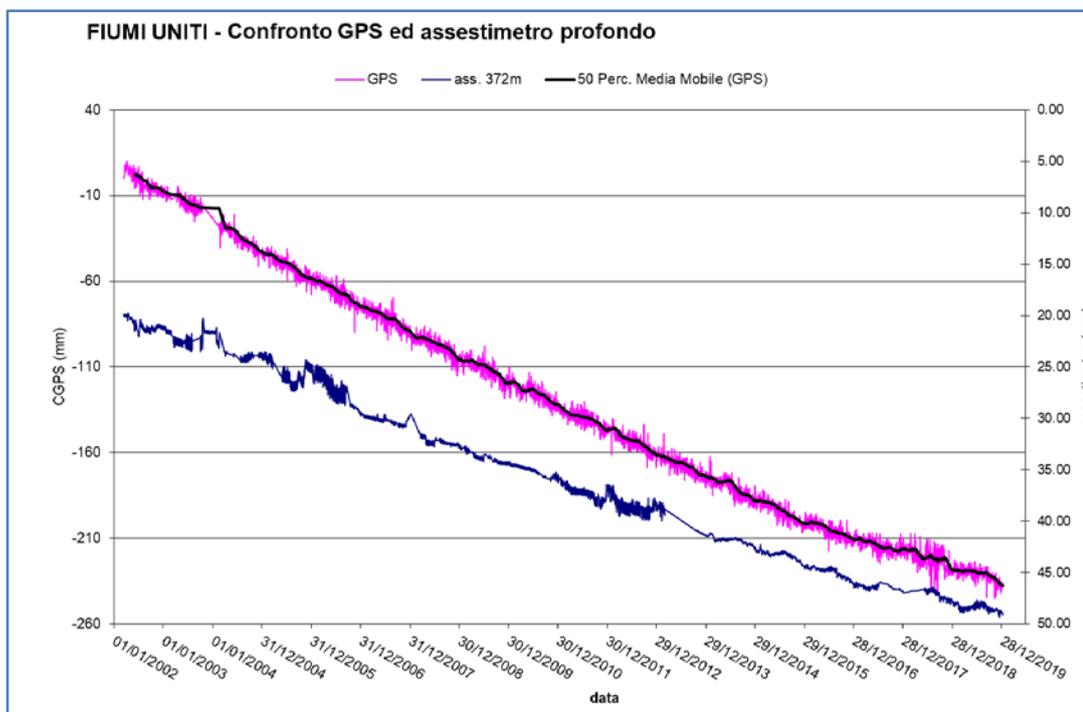
**Figura 16B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 2000-2019)**  
*Valori positivi = abbassamento; Valori negativi = sollevamento*



**Figura 17B - Stazione EPSU di Fiumi Uniti - ultimo anno di dati**



**Figura 18B - Confronto tra i trend di compattazione dell'assestometro profondo e di subsidenza totale da CGPS per il sito di Fiumi Uniti**



**Figura 19B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (Assestometro profondo della stazione EPSU di Fiumi Uniti)**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimentrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS - spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa.*

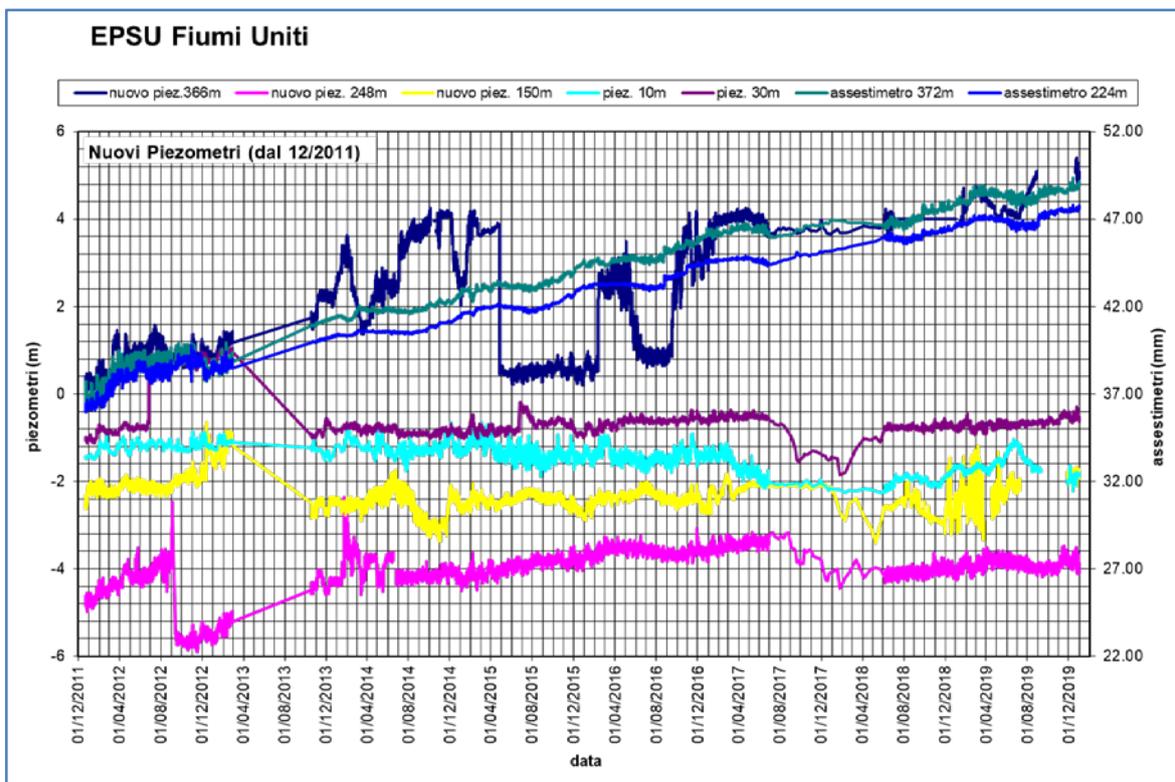


Figura 20B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e assestimetriche dal 2011 al 2019

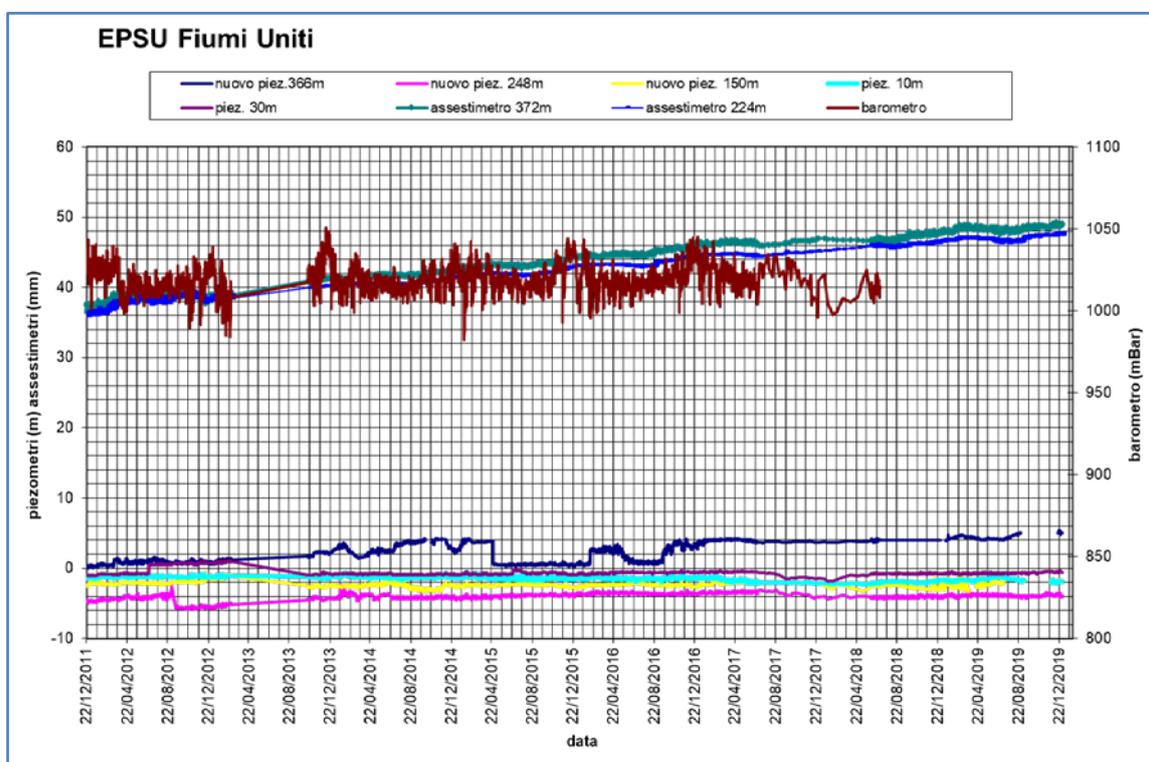


Figura 21B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche assestimetriche e barometriche dal 2011 al 2019

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 61 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

## Conclusioni

In generale, i grafici allegati mostrano come per tutte e tre le stazioni *EPSU* si siano ottenuti dati di buona qualità, pur tenendo conto delle difficoltà operative incontrate in fase d'acquisizione. La lunghezza delle serie storiche registrate, la sensibilità e la qualità dei sensori utilizzati, infatti, sono tali da consentire di valutare con buona precisione l'abbassamento del piano campagna rispetto al punto di ancoraggio degli strumenti (compattazione superficiale). Anche se le misure assestometriche risentono delle escursioni - giornaliere e stagionali - di temperatura, tale fenomeno si attenua e praticamente scompare per lunghi periodi di osservazione quali quelli disponibili per le 3 *EPSU* considerate. Nell'arco degli anni di osservazione non si nota alcun effetto della variazione stagionale della temperatura. Una considerazione generale valida per le tre stazioni considerate è che la compactazione dei terreni superficiali sembra assumere un andamento costante nel tempo con una chiara tendenza all'attenuazione (o a zero nel caso di Spinaroni), la diminuzione generale di subsidenza è anche confermata per gli strati più profondi (al di sotto delle basi di ancoraggio degli assestimetri) come mostrato dalle stazioni CGPS installate in prossimità delle *EPSU*. Negli ultimi 4 anni, infatti, si sono registrati valori in leggera diminuzione della velocità media di compactazione per tutti gli assestimetri, sino ad arrivare ad i valori del 31/12/2019, riportati nella tabella riassuntiva più avanti.

### Smarlacca

Per la stazione di Smarlacca il periodo di osservazione è di oltre 21 anni (21.74), durante i quali l'assestometro più profondo ha registrato una compactazione media regolare anche se meno marcata rispetto a quanto misurato nelle stazioni di Spinaroni e di Fiumi Uniti. L'andamento delle misure è stato, infatti, più o meno costante nel tempo, tranne che per l'abbassamento registrato nel periodo luglio-settembre 2003; la compactazione totale è stata pari a 20.1 mm per una velocità media di abbassamento di circa 0.92 mm/a (velocità da regressione lineare 0.94 mm/a). Un analogo *trend* nelle misure si rileva anche per l'assestometro più superficiale, che, però, ha registrato una compactazione totale nettamente più ridotta: 6.4 mm complessivi, corrispondenti a circa 0.29 mm/a (0.25 mm/a da regressione lineare). L'andamento della velocità di compactazione dell'assestometro profondo mostra un andamento più modulato da quanto si potrebbe evincere dalla sola regressione lineare su tutta la serie. Si evidenziano

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA ottobre 2020	Documento GEODCS_REL2020_TLA	Page - 62 - of 63
--	--	---------------------------------	-------------------

infatti due trend di velocità distinti: uno iniziale sino alla fine del 2011 di circa 1 mm/anno ed uno degli ultimi 8 anni, con un valore di velocità di circa 0.5 mm/anno. Buona è la correlazione tra la curva assestimetrica e quella del *CGPS*. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

### **Spinaroni**

Per la stazione di Spinaroni si hanno a disposizione più di 22 anni (22.13) di osservazioni durante i quali si è registrata una compattazione di 49.46 mm per una velocità media di compattazione di 2.23 mm/anno (2.26 mm/a con regressione lineare), con un andamento, dopo il primo periodo di assestamento, piuttosto regolare, tranne che per la brusca variazione (sollevamento del piano campagna) dell'ottobre 2003 di cui si è detto in precedenza.

Anche in questo caso però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestimetro mostra tre andamenti di velocità di compattazione. Il primo sino alla fine del 2007 di circa 4.2 mm/anno; il secondo a partire approssimativamente dal 2008 al 2014, caratterizzato da una velocità di 1.4 mm/a e l'ultimo dal 2015 ad oggi con velocità di compattazione pressoché nulla. La correlazione dell'andamento nel tempo delle curve *CGPS* e assestimetrica non è molto elevata; il *CGPS* sembra mostrare un trend d'abbassamento abbastanza regolare anche se influenzato dalla stagionalità. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

### **Fiumi Uniti**

Per la stazione Fiumi Uniti si hanno a disposizione dati fin dal settembre 1994; è, quindi, possibile seguire l'evolversi della compattazione per un arco di tempo più lungo (25.27 anni) che non nelle due stazioni sopracitate. Il valore attuale – dicembre 2019 – della compattazione totale misurata in tutti questi anni dall'assestimetro più profondo è di 49.07 mm, mentre per quello superficiale detto valore è di 47.72 mm. Ciò significa che, assumendo un trend di compattazione del terreno costante nell'arco di circa 25 anni d'osservazione, entrambi gli strumenti hanno registrato velocità media di compattazione simile dell'ordine di poco meno di 2 mm/anno (rispettivamente 1.94 e 1.88mm/a). La compattazione però è per la maggior parte localizzata nella porzione di terreno indagata dallo strumento più superficiale (0-220 m circa). Anche in questa stazione la curva dell'assestimetro mostra una variazione della velocità di compattazione nel tempo ed il suo andamento è meglio rappresentato da 2 spezzate anziché

da una regressione lineare su tutta la serie. La prima spezzata da inizio registrazione sino a verso la fine del 2013 corrispondente ad una velocità di circa 1.86mm/a e la seconda, per il periodo dal 2014 ad oggi, equivalente ad una velocità di 1.2mm/a.

Le registrazioni delle curve CGPS e assestimetrica profonda mostrano poi andamenti dei cicli di compattazione ed espansione del terreno non molto simili tra loro; la correlazione tra le due curve sembra essere più elevata negli ultimi anni di registrazione.

Nella tabella che segue sono riportati i dati complessivi delle compattazioni nelle 3 stazioni, unitamente ai valori medi annuali delle relative velocità. La compattazione degli assestimetri è stata calcolata considerando il valore restituito dal sensore alla data del 31/12/2019 che è stato poi diviso per gli anni di monitoraggio e non con una regressione sulla curva degli spostamenti, quest'ultima modalità (regressione lineare) potrebbe restituire valori molto simili ma non perfettamente uguali.

Sito	Anni di osservazione	Assestimetro profondo		Assestimetro superficiale	
		Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)	Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)
<b>Smarlacca</b>	21.74	20.17	0.9	6.4	0.3
<b>Spinaroni</b>	22.13	49.46	2.2	n.i.	-
<b>Fiumi Uniti</b>	25.27	49.07	1.9	47.72	1.8

n.i. = non installato