



Doc. SICS_210_Integraz Progetto messa in produzione pozzo Agosta 1 Dir **INTEGRAZIONI ALLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE**

Allegato 7b.

Attività 2 – Analisi dell'impatto di subsidenza attesa dalla coltivazione del giacimento Agosta sulle infrastrutture idrauliche e stradali

Luglio 2016





Contratto Aperto n. 2500017034

Attività 2

Analisi dell'impatto di subsidenza attesa dalla coltivazione del giacimento Agosta sulle infrastrutture idrauliche e stradali

Rapporto finale

Giugno 2016

Coordinatore:

Prof. Daniele Masetti

Responsabile scientifico

Prof. Umberto Simeoni

Muhtfin

Dott. Umberto Tessari Dott.ssa PhD Corinne Corbau Dott.ssa PhD Ilaria Rodella Dott.ssa PhD Kizzi Utizi

Collaboratori:



giacimento di idrocarburi denominato Agosta







ABSTRACT

Nell'ambito dello studio condotto sono stati calcolati gli impatti della subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento sulle infrastrutture viarie e sull'efficienza della rete idraulica di bonifica. I valori di deformazioni superficiale e di abbassamento subsidenziale sono stati derivati dal modello geomeccanico poro-elastoplastico ad elementi finiti sviluppato da Isamgeo Engineering GmbH (2015) per conto di eni E&P. A scopi cautelativi, nell'ambito di due periodi temporali (2017-2020 e 2020-2030), identificati in funzione del piano di sfruttamento del giacimento, si sono considerati gli scenari di compressibilità più probabile (*cM medio*) e più conservativo (*cM upper*), contemplando altresì gli effetti derivanti dal contemporaneo sfruttamento del vicino giacimento Dosso degli Angeli.

Dai valori di subsidenza e di spostamento orizzontale, estratti dal modello geomeccanico, sono stati calcolati gli spostamenti differenziali attesi, attraverso il calcolo del gradiente totale. Dopo aver identificato le strutture e le infrastrutture di particolare interesse, ed averne considerate tipologia e caratteristiche costruttive, i valori di spostamento differenziale atteso in prossimità di ognuna di esse è stato utilizzato per verificarne la sicurezza strutturale, confrontandolo con quello massimo ammissibile, reperito in letteratura. Le strutture/infrastrutture identificate (impianto idrovoro Fosse; elettrodotto; argine Agosta; ponte della strada E55 sul fiume Reno; ponte della strada E55 sul fiume Lamone; Volta di Scirocco; centrale Enel Teodora; canaletta Mandriole; opera in muratura Trepponti di Comacchio) risultano, nel complesso, sottoposte a sposamenti differenziali inferiori ai valori limite per più di un ordine di grandezza, e quindi tali da non provocare danni strutturali.

L'impatto degli abbassamenti subsidenziali sull'efficienza idraulica della rete di bonifica è stato determinato mediante applicazione del modello idrologico (afflussi-deflussi) HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineers) e del modello idraulico HEC-RAS, considerando anche la presenza di opere di regimazione interne alla rete, con particolare riferimento agli impianti idrovori. Data l'estensione del cono subsidenziale, sono stati considerati i seguenti comprensori di bonifica: Bonifica Mezzano Sud-Est, Bonifica Mezzano Nord-Ovest, Bonifica Valle Pega, Bonifica Marozzo, Bonifica Torbe, Bonifica Valle Isola, Bonifica Bosco. Dalle analisi e dalle simulazioni condotte si evidenziano impatti praticamente nulli sulla rete drenate dei bacini idrologici coinvolti.





Infine, è stato analizzato il piano di monitoraggio integrato (livellazioni, GPS in continuo, SAR su satelliti in banda C e X, assestimetri, Lidar) utilizzato da eni E&P. Il piano è da ritenersi adeguato, pur considerando la possibilità di installazione di alcuni riflettori SAR artificiali in zone che attualmente risultano scoperte dai rilievi SAR (Ovest del giacimento di Agosta; Valli di Comacchio e Vene di Bellocchio) o di una stazione GPS permanente su Trepponti di Comacchio.





INDICE

| INTRODUZIONE | 1 |
|--|------|
| INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO | 2 |
| INQUADRAMENTO GEOGRAFICO | 2 |
| INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 3 |
| INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO | 6 |
| LA SUBSIDENZA | 9 |
| METODOLOGIA DI STUDIO | . 11 |
| AREA DI INTERESSE NELL'OTTICA DEL PROCESSO SUBSIDENZIALE | . 12 |
| LA PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA ATTESA DALLA COLTIVAZIONE DEI GIACIMENTI DEL | |
| SISTEMA AGOSTA-DOSSO DEGLI ANGELI | . 19 |
| IL MODELLO GEOMECCANICO PER LA PREVISIONE DELLA SUBSIDENZA | . 19 |
| LA SUBSIDENZA RESIDUA PREVISTA | . 23 |
| GLI SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI | . 26 |
| VALUTAZIONE DELL'INCREMENTO DI RISCHIO AMBIENTALE A SEGUITO DELLA SUBSIDENZA ANTROPICA | . 27 |
| LA SUBSIDENZA ANTROPICA ATTESA E IL TERRITORIO | . 27 |
| STIMA DEGLI SPOSTAMENTI ORIZZONTALI | . 31 |
| CALCOLO DEGLI SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI | . 34 |
| ANALISI DEL RISCHIO AMBIENTALE CONNESSO ALLE DEFORMAZIONI ANTROPICHE DEL SUOLO | . 42 |
| VALUTAZIONE DELL'IMPATTO IDRAULICO DELLA SUBSIDENZA SULLA RETE DI BONIFICA | . 48 |
| MODELLO IDROLOGICO DEL COMPRENSORIO DI BONIFICA | . 49 |
| MODELLO IDRAULICO DEL COMPRENSORIO DI BONIFICA | . 57 |
| BONIFICA MEZZANO SUD-EST GRAMIGNE | . 57 |
| ALTRI BACINI | . 63 |
| IMPATTO DELLA SUBSIDENZA SULLA RETE SCOLANTE | . 68 |
| BONIFICA MEZZANO SUD-EST GRAMIGNE | . 68 |
| ALTRI BACINI | . 75 |
| PIANO DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA | . 76 |
| Livellazione geometrica | . 78 |
| Stazioni GPS permanenti | . 79 |
| Interferometria SAR | . 80 |
| Lidar | . 83 |





| Assestimetri | 84 |
|----------------------------------|----|
| Il piano di monitoraggio Eni E&P | 85 |
| Proposte migliorative | 86 |
| CONCLUSIONI | |
| BIBLIOGRAFIA | 89 |
| APPENDICE | 91 |
| HEC-HMS | |





INTRODUZIONE

L'adozione, da parte di eni S.p.A., di un modello geomeccanico agli elementi finiti, aggiornato e comprensivo degli effetti congiunti dalla coltivazione contemporanea dei giacimenti Agosta e Dosso degli Angeli (Figura 1), ha reso necessario un aggiornamento degli studi relativi agli impatti derivanti dalla subsidenza indotta da tale coltivazione.



Figura 1 – Ubicazione dei campi di Agosta e di Dosso degli Angeli.

La valutazione di subsidenza attesa è stata effettuata tramite l'applicazione del modello poroelasto-plastico ad elementi finiti proprietario di Isamgeo Engineering GmbH.

La data di fine produzione è stimata dal modello fluido-dinamico e, quindi, dipende anche dalla compressibilità dei pori. Per il campo di Agosta, sono stati considerati tre diversi scenari di compressibilità (lower, med, upper). Considerata l'entrata in produzione nel 2017, il termine della produzione è previsto tra il 2030 e il 2033. Per il giacimento di Dosso degli Angeli invece, è stato adottato un unico valore di compressibilità dei pori e la fine della produzione è prevista per il 2028.

Il contributo di ricerca, nell'ambito della convenzione più generale, ha lo scopo di valutare l'impatto della subsidenza attesa dalla coltivazione dei giacimenti sulle infrastrutture idrauliche e stradali nei prossimi 15 anni, considerando due periodi temporali: 2017-2020 e 2017-2030. In via cautelativa verranno considerati gli effetti derivanti dagli scenari di compressibilità (relativi al giacimento Agosta) medio (cM medio) e superiore (cM upper), come da Figura 2.



Figura 2 Esempio di risultato delle simulazioni fornite da eni: mappe della subsidenza attesa dalla produzione dei campi di Dosso degli Angeli e Agosta nel 2017 (sinistra) e 2030 (destra) con lo scenario cM_medio.

La ricerca è stata articolata nelle seguenti macroattività:

- 1. analisi metodologica e caratterizzazione ambientale dell'area di interesse;
- 2. valutazione dell'impatto della subsidenza attesa sulle strutture e infrastrutture idrauliche e stradali
- 3. valutazione dell'impatto della subsidenza antropica attesa sull'efficienza della rete idraulica;
- 4. implementazione della rete di monitoraggio.

INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Sulla base dei dati derivanti dal modello geomeccanico fornito da eni S.p.A., i possibili impatti sulla circolazione idrica superficiale e sulle infrastrutture viarie si estendono all'area geografica evidenziata in Figura 3. Si tratta di un area sottoposta interamente a bonifica e ricadente sotto le competenze del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara e del Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale.







Figura 3 - Delimitazione dell'area di indagine

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dal punto di vista geologico la zona in esame presenta gli elementi strutturali e stratigrafici tipici degli ambienti di transizione della Fossa Padana–Appenninica, che rappresenta la continuità tra la catena appenninica e la catena alpina. L'area è caratterizzata da un ampio bacino di sedimentazione quaternario di transizione tra ambiente continentale e marino, in cui in alcuni punti lo spessore raggiunge circa 2000 m.

Nel Quaternario Inf. il bacino di sedimentazione ha subito un fenomeno di ingressione marina in cui tutta l'area è stata occupata dal mare; nel Pleistocene superiore la stessa area è stata coinvolta in una fortissima regressione, conseguente la glaciazione Wurmiana. Negli ultimi 5000 anni è iniziata l'ultima fase di accrescimento, con migrazione progressiva della linea di costa da W ad E, fino a raggiungere la posizione attuale. Nel periodo delle glaciazioni l'intero bacino Padano subì sconvolgimenti idraulici di straordinaria rilevanza. I fiumi, alimentati dalle acque di fusione dei ghiacciai, causarono inondazioni e trasportarono a valle quantità enormi di materiali che, in parte, andarono ad aumentare fortemente lo spessore della coltre alluvionale e, in parte, ad alimentare la costa (Figura 4).

L'analisi dei più recenti dati stratigrafici eseguiti nella zona hanno permesso di distinguere 3 unità





litologiche predominanti:

- la prima costituita da una coltre di suolo agrario, potente da pochi decimetri a circa due metri, con matrice sabbioso argillosa o morbosa;
- la seconda comprende torbe-argillose e sabbiose ed argille-torbose, variamente fossilifere, in cui i rari spessori di torba raggiungono uno spessore massimo di 1m;
- la terza è rappresentata da sabbie e argille franche con spessore di qualche metro.



Figura 4 - Stralcio della Carta Geologica della Pianura Emiliano-Romagnola in scala 1:25000 – CARG.

In tale contesto la tettonica dell'area Appenninica ha originato una serie di strutture con asse NW-SE a vergenza NE; verso settentrione l'avampaese è delimitato dalla monoclinale veneta, debolmente deformata lungo il bordo meridionale; in corrispondenza di faglie sub verticali, con probabile comportamento transpressivo, ad andamento NWSE (Linea Schio-Vicenza).

Le varie fasi di sollevamento e deformazione, sino al Pliocene medio-superiore, hanno provocato la strutturazione delle serie mio-plioceniche (Gallare, Colombacci, Corsini, Garibaldi).

Nel Pleistocene le serie sovrascorse sono state saturate dai corpi torbiditici delle Formazione Carola (Gruppo di Asti), il sistema deltizio progredente da WSW e la sovrastante piana alluvionale (Formazione Ravenna) completano il colamamento del bacino Pleistocenico.

Le stratigrafie dell'area di bonifica di Comacchio (Figura 5) mostrano la presenza di terreni argillosi nell'area centrale, in depressioni e in corrispondenza di antichi paleoalvei.

Nelle aree orientali del comprensorio del Mezzano a sud-est si rinvengono terreni con stratificazioni di residui di vegetazione palustre, in vario stadio di decomposizione, che ha dato luogo alla formazione, su estensione notevoli, di terreni torbosi a volte di spessore anche rilevante e con



sostanza organica superiore al 20%.

DEGLI STUD

Dipartimento

di Fisica e nze della Ter

Sin dal Pleistocene, l'area è stata particolarmente soggetta a fenomeni di subsidenza differenziale, con abbassamenti maggiori nelle sinclinali e minori nelle anticlinali, legati all'evoluzione delle strutture tettoniche profonde. Tale fenomeno ha influenzato l'intera evoluzione idrografica della zona.

La stratigrafia dell'area è stata dedotta dall[®]Elaborazione delle stratigrafie, relative ai sedimenti Olocenici delle Valli di Comacchio", (Valpreda e Valmigli, 1993, Figura 5)



Figura 5 - Stratigrafie delle zone a sedimentazione omogenea.

L'area delle Valli di Comacchio è stata suddivisa dagli Autori in 5 zone di sedimentazione (Figura 6); all'interno delle quali i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli ricadono nella Zona 2.

Zona 1 - Comprende l'area compresa fra la costa attuale, Comacchio e Casalborsetti. Al di sopra dei sedimenti di probabile natura deltizia (argille e limi argillosi con resti vegetali) sono presenti 5 m di sabbie fini; verso l'alto la sequenza si chiude con la presenza di sabbie fini con resti vegetali e un cappello di 2m costituito da sabbie fini.

Zona 2 - Comprende le attuali Valli di Comacchio, parte della Valle del Mezzano e della Bonifica del Mantello (Valli Testa, Gramigne ed Umana); da 0 a circa 16 m di profondità è presente una serie continua di sedimenti argillosi e la sequenza termina verso l'alto con sedimenti torbosi.

Zona 2 a - Il settore interessato e poco esteso è ubicato a nord della Valle del Mezzano; la successione stratigrafica è analoga alla precedente con l'unica differenza che la base del corpo sabbioso raggiunge una profondità di 30 m.



Zona 3 - Comprende un settore piuttosto circoscritto della Valle del Mezzano NW; la sequenza stratigrafica è costituita da argille continentali, che compaiono fino ad una quota di 9-10 m, sopra alle quali si presenta un sottile strato di sabbia fine (spessore di 1-2 m).

Zona 4 - Rappresenta la porzione più interna delle Valli di Comacchio in cui la sequenza stratigrafica risulta completamente continentale.



Figura 6 - Zone caratterizzate da sedimentazione omogenea nell'area di Comacchio e in età Olocenica.

INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La zona valliva di Comacchio assunse tale conformazione alla fine del XVI secolo, portando a conclusione una progressiva strutturazione del territorio iniziata circa dalla trasgressione Flandriana (Olocene p.p.) e facente parte della struttura geomorfologica del Delta del Po. Le forme presenti nell'area valliva e nelle zone limitrofe sono dovute principalmente a processi fluvio-deltizi (cordoni, bacini interfluviali, rotte fluviali, paleoalvei) e costieri (Figura 7).







Figura 7 – Caratteri geomorfologici principali presenti nell'intorno delle Valli di Comacchio, 1: specchi d'acqua; 2: paludi; 3: saline; 4: fiumi (a), canali (b); 5: diversioni fluviali recenti; 6: tracce di paleoalvei; 7: cordoni fluviali ben delineati (a), ampi e debolmente convessi (b); 8: ventagli di rotta; 9: bordo di depressione; 10: dune; 11: cordoni di spiaggia semplici , sepolti o livellati (a), elevati (b); 12: cordoni di spiaggia complessi; 13: spiagge in erosione (a) o in avanzamento (b); 14: delta lagunari inattivi; 15: limiti superiori di bacini lagunari recenti; 16: argini antropici di protezione; 17: sbarramenti fluviali; 18: centri urbani storici. (Castiglioni et al., 1990, modificata)

La formazione dell'area palustre risale ai millenni successivi l'ultimo importante sollevamento marino avvenuto in epoca olocenica (ingressione Flandriana, 3500 a.C). Il territorio faceva parte di una vasta area solo parzialmente emersa ed attraversata dai corsi d'acqua provenienti dalle Alpi e dagli Appennini. Gli apparati deltizi favorirono l'accrescimento della zona emersa contrastando gli importanti abbassamenti subsidenziali determinati dall'evoluzione delle strutture marginali





dell'Appennino.

Nel corso di secoli si alternarono fasi di emersioni, per la messa in opera d'interventi di regimazione e arginatura dei corsi d'acqua, ed allagamenti del territorio a causa della mancata manutenzione delle opere.

La bonifica di queste aree e dei settori più interni ha portato nel tempo alla nascita di un paesaggio vallivo, pianeggiante, interrotto e regolarizzato dai canali artificiali a scolo meccanico. Essa terminò nel 1964 portando all'utilizzo agricolo di 18.000 ha di terreno. I sedimenti presenti in superficie e nel sottosuolo mostrano l'alternanza e la interdigitazione di litologie prettamente continentali (paleoalvei, cordoni dunari) con litologie marine (sabbie, limi, argille), a testimoniare la complessa storia evolutiva (Bondesan, 1968).

La morfologia del territorio all'interno del comprensorio comprendente le aree bonificate e le attuali Valli presenta una pendenza dominante da ponente a levante: della zona altimetricamente più elevata in prossimità di Ferrara con quota (10m s.l.m.) si scende gradatamente verso est sino a raggiungere, in vicinanza del litorale terreni a quote di soggiacenza di qualche m sotto il livello del mare. Le uniche morfologie rilevate presenti nell'area di studio coincidono con la presenza di antichi paleoalvei, cordoni dunali (Bodesan, 1985) e con gli attuali argini presenti a confinamento dei corsi d'acqua o delle aree bonificate. La litologia dei cordoni dunari è prevalentemente sabbiosa al contrario del paleoalvei che sono interessati da una litologia argillosa, riferibile alle unità geologiche poste a monte.

L'analisi del microrilievo (Figura 8) consente di evidenziare la situazione topografica locale caratterizzata da quote comprese fra -3 e i - 2.5 m.

Particolare interesse riveste la zona valliva che costituisce un'ampia area lagunare classificata come area SIC-ZPS. Il sito comprende quanto rimane delle vaste valli salmastre ricche di barene e dossi con vegetazione alofila che sino ad un secolo fa caratterizzavano la parte Sud-orientale della provincia di Ferrara e che ancora oggi costituiscono il più esteso complesso di zone umide salmastre della regione. I principali bacini presenti sono quelli delle Valli Fossa di Porto, Lido di Magnavacca, Campo, Fattibello, Capre e Molino. Relitti di valli adiacenti ormai bonificate, con acque praticamente dolci, sono Valle Zavelea, Valle Pega e Valle Umana. L'estensione totale del complesso vallivo è di circa 11.400 ha.





Figura 8 - Carta del Microrilievo.

Le profondità sono assai variabili e risentono della morfologia dei fondali e delle variazioni stagionali dovute alla gestione dei livelli idrici a fini itticolturali, del bilancio tra precipitazioni ed evaporazione, delle maree: in media si aggirano sui 50-60 cm, con massimi di 1,5-2 m. Le valli di Comacchio si sono formate a causa dell'abbassamento del delta del Po etrusco-romano e dei catini interfluviali circostanti, in particolare nel medioevo, e quindi dell'ingressione delle acque marine. Le Valli Fossa di Porto e Lido di Magnavacca sono separate dalla lunga penisola di Boscoforte, coincidente con il cordone litoraneo dell'età etrusca. La parte Nord-Est del sito è costituita dalle Saline di Comacchio, estese circa 500 ettari, in disuso dal 1985 e circondate da bacini salmastri come Valle Uccelliera e la più vasta valle Campo. A Nord delle saline vi è la Valle Fattibello, l'unica attualmente soggetta al flusso delle maree, mentre oltre il margine Nord-Ovest campeggiano la valle Zavelea e i resti di Valle Pega, con acque sostanzialmente dolci, così come acque debolmente salmastre si trovano in numerosi bacini delle Valli di Comacchio isolati a scopo itticolturale.

LA SUBSIDENZA

Con il termine subsidenza si intende in generale l'abbassamento del suolo dovuto a cause sia naturali che antropiche. Fra le cause antropiche, legate cioè alle attività umane, le principali sono da ricondursi all'estrazione di materiale dal sottosuolo, sia esso fluido (acqua o gas) o solido, alla compattazione dei sedimenti superficiali dovuti al trasferimento del peso proprio di manufatti al suolo mediante le strutture di fondazione, all'ossidazione della frazione organica dei terreni per processi di tipo biochimico che avvengono nella porzione di terreno insaturo.

I rischi ambientali legati al fenomeno della subsidenza sono sostanzialmente di due tipi:





- 1. perdita di quota altimetrica della superficie del piano campagna;
- 2. generazione di cedimenti e/o spostamenti differenziali.

La perdita di quota altimetrica risulta estremamente delicata in aree prossime a bacini d'acqua, come le aree lagunari e costiere o le zone poste in prossimità di laghi e fiumi. In questi casi, un abbassamento del suolo può determinare problematiche relative ad un aumento del rischio di erosione/inondazione con una perdita netta di sedimenti, come può avvenire in aree costiere o lacustri basse e sabbiose, con difficoltà che possono risultare accentuate dalla densità dell'insediamento antropico e dall'eventuale vocazione turistica dell'area considerata. In zone poste in prossimità di corsi fluviali la perdita di quota può determinare una riduzione del franco altimetrico degli argini, con un impatto anche importante in merito alla sicurezza dal rischio di allagamenti ed un conseguente incremento della frequenza di eventi meteorologici critici. In aree di bonifica a scolo meccanico, la subsidenza può ridurre l'efficienza della rete dei canali di drenaggio quando gli spostamenti sono caratterizzati da un'elevata variabilità spaziale ed aumentare la prevalenza a cui lavorano le pompe degli impianti idrovori che gestiscono la bonifica.

La generazione di cedimenti e/o spostamenti orizzontali differenziali può creare pericoli per l'integrità dei manufatti presenti sul territorio, causando possibili distorsioni in opere rigide con formazione di fessure ed un generale indebolimento della struttura portante. Tale eventualità va indagata con particolare attenzione nel caso in cui sul territorio siano presenti infrastrutture di elevata importanza sociale e/o storico-culturale per evitare che attività improprie possano danneggiarle.

I valori di abbassamento subsidenziale dell'area, in via preliminare, sono dedotti dalle attività di monitoraggio eseguite periodicamente dall'Arpa Regione Emilia Romagna. I dati di abbassamento a livello regionale (Figura 9) sono stati prodotti mediante analisi interferometrica satellitare con tecnica PSInSAR, calibrati sulla scorta di 17 stazioni GPS permanenti (Bitelli et al, 2015).

Dai risultati di tale monitoraggio, si evince che la gran parte del territorio di pianura della regione non presenta nel periodo 2006-2011 variazioni di tendenza rispetto al periodo 2002-2006. In particolare non si evidenziano abbassamenti significativi nella provincia di Ferrara, per la quale l'area litorale è interessata da abbassamenti di pochi mm/anno. Il litorale ravennate presenta abbassamenti generalmente fino a circa 5 mm/anno, fatta eccezione per un'area di depressione che interessa il paraggio costiero da Lido Adriano fino ad oltre la Bocca del T. Bevano, con un massimo di oltre 20 mm/anno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti. A livello regionale la fascia costiera, estesa per 5 Km verso l'entroterra, presenta un abbassamento medio di circa 4





mm/anno.



Figura 9 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011 (ArpaER)

METODOLOGIA DI STUDIO

Lo studio ha come scopo la messa a punto e l'applicazione di una metodologia per la valutazione dell'impatto della subsidenza attesa dalla coltivazione di giacimenti a gas naturale sulle strutture ed infrastrutture nell'area prossima alla zona di coltivazione.

Nel dettaglio la metodologia sviluppata consiste delle seguenti fasi:

fase 1: caratterizzazione ambientale del territorio di interesse in relazione al processo subsidenziale oggetto di studio;

fase 2: quantificazione del fenomeno subsidenziale in atto ed atteso dalla coltivazione dei giacimenti nella zona oggetto di studio sulla base di dati reperiti presso gli enti istituzionali atti al controllo del territorio o soggetti privati che dispongono di informazioni di dettaglio;

fase 3: calcolo degli spostamenti differenziali attesi nei periodi temporali di interesse. Sulla base





delle previsioni di subsidenza antropica e spostamenti orizzontali indotti dalla produzione di gas vengono redatte delle mappe georeferenziate dello spostamento differenziale;

fase 4: analisi dell'impatto degli spostamenti differenziali a cui saranno soggette le principali infrastrutture (argini, ponti, infrastrutture viarie e tecnologiche, canali, opere di interesse storico) presenti nell'area. La sicurezza e la stabilità delle opere presenti sul territorio vengono valutate in relazione ai massimi spostamenti differenziali ammissibili;

fase 5: analisi degli abbassamenti causati dalla subsidenza ai fini del comportamento idrologicoidraulico dei bacini.

La procedura è applicata al caso dei giacimenti del sistema Agosta - Dosso degli Angeli, posti in prossimità della Laguna di Comacchio (FE), in due intervalli temporali: 2017-2020 e 2017-2030. La quantificazione della subsidenza attesa dallo sviluppo del sistema Agosta - Dosso degli Angeli è stata fornita da Eni E&P, società responsabile della gestione dei campi a gas..

AREA DI INTERESSE NELL'OTTICA DEL PROCESSO SUBSIDENZIALE

L'area di studio è una porzione del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara e del Consorzio di Bonifica Romagna Occidentale. Il campo di Dosso degli Angeli è posto circa 20 km a Nord di Ravenna e a 6 km dalla centrale di Casalborsetti nell'area delle Valli di Comacchio. Il campo di Agosta è localizzato 8 km circa a Ovest di Comacchio, a Nord-Ovest del campo di Dosso.

Analogamente a diversi altri giacimenti localizzati in Alto Adriatico, si tratta di campi costituiti da una successione di livelli mineralizzati, idraulicamente indipendenti, ciascuno dei quali è collegato ad un acquifero di fondo e/o laterale.

Come già ricordato, le Valli di Comacchio si formarono intorno al X secolo a causa della subsidenza e dell'impaludamento della zona costiera. Inizialmente le Valli erano riempite di acqua dolce, che proveniva dalle ricorrenti alluvioni dei fiumi. A partire del XVI secolo si riempirono progressivamente di acque marine, fornendone l'aspetto, che conservano ancora oggi, di bacini salmastri. Le Valli si formarono anche a causa della diversione del fiume Po e il conseguente spostamento del delta che si trovava molto più a sud rispetto ad adesso. Ma il fiume, sbarrato dai suoi stessi detriti, risalì a nord lasciando una vasta area paludosa.

I terreni si trovano ad un'altimetria variabile da –2 a +4 m rispetto al livello del mare (Figura 10) e sono presidiati a valle del fiume Reno, nei pressi di Ravenna, da una traversa mobile chiamata "Volta Scirocco". Tale opera, facente parte della bonifica della bassa pianura Padana, permette la





derivazione a gravità del fiume Reno in un canale artificiale verso Ravenna utile a fini irrigui, industriali e per l'approvvigionamento di acqua potabile.



Figura 10 Ricostruzione del DEM della zona di interesse con la traccia del giacimento di Dosso (in rosso) degli Angeli e del giacimento Agosta (in viola).

La zona di interesse è idraulicamente presidiata a Nord da due impianti idrovori (Lepri e Fosse) che sollevano e allontanano le acque eccedenti meteoriche e di filtrazione. Il Mezzano è delimitato nel suo perimetro da un grande canale pensile – denominato "Canale Circondariale" – che ha la funzione di accogliere e convogliare le acque di scolo delle più antiche bonifiche esterne. Nel canale Circondariale l'acqua è mantenuta a quota -1 m s.l.m.: alle sue estremità sono ubicati due impianti idrovori ("Lepri Acque Alte" e "Fosse Acque Alte") che effettuano l'ultimo sollevamento, per allontanare l'acqua definitivamente verso il mare, ultimo recettore.

L'area di possibile impatto è una vasta estensione di terreno a destinazione quasi esclusivamente agricola e con piccoli aggregati di abitazioni. Le uniche infrastrutture esistenti sono rappresentate dalle linee idrauliche (canali e impianti idrovori di sollevamento e strutture destinate alla





derivazione irrigua) e da una razionale e semplificata viabilità interna. Dal SIT del Comune di Comacchio non risultano presenti altre infrastrutture di importanza se non una linea elettrica ad alta tensione che attraversa il bacino con direzione Nord-Sud (Figura 11). Si considera importante, ai fini della viabilità della zona, il ponte stradale sulla Strada Statale Romea E55 che attraversa il Reno nelle vicinanze della foce.



Figura 11 Area di studio ed ubicazione delle principali strutture ed infrastrutture: A) l'impianto idrovoro Fosse, B) un elettrodotto che attraversa il comprensorio di bonifica da Nord verso Sud, C) l'argine Agosta, i ponti della Strada Statale Romea E55 D) sul Fiume Reno e E) sul Fiume Lamone, F) la Volta Scirocco, G) la centrale ENEL "Teodora", H) la canaletta Mandriole e I) l'opera in muratura "Trepponti di Comacchio".

Dal punto di vista strutturale sono pertanto d'interesse, per l'analisi dell'impatto della subsidenza attesa dalla produzione e dei relativi spostamenti differenziali, l'impianto idrovoro Fosse, adiacente al giacimento di Agosta, la chiusa di Volta Scirocco a Sud-Est dei giacimenti, il ponte stradale sulla SS Romea E55 che attraversa il Reno, posto sempre a Sud-Est dei giacimenti, e l'argine Agosta che



si estende, in parte, lungo la traccia superficiale del giacimento di Agosta. Questi e altri manufatti sono evidenziati in Figura 11:

- A. l'impianto idrovoro Fosse, caratterizzato da una dimensione massima di circa 70 m (Figura 12);
- B. la linea elettrica ad alta tensione ENEL;

UNIVERSITÀ DEGLI STUD DI FERRARA

Dipartimento

di Fisica e nze della Terr

- C. l'argine Agosta, che separa le Valli di Comacchio dal Canale Circondariale; si tratta di un rilevato in terra, difeso da una scogliera in pietrame frangiflutti posta ad Est e caratterizzato da una larghezza in sommità di 11 m ed una quota che si aggira attorno a +1.5 m s.l.m., ovvero +3-4 m rispetto al piano campagna circostante;
- D. il ponte stradale sulla Strada Statale Romea E55, che attraversa il Reno e presenta una dimensione di circa 115 m come evidenziato in Figura 13;
- E. un manufatto simile al precedente che si trova più a Sud ed attraversa il fiume Lamone (Figura 14);
- F. la chiusa di Volta Scirocco, con una dimensione massima di circa 125 m disposta trasversalmente al fiume Reno come indicato in Figura 15;
- G. nella zona industriale-portuale della frazione di Marina di Ravenna è presente la centrale ENEL "Teodora" e aree con serbatoi di stoccaggio (Figura 16) che potrebbero risentire di eventuali cedimenti differenziali o di abbassamenti dovuti alla subsidenza antropica prodotta dallo sfruttamento del giacimento;
- H. la Canaletta di Mandriole;
- I. come opera storica in muratura, rappresentativa del centro storico di Comacchio, si è deciso di considerare il manufatto denominato "Trepponti di Comacchio" (Figura 17) data la sua importanza storica, nonché la sua importanza nella viabilità pedonale all'interno di Comacchio. Voluto nel 1634 dal Cardinale Giovan Battista Pallotta e progettato dall'Architetto ravennate Luca Danese, è il monumento più conosciuto e visitato del centro storico. E' formato da cinque scalinate (tre anteriori e due posteriori) e da cinque archi a tutto sesto sotto i quali scorrevano cinque canali. La dimensione massima è di circa 22 m.

Dal punto di vista pedologico, nelle zone del Mezzano Nord Ovest i terreni presentano tessiture di medio impasto con lenti torbose a piccola e media profondità; nel Mezzano Sud Est i terreni sono più sciolti, con medio alte percentuali di sabbia frammista a torbe indecomposte. Sono terreni di origine valliva, relativamente "giovani", ricchi di sostanza organica; la torba è presente in superficie





ed in maggior percentuale in profondità, dove le condizioni di anaerobiosi – ambiente riduttivo innescano i fenomeni di acidificazione. L'ossidazione delle torbe superficiali in contatto con l'atmosfera è responsabile di velocità di subsidenza che, in aree similari della fascia costiera prossime alla Laguna di Venezia, raggiungono 1-2 cm/anno.



Figura 12 Vista da satellite dell'impianto idrovoro Fosse.



Figura 13 Vista da satellite del ponte sulla Strada Statale Romea E55 sul Reno.







Figura 14 Vista da satellite del ponte sulla Strada Statale Romea E55 sul Lamone.



Figura 15 Vista da satellite della chiusa Volta Scirocco.







Figura 16 La centrale ENEL "Teodora" presente nella zona portuale-industriale di Marina di Ravenna.



Figura 17 Vista da satellite e ricostruzione 3D del manufatto storico in muratura "Trepponti di Comacchio".





LA PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA ATTESA DALLA COLTIVAZIONE DEI GIACIMENTI DEL SISTEMA AGOSTA-DOSSO DEGLI ANGELI

IL MODELLO GEOMECCANICO PER LA PREVISIONE DELLA SUBSIDENZA

La valutazione di subsidenza attesa dalla coltivazione del sistema di Agosta-Dosso degli Angeli è stata effettuata tramite l'applicazione del modello poro-elastoplastico ad elementi finiti sviluppato da Isamgeo Engineering GmbH (2015) per conto di eni E&P. Le informazioni relative alla geometria dei due giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dagli studi fluido-dinamici di giacimento realizzati da eni S.p.A. con il codice di calcolo Eclipse. Data la separazione delle strutture che ospitano i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli, è esclusa la comunicazione idraulica tra i due giacimenti ed è perciò stato possibile eseguire due studi dinamici separati. L'interazione meccanica è tenuta in debita considerazione mediante la costruzione di un unico modello integrato che comprende entrambi i giacimenti.

La costruzione del modello è stata basata sui seguenti dati:

- Modello geologico dei due campi, esteso in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi ad esse idraulicamente connessi.
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi", riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica.
- Distribuzione di pressione nei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi", calcolata con il modello fluidodinamico 3D Eclipse. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto (a pozzi chiusi) fino a circa 30 anni dopo la fine della produzione in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e negli acquiferi dopo la fine della produzione.
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam-Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale (*Cm*) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione.
- Calcolo della compattazione dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi" fatto sulla base dello spessore "gross" degli stessi e della più aggiornata stima della compressibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.
- Il modello del giacimento di Agosta, realizzato tramite il software Eclipse, rappresenta





completamente la zona mineralizzata e gli acquiferi laterali. La griglia di calcolo si compone di 160 \times 21 \times 56 celle in direzione I, J, K rispettivamente, per un totale di 188160 celle, di cui 87953 attive e interessa un'area di circa 14 x 3 km².

Il modello fluido-dinamico relativo al campo di Dosso, anch'esso realizzato tramite il software Eclipse, si compone di una vasta area che comprende l'intera estensione degli acquiferi laterali connessi al giacimento. La griglia di calcolo si compone di 97 × 101× 21 blocchi in direzione I, J, K rispettivamente, per un totale di 205737 celle, di cui 125982 attive e interessa un'area di circa 58 x 42 km².

Sulla base della geometria del sistema sopra descritta è stata costruita la mesh di calcolo del modello geomeccanico ad elementi finiti per la valutazione della subsidenza. In particolare risulta necessario avere una mesh tale da:

- rappresentare adeguatamente la distribuzione di pressione all'interno di ogni livello permeabile in cui l'estrazione di gas è simulata con Eclipse;
- onorare la distribuzione delle zone mineralizzate come descritte dai contatti gas-acqua;
- estendere la zona modellata dal punto di vista geomeccanico in una certa misura al di là del perimetro del modello fluido-dinamico, perché le condizioni al contorno non influenzino i risultati delle simulazioni.

I criteri di cui sopra hanno guidato la realizzazione della mesh 2D rappresentata in Figura 18 e Figura 19.



Figura 18 Pianta della griglia di calcolo FEM utilizzata nel modello per i campi di Agosta e Dosso degli Angeli. Ogni elemento rappresentato ha in pianta otto nodi, di cui uno ad ogni vertice ed uno a metà di ogni lato, per cui la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura.





Figura 19 Zoom della visione in pianta della mesh di calcolo, focalizzata sulla zona centrale che rappresenta i campi di Dosso degli Angeli e Agosta.

La mesh 3D è stata quindi generata a partire dalla mesh 2D proiettata verticalmente a generare i livelli del giacimento, overburden ed underburden. Tutti questi livelli sono stati creati a partire dalle stesse mappe di top e botton dei vari livelli estratte direttamente dai due modelli Eclipse di Dosso degli Angeli ed Agosta. La mesh 3D, illustrata in Figura 20, si compone di una fitta discretizzazione ad elementi finiti del sottosuolo con base corrispondente al top dei carbonati presenti nella zona, che costituiscono una superficie compresa tra 4000 e oltre 7500 m di profondità. La mesh ad elementi finiti ha 1'653'219 nodi ovvero 4'959'657 gradi di libertà totali di cui 4'917'010 effettivamente liberi (32'647 gradi di libertà sono fissati dalle condizioni al contorno), e 514'448 elementi a 16 o 20 nodi distribuiti su un totale di 74 strati – tra produttivi, strati di separazione, overburden ed underburden. La copertura (overburden) è discretizzata in 16 strati, mentre la base del modello (underburden) è composta di 4 strati.







Figura 20 Mesh di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello ISAMGEO per il complesso dei campi di Dosso degli Angeli ed Agosta. La scala verticale della rappresentazione è pari a 10 volte quella orizzontale. Gli elementi dei livelli più sottili sono a 16 nodi, ovvero sono ad interpolazione lineare in direzione verticale e quadratica nelle direzioni orizzontali. Gli altri elementi sono a 20 nodi, ovvero quadratici in ogni direzione. Di conseguenza, la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura.

Il parametro geomeccanico di maggiore importanza nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale *cm*. E' oggi comunemente accettato (Baù *et al.*, 2002) che i valori più attendibili per questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, possano essere ottenuti dalle misure in situ tramite markers. Questo è particolarmente vero per sedimenti profondi, quali quelli considerati nel presente studio.

In assenza di dati specifici da marker sul campo di Dosso degli Angeli e di Agosta si è utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle stesse formazioni del Nord Adriatico. La relazione tra *cm* e tensione verticale efficace σ'_{V} impiegata è quella proposta da Hueckel *et al.* (2005).

Si segnala che studi successivi hanno evidenziato come sia la correlazione di Baù *et al.* (2002) sia quella di Hueckel *et al.* (2005) tendano a sottostimare la compressibilità uniassiale dei sedimenti posti a meno di 1500 m di profondità. Per tener conto di ciò, ovvero per profondità inferiori a 1500 m, Ferronato *et al.* (2003) hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di *cm* ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2.

In accordo con le stime regionali di compressibilità in funzione dello stress verticale efficace, sono stati anche definiti i limiti superiore ed inferiore da utilizzare nell'analisi parametrica relativa al solo campo di Agosta, per il quale lo studio è in fase puramente previsionale. In particolare, per la regione al di sopra dei 2000 m di profondità sono stati definiti due ulteriori scenari di compressibilità: il quantile superiore o "*upper scenario*"; il quantile inferiore o "*lower scenario*".





LA SUBSIDENZA RESIDUA PREVISTA

Per il campo di Agosta sono stati considerati tre diversi scenari, basati sulla correlazione regionale [Hueckel *et al.,* 2006]. A seconda dello scenario considerato, il termine della produzione è previsto tra il 2030 e il 2033. Per il giacimento di Dosso degli Angeli invece, date le numerose misurazioni disponibili (CGPS, dati InSar e livellazioni), è stato adottato un unico valore di compressibilità dei pori e la fine della produzione è prevista al 2027.

Per quanto riguarda gli scenari di compressibilità, si è scelto di analizzare il quantile superiore (*upper scenario*) e il valore medio tra il quantile superiore ed inferiore (*medium scenario*).

E' possibile individuare, per il campo di Agosta, le fasi produttive di interesse:

2017-2030: produzione residua dei livelli mineralizzati nel campo di Agosta;

dopo il 2030-2033: chiusura del campo Agosta e fase post-produttiva.

I risultati di maggiore interesse per la presente valutazione d'impatto sono costituiti dalla subsidenza dell'area a seguito della produzione residua prevista nei due intervalli dal 2017 al 2020 e tra il 2020 e il 2030 (Figura 21 e Figura **22**).

La subsidenza massima, prevista pari a 10 cm e 18 cm rispettivamente per lo scenario *Medium* e lo scenario *Upper*, sarà posizionata all'interno del giacimento nella parte a Nord-Est nei pressi del boundary superficiale.





Figura 21 Subsidenza prevista (cm) nel periodo 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta-Dosso degli Angeli secondo i risultati del modello geomeccanico fornito da Eni E&P (*Medium scenario*). Sono indicati i sottobacini e la rete di bonifica nell'area oggetto di studio (modificata da documentazione eni E&P).





Figura 22 Subsidenza prevista (cm) nel periodo 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta-Dosso degli Angeli secondo i risultati del modello geomeccanico fornito da Eni E&P (*Upper scenario*). Sono indicati i sottobacini e la rete di bonifica nell'area oggetto di studio (modificata da documentazione eni E&P).



GLI SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI

Le opere civili in genere sono caratterizzate da strutture portanti rigide che possono danneggiarsi a seguito di una distorsione dovuta a spostamenti differenziali delle fondazioni. In generale, i valori ritenuti ammissibili sono alquanto variabili e dipendono dalla soggettività del concetto stesso di danno accettabile per un manufatto. In genere, valori piuttosto restrittivi sono da considerarsi quando prevalgano criteri di carattere estetico oppure funzionale in edifici nuovi e/o pregiati. Ciò viene ritenuto generalmente valido per edifici di civili abitazioni situati in centri di un certo interesso storico-culturale, oppure per infrastrutture di grande importanza sociale ed economica, come ponti o dighe. Limiti più ampi sono invece comunemente accettati per edifici industriali.

Tabella 1 Tabella riassuntiva che riporta la tipologia di problema riscontrabile, in vari manufatti/opere, a seguito di cedimenti differenziali eccedenti i limiti evidenziati (Bjerrum (1963); Ricceri e Soranzo (1985).

| Tipo di problema | δ/L | |
|--|-------|-----------------------|
| Limite oltre il quale possono sorgere problemi in macchinari sensibili ai cedimenti | 1/750 | 1.33x10 ⁻³ |
| Limite di pericolo pere strutture reticolari | 1/600 | 1.66x10 ⁻³ |
| Limite di sicurezza per edifici in cui non si ammettono fessurazioni | 1/500 | 2.00x10 ⁻³ |
| Limite oltre il quale possono apparire le prime fessure nei muri di tamponamento e difficoltà nell'uso dei carri ponte | 1/300 | 3.33x10 ⁻³ |
| Limite oltre il quale possono essere visibili inclinazioni di edifici alti | 1/250 | 4.00x10 ⁻³ |
| Notevoli fessure in muri di tamponamento e muri in laterizio. Limite di sicurezza per muri portanti in laterizio con h/L<1/4. Limite oltre il quale si devono temere danni struttrali negli edifici | 1/150 | 6.67x10 ⁻³ |

In generale, distorsioni inferiori a 1/300, cioè 3.33×10^{-3} , non provocano fessurazioni apprezzabili in murature portanti o di tamponatura (Tabella 1). Per osservare danni a strutture portanti in cemento armato, invece, sono necessarie distorsioni pari a 1/150, cioè 6.67×10^{-3} . Assumendo un opportuno coefficiente di sicurezza, le indicazioni di progetto impongono di non superare distorsioni pari a 1/500, cioè 2×10^{-3} . Alcune indicazioni più restrittive (Viggiani, 2003), infine, arrivano al massimo ad imporre un limite per murature portanti multipiano pari a 5×10^{-4} .

Noti i dati di spostamento della superficie del suolo, si possono determinare per ciascun punto le distorsioni indotte mediante il calcolo del gradiente di spostamento. Detta w la componente (verticale o orizzontale) dello spostamento della superficie, il gradiente g si definisce come il modulo del vettore avente come componenti le derivate spaziali nelle direzioni degli assi coordinati (x, ovvero Ovest-Est, e y cioè Sud-Nord):

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} \tag{1}$$

Combinando i gradienti degli spostamenti verticali e orizzontali calcolati con la (1) si ottiene il gradiente totale dello spostamento con cui si può verificare il potenziale impatto sull'opera.



VALUTAZIONE DELL'INCREMENTO DI RISCHIO AMBIENTALE A SEGUITO DELLA SUBSIDENZA ANTROPICA

LA SUBSIDENZA ANTROPICA ATTESA E IL TERRITORIO

I risultati delle simulazioni modellistiche della subsidenza attesa dalla coltivazione del giacimento di Agosta sono stati sovrapposti all'ortofoto più recente (2015) dell'area di interesse al fine di far emergere le eventuali criticità. Inoltre, sono evidenziate le opere idrauliche principali, le opere strategiche riportate in precedenza in Figura 11.

Al 2020, dopo 3 anni dall'inizio della nuova fase di produzione, si prevede un abbassamento massimo di circa 3.6 cm (*Medium* scenario, Figura 23a) o 8 cm (*Upper* scenario, Figura 24a); tali valori di massimo sono localizzati all'interno della traccia superficiale del giacimento di Agosta nei pressi dell'impianto idrovoro "Fosse", nelle vicinanze dell'argine Agosta e a circa 8 km, in direzione Sud-Ovest, dal manufatto "Trepponti di Comacchio". A Ovest, nelle vicinanze del giacimento medesimo, è possibile individuare anche la linea elettrica da alta tensione ENEL che si sviluppa lungo la direttrice Nord-Sud.

Nel caso *Medium* scenario (Figura 23), il territorio considerato subsidente, ovvero caratterizzato da un abbassamento superiore a 3 cm, si estende poco al di fuori della traccia del giacimento di Agosta. Il manufatto di interesse che in questo periodo subirebbe il massimo abbassamento, pari a circa 10 mm/anno, è l'impianto idrovoro "Fosse". Le altre opere strategiche maggiormente coinvolte subirebbero abbassamenti di circa 8-10 mm/anno (parte dell'argine Agosta e della Linea elettrica ad alta tensione ENEL). Tutte le altre opere strategiche risentirebbero di abbassamenti più contenuti (1-2 mm/anno).

Considerazioni analoghe sono facilmente deducibili per lo scenario *Upper*, dove nel medesimo periodo l'abbassamento nei pressi dell'idrovora "Fosse" è di circa 30 mm/anno (circa 3 volte lo scenario *Medium*). Anche gli altri manufatti presentano una velocità di abbassamento maggiore pari a 25/30 mm/anno rispettivamente per una parte dell'argine Agosta e per la linea ad lata tensione ENEL.

Nel periodo 2017-2030 la subsidenza massima è di 10 cm (*Medium* Scenario, Figura 23b) e di 18 cm (*Upper* Scenario, Figura 24b) con il punto di massimo abbassamento collocato all'incirca nella stessa posizione dell'intervallo temporale 2017-2020. Rispetto al periodo precedente la forma dell'area subsidente si estende lungo la direttrice NO-SE. Anche in questo secondo caso il manufatto che subirebbe il massimo abbassamento nel *Medium* scenario, pari a circa 9.0 cm (16.0 cm considerando l'*Upper* scenario), è l'idrovora "Fosse". Le altre opere strategiche che nel *Medium* scenario (*Upper* scenario) che sperimenterebbero abbassamenti non trascurabili sono: la parte di





argine Agosta a ridosso del giacimento con 9 cm (16 cm) di abbassamento, parte delle linea elettrica ad alta tensione ENEL che subirebbe un abbassamento di 7 cm (11 cm). Il manufatto in mattoni "Treponti di Comacchio" sperimenterebbe un abbassamento di circa 1.7 cm (1.7 cm), risentendo pressoché esclusivamente dell'effetto della produzione residua di Dosso degli Angeli. Nelle zone caratterizzate dai valori massimi di subsidenza, si hanno velocità di abbassamento mediamente pari a circa 7 mm/anno e 12 mm/anno per i due scenari *Medium* e *Upper* rispettivamente.

Le mappe evidenziano che l'incremento di subsidenza al 2030, nel caso più sfavorevole dello scenario *Upper*, si estende per qualche chilometro lungo la direttrice NO-SE. L'isocinetica caratterizzata dall'abbassamento di 1 cm dista circa 8 km verso NO e SE dal punto di massima subsidenza. L'area subsidente interessa le zone a ridosso del giacimento di Agosta ed è caratterizzata dalla presenza di terreni ad uso agricolo privi di centri abitativi. L'unico abitato che viene lambito dalla subsidenza indotta è Comacchio. I manufatti più importanti, che potrebbero risentire maggiormente dell'abbassamento dovuto alla coltivazione del campo di Agosta, sono localizzati nella parte a Nord-Ovest delle valli di Comacchio. Gli abbassamenti simulati rimangono sempre contenuti nell'ordine di qualche centimetro.


Figura 23 Subsidenza prevista (cm) nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta/Dosso degli Angeli sovrapposta all'ortofoto dell'area di interesse (*Medium Scenario*). Con i simboli in legenda si evidenziano le opere strategiche e i maggiori manufatti idraulici che potrebbero essere interessati dalla subsidenza prodotta dalla coltivazione dei giacimenti.



Figura 24 Subsidenza prevista (cm) nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta/Dosso degli Angeli sovrapposta all'ortofoto dell'area di interesse (*Upper Scenario*). Con i simboli in legenda si evidenziano le opere strategiche e i maggiori manufatti idraulici che potrebbero essere interessati dalla subsidenza prodotta dalla coltivazione dei giacimenti.



STIMA DEGLI SPOSTAMENTI ORIZZONTALI

La compattazione di un giacimento a causa dell'estrazione di fluidi determina in superficie una deformazione prevalentemente verticale che dà luogo al fenomeno della subsidenza fin qui indagato. La contrazione laterale del giacimento, tuttavia, contribuisce anche al manifestarsi di uno spostamento orizzontale, la cui entità viene simulata con il modello geomeccanico. Tale componente dello spostamento è di norma inferiore a quella verticale.

I risultati ottenuti dalla modellazione in termini di spostamento orizzontale per i periodi 2017-2020 e 2017-2030 sono riportati in Figura 25 e Figura 26. Nel primo periodo di coltivazione (2017-2020) il massimo dello spostamento orizzontale, per lo scenario più cautelativo (*Medium* scenario), si ha nelle due zone poste a Ovest e ad Est del giacimento di Agosta con valori poco superiori a 2 centimetri. Per lo stesso periodo, nel caso dello scenario *Upper*, gli spostamenti orizzontali sono circa il doppio (4 cm) localizzati nel versante ad Ovest di Agosta. Come teoricamente atteso, gli spostamenti orizzontali ottenuti all'interno della traccia del giacimento sono pressoché assenti.

Per il secondo periodo (2017-2030) nello scenario *Medium*, si osserva un andamento simile al periodo precedente, con una maggiore estensione degli spostamenti verso Nord e Sud. Gli spostamenti orizzontali raggiungono valori dell'ordine dei 5 centimetri nei pressi del bordo occidentale del giacimento di Agosta. Considerazioni del tutto analoghe si possono dedurre dallo scenario meno cautelativo (*Upper* scenario). I valori massimi di spostamento orizzontale sono circa il doppio del periodo precedente. Inferiori a 1 cm sono invece gli spostamenti connessi alla produzione residua di Dosso degli Angeli, benché interessino un'area più ampia.

Dalle due figure, si può dedurre che le opere e i manufatti che potrebbero risentire maggiormente degli spostamenti orizzontali sono quelli posti nella zona a Ovest rispetto al campo di Agosta poiché i massimi spostamenti ad Est ricadono all'interno delle valli di Comacchio. La parte dell'argine Agosta e della linea ENEL che subirebbero gli spostamenti orizzontali maggiori sono comunque soggetti a valori inferiori a qualche centimetro nel caso più sfavorevole. Le opere più sensibili, come l'idrovora "Fosse" e l'opera in mattoni "Treponti di Comacchio", risentirebbero di spostamenti trascurabili, dell'ordine di pochi millimetri.



Figura 25 Modulo dello spostamento orizzontale previsto (cm) nel periodo 2017-2018 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta - Dosso degli Angeli sovrapposta all'ortofoto dell'area di interesse (*Medium Scenario*). Con i simboli in legenda si evidenziano le opere strategiche e i maggiori manufatti idraulici che potrebbero essere interessati dagli spostamenti prodotti dalla coltivazione dei giacimenti.



Figura 26 Modulo dello spostamento orizzontale previsto (cm) nel periodo 2017-2018 (a) e 2017-2030 (b) dalla coltivazione del sistema Agosta - Dosso degli Angeli sovrapposta all'ortofoto dell'area di interesse (*Upper Scenario*). Con i simboli in legenda si evidenziano le opere strategiche e i maggiori manufatti idraulici che potrebbero essere interessati dagli spostamenti prodotta dalla coltivazione dei giacimenti.





CALCOLO DEGLI SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI

Le mappe del gradiente degli spostamenti verticali per i periodi 2017-2020 e 2017-2030, ricavate applicando l'equazione (1) alle mappe di subsidenza fornite dal modello geomeccanico, sono riportate rispettivamente in Figura 27 e Figura 28. Come poteva essere osservato anche dalle mappe di subsidenza, i gradienti di deformazione massimi si verificano nelle due zone poste immediatamente ad Est ed Ovest del giacimento di Agosta con un andamento che si sviluppa da Nord-Ovest verso Sud-Est, mentre al centro dello stesso giacimento i valori si riducono sensibilmente. I valori massimi del gradiente verticale per i due periodi 2017-2020 e 2017-2030, nello scenario *Medium*, risultano pari a 2.1×10^{-5} e 5.6×10^{-5} rispettivamente, ovvero molto minore dei limiti di sicurezza sopra riportati. Per lo scenario più conservativo (scenario *Upper*) gli andamenti dei gradienti verticali sono simili allo scenario precedente. I valori massimi per i due periodi sono, rispettivamente, 4.8×10^{-5} e 11.0×10^{-5} . Tali valori sono circa il doppio dello scenario *Medium* ma comunque sempre ragionevolmente sotto i limiti di sicurezza considerati.

Si consideri che i massimi gradienti si trovano nelle vicinanze della traccia superficiale del giacimento e interessano maggiormente infrastrutture strategiche più flessibili, ovvero meno sensibili ai gradienti di deformazione, come la linea elettrica ad alta tensione ENEL e l'argine Agosta. L'idrovora "Fosse", pur trovandosi lungo il boundary Est del giacimento, non risente di gradienti sensibili dovuti agli abbassamenti subsidenziali poiché posta proprio lungo la linea "neutra" (isolinea 0) del gradiente. Il valore del gradiente atteso per questa opera si attesta intorno a 3.0×10^{-5} (30 mm/km) nel caso più sfavorevole. Il gradiente dello spostamento verticale nell'area verso il campo di Dosso degli Angeli risulta inferiore a 1.0×10^{-5} in tutti gli scenari analizzati.



Figura 27 Gradiente dello spostamento verticale prodotto dalla coltivazione dei giacimenti Agosta e Dosso degli Angeli nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (Medium Scenario).



Figura 28 Gradiente dello spostamento verticale prodotto dalla coltivazione dei giacimenti Agosta e Dosso degli Angeli nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (Upper Scenario)



Oltre ai cedimenti differenziali, eventuali problemi per l'integrità delle strutture possono essere generati dal gradiente dello spostamento orizzontale. In particolare, sono generalmente da evitare gradienti positivi, ovvero generati da sollecitazioni a trazione, in strutture in muratura portante, in quanto potrebbero, oltre una certa soglia, generare delle fessurazioni pericolose per la stabilità funzionale della struttura.

Le mappe che evidenziano il modulo del massimo gradiente dello spostamento orizzontale per i due periodi e per i due scenari in esame sono riportate rispettivamente in Figura 29 e Figura 30. La zona posta tra i massimi degli spostamenti orizzontali, ove per altro si verificano i valori maggiori di subsidenza, ovvero le zone poste nell'intorno del giacimento di Agosta lungo una fascia con direttrice Nord-Ovest Sud-Est, risulta compressa senza creare, quindi, problemi per l'integrità delle strutture in essa presenti. In particolare, ciò vale per l'idrovora Fosse e per la parte più sollecitata dell'argine Agosta posti a Est e a Sud rispetto al giacimento. La fascia di "compressione" è tracciata in Figura 29 (*Medium* scenario) e in Figura 30 (*Upper* scenario) per il periodo 2017-2030. La zona è racchiusa dai due segmenti tratteggiati e suddividono l'area in tre fasce contigue le cui caratteristiche "deformative" vengono evidenziate con simboli + (trazione) e – (compressione).

Sono infine stati calcolati i gradienti dello spostamento globale costruito prendendo in considerazione sia i gradienti di subsidenza che i gradienti dello spostamento orizzontale. Dalla Figura 31 e dalla Figura 32 si nota come i valori massimi del gradiente globale di spostamento siano pari a 6.0×10^{-5} e 12×10^{-5} nei due scenari considerati, sempre ampiamente minori rispetto ai valori massimi ammissibili.





giacimento di idrocarburi denominato Agosta



| Gradiente di sp. orizzontale (m/m) | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|---------|------|--------|---------|--------|-----------|---------|---------|
| | 5E.67. | 5E.5.5K | 3.5E | 4.5E.5 | 5E.5.5E | >.5E.5 | 3.5E. 9.5 | E.50007 | 2.00012 |

Figura 29 Gradiente di spostamento orizzontale prodotto dalla coltivazione del campo nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (*Medium Scenario*). Sono evidenziate in (b) le zone a trazione e compressione.





giacimento di idrocarburi denominato Agosta



Figura 30 Gradiente di spostamento orizzontale prodotto dalla coltivazione del campo nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (Upper Scenario). Sono evidenziate in (b) le zone a trazione e compressione.



Figura 31 Gradiente dello spostamento TOTALE prodotto dalla coltivazione del campo nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (Medium Scenario).



Figura 32 Gradiente dello spostamento TOTALE prodotto dalla coltivazione del campo nei periodi 2017-2020 (a) e 2017-2030 (b), ottenuti dai risultati del modello geomeccanico forniti da Eni E&P (Upper Scenario).





ANALISI DEL RISCHIO AMBIENTALE CONNESSO ALLE DEFORMAZIONI ANTROPICHE DEL SUOLO

La compatibilità delle deformazioni riportate nei paragrafi precedenti con le caratteristiche del territorio in esame dipende dall'impatto complessivo che queste esercitano sulle strutture e sulle attività presenti nell'area considerata.

Inoltre, come già osservato, con tali tecniche non è possibile rilevare la subsidenza connessa alla perdita di massa dei terreni di bonifica che, essendo ricchi di sostanza organica, si ossidano a contatto con l'atmosfera. Si può ritenere che, analogamente ad altre aree a prevalenza di suoli torbosi presenti nella fascia costiera padana, le zone interne alla bonifica del Mezzano si abbassino con una velocità dell'ordine di 1-2 cm/anno, superiore pertanto a quella che sarebbe indotta dalla coltivazione del sistema Agosta-Dosso degli Angeli.

La modesta entità degli abbassamenti lungo l'argine che delimita la bonifica dalle Valli di Comacchio (un valore massimo stimato di circa 16 cm nel caso più conservativo), e quindi la ridotta perdita del franco altimetrico dell'argine stesso, fa sì che l'incremento di rischio ambientale a seguito della subsidenza sulla principale opera di salvaguardia idraulica possa ritenersi trascurabile almeno nel prossimo decennio. Le Figure

Figura 33 eFigura 34 riportano, rispettivamente, il posizionamento delle sezioni di rilievo che interessano l'argine Agosta e il relativo profilo longitudinale. Si noti che gli abbassamenti massimi si localizzano nelle sezioni 15-27 con un massimo di circa 16 cm.

Dallo studio dell'andamento dei livelli di marea sui dati rilevati a passo semi-orario presso la stazione di misura a valle dello sbarramento di Volta Scirocco (periodo 2 settembre 2008 e il 2 settembre 2010) si è potuto ricostruire l'onda di marea semplificata all'interno delle valli come una sinusoide regolare avente i seguenti:

Tabella 2 Tabella dei parametri dell'onda di marea sinusoidale ricostruita

| Parametro | valore |
|----------------------------|------------|
| Periodo di oscillazione, p | 11.995 ore |
| Ampiezza, a | 0,1436 m |





La forma dell'onda di marea risulta:

$$\eta_0 = a_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

La condizione di subsidenza massima stimata di circa 16 cm nello scenario più sfavorevole non induce problematiche di rilievo al franco arginale dell'argine Agosta anche in condizioni marea (circa 15 cm) all'interno del sistema vallivo. Si deduce, almeno in prima analisi, che la sicurezza idraulica della zona valliva rimane preservata.

Anche un aumento di 16-18 cm della prevalenza delle pompe dell'impianto idrovoro di Fosse nel periodo 2017-2030 non può essere considerato come una fattore di rischio per la gestione idraulica del bacino. Una verifica dell'efficienza idraulica delle reti di bonifica a seguito della subsidenza antropica attesa è condotta nel capitolo successivo di questo studio.



Figura 33 Subsidenza attesa per lo scenario "upper" nel periodo 2017-20130. Sono indicate le sezioni principali dell'argine Agosta che risentono della subsidenza antropica prodotta.



Figura 34 Profilo longitudinale delle sezioni principali dell'argine Agosta. In blu è indicato il profilo di rilievo attuale e in rosso il profilo modificato dall'abbassamento prodotto dallo sfruttamento del sistema Dosso-Agosta.





Per quanto riguarda le possibili instabilità e cedimenti strutturali connessi agli spostamenti differenziali a cui saranno soggette le principali infrastrutture presenti nell'area si può osservare che:

- A- nelle zone caratterizzate dal massimo gradiente di deformazione verticale è presente l'idrovora Fosse (9.5×10⁻⁵). L'entità dei gradienti massimi previsti sono circa 5 volte inferiori a quelli più restrittivi che caratterizzano i manufatti in mattoni (5×10⁻⁴), con una conseguente assenza di preoccupazione in merito alla possibile insorgenza di fessurazioni o cedimenti strutturali del manufatto (in cemento armato) causati dalla coltivazione del sistema Agosta-Dosso degli Angeli;
- B- la linea elettrica ENEL ad alta tensione si sviluppa lungo la direzione Nord-Sud. Il massimo gradiente previsto lungo la linea elettrica è di circa 8.7×10⁻⁵, valore che non desta nessuna preoccupazione ai fini della stabilità della linea;
- C- l'argine Agosta subirà degli spostamenti differenziali dell'ordine di 1.0×10⁻⁴, ovvero 100.0 mm al chilometro. Data l'entità e la graduale variazione spaziale degli spostamenti antropici indotti, il rilevato arginale non può subire alcun danno che ne possa compromettere la stabilità. Il corpo arginale in terra, caratterizzato da un'elevata elasticità strutturale, si adatterà agli spostamenti trascurabili imposti;
- D- il ponte della Strada Statale Romea che attraversa il fiume Reno nella zona a Sud delle valli di Comacchio. Il cedimento differenziale ottenuto dalla modellazione presenta valori simili a quelli determinati nell'idrovora Fosse. La stima di 3.6 mm/km è molto inferiore al valore limite più cautelativo imposto (oltre due ordini di grandezza);
- E- analogamente al precedente manufatto, per il ponte della Strada Statale Romea che attraversa il fiume Lamone, si è determinato un valore massimo di cedimento differenziale di 3.3 mm/Km. Uno spostamento di quest'ordine non determina nessun problema alla struttura analizzata;
- F- la traversa mobile denominata Chiusa Volta Scirocco è assoggettata ad un valore di cedimento differenziale massimo modellato pari a 1.9×10⁻⁶. Il valore trascurabile determinato assicura la stabilità e la funzionalità del manufatto.
- G- La centrale a ciclo combinato "Teodora" di proprietà ENEL S.p.A. si trova nella frazione di Porto Corsini (Ravenna). L'analisi dei cedimenti differenziali ha evidenziato un valore



trascurabile per l'opera in oggetto pari a 1.4 mm/Km.

UNIVERSITÀ DEGLI STUD DI FERRARA

di Fisica e enze della Terr

- H- la Canaletta di Mandriole è ubicata nella zona a Sud delle valli di Comacchio. La canaletta è costruita in calcestruzzo ed emunge acqua dal fiume Reno nei pressi della Volta Scirocco permettendo di distribuire acqua dolce nella Valle di Mandriole. Il manufatto ha una notevole importanza per cui valori di cedimento troppo elevati potrebbero creare problemi al corretto funzionamento della canaletta stessa. Il valore massimo di cedimento differenziale determinato dal modello è pari a 4.1 mm/Km ovvero ben lontano dai limiti normativi più stringenti presi in considerazione;
- I- il massimo gradiente di spostamento orizzontale in trazione è stimato in 6.0×10⁻⁵. Le strutture maggiormente assoggettate ai gradienti di spostamento orizzontale sono le opere con murature portanti da cui si deduce che l'unica opera di una certa importanza che può risentirne è il ponte "Trepponti di Comacchio" ove si instaurano gradienti dell'ordine di 1.3×10⁻⁶ poiché distante circa 8 km dal giacimento. Ciò implica la presenza di spostamenti differenziali di trazione alle estremità di questa struttura intorno al decimo di millimetro, e pertanto del tutto insignificanti anche per opere che teoricamente possiedono una bassa resistenza alle sollecitazioni di trazione.

Le Tabella 3 e Tabella 4 riassumono i valori dello spostamento differenziale ottenuti dal modello geomeccanico in corrispondenza alle opere individuate.





Tabella 3 Tabella riassuntiva che riporta la tipologia di manufatto analizzato e i relativi valori massimi di spostamento differenziale riscontrati nei due periodi considerati e per i due scenari modellati. Tali valori sono espressi adimensionalmente.

| | | SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI (-) | | | | | |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|--|
| IDEN. | MANUFATTO | Medium | Scenario | Upper Scenario | | | |
| (Figura 11) | | 2017-2030 | 2017-2020 | 2017-2030 | 2017-2020 | | |
| А | IMPIANTO IDROVORO FOSSE | 1.8×10 ⁻⁵ | 5.5×10⁻⁵ | 4.3×10 ⁻⁵ | 9.5×10⁻⁵ | | |
| В | LINEA ELETTRICA ALTA TENSIONE | 1.7×10 ⁻⁵ | 4.8×10 ⁻⁵ | 3.5×10 ⁻⁵ | 8.7×10 ⁻⁵ | | |
| С | ARGINE AGOSTA | 2.0×10 ⁻⁵ | 5.5×10⁻⁵ | 4.6×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻⁴ | | |
| D | PONTE ROMEA SUL RENO | 1.0×10 ⁻⁶ | 3.5×10⁻ ⁶ | 1.1×10 ⁻⁶ | 3.6×10⁻ ⁶ | | |
| E | PONTE ROMEA SUL LAMONE | 7.5×10 ⁻⁷ | 3.3×10⁻ ⁶ | 7.7×10 ⁻⁷ | 3.3×10⁻ ⁶ | | |
| F | VOLTA SCIROCCO | 5.1×10 ⁻⁷ | 1.8×10⁻ ⁶ | 5.4×10 ⁻⁷ | 1.9×10⁻ ⁶ | | |
| G | CENTRALE ENEL "TEODORA" | 4.2×10 ⁻⁷ | 1.4×10 ⁻⁶ | 4.2×10 ⁻⁷ | 1.4×10 ⁻⁶ | | |
| Н | CANALETTA DI MANDRIOLE | 5.0×10 ⁻⁷ | 3.9×10⁻ ⁶ | 1.1×10 ⁻⁶ | 4.1×10 ⁻⁶ | | |
| I | TREPPONTI DI COMACCHIO | 3.5×10 ⁻⁷ | 1.3×10 ⁻⁶ | 3.7×10 ⁻⁷ | 1.3×10 ⁻⁶ | | |

Tabella 4 Tabella riassuntiva che riporta la tipologia di manufatto analizzato e i relativi valori massimi di spostamento differenziale riscontrati nei due periodi considerati e per i due scenari modellati Tali valori sono espressi in mm/Km.

| | | SPOSTAMENTI DIFFERENZIALI (mm/km) | | | | |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------|-----------|--|
| (Eigura 11) | MANUFATTO | Medium | Scenario | Upper Scenario | | |
| (Figura 11) | | 2017-2030 | 2017-2020 | 2017-2030 | 2017-2020 | |
| А | IMPIANTO IDROVORO FOSSE | 18.0 | 55.0 | 43.0 | 95.0 | |
| | LINEA ELETTRICA ALTA | | | | | |
| В | TENSIONE | 17.0 | 48.0 | 35.0 | 87.0 | |
| С | ARGINE AGOSTA | 20.0 | 55.0 | 46.0 | 100.0 | |
| D | PONTE ROMEA SUL RENO | 1.0 | 3.5 | 1.1 | 3.6 | |
| E | PONTE ROMEA SUL LAMONE | 0.8 | 3.3 | 0.8 | 3.3 | |
| F | VOLTA SCIROCCO | 0.5 | 1.8 | 0.5 | 1.9 | |
| G | CENTRALE ENEL "TEODORA" | 0.4 | 1.4 | 0.4 | 1.4 | |
| Н | CANALETTA DI MANDRIOLE | 0.5 | 3.9 | 1.1 | 4.1 | |
| I | TREPPONTI DI COMACCHIO | 0.4 | 1.3 | 0.4 | 1.3 | |





VALUTAZIONE DELL'IMPATTO IDRAULICO DELLA SUBSIDENZA SULLA RETE DI BONIFICA

Gli abbassamenti causati dalla subsidenza possono modificare il comportamento idrologicoidraulico dei bacini interessati, in termini di: pendenza della rete e di conseguenza tempi di corrivazione dei bacini; variazione delle quote di avvio e arresto delle pompe degli impianti idrovori; variazione dei franchi di bonifica.

La coltivazione dei giacimenti di gas denominati Agosta e Dosso degli Angeli provoca un cono subsidenziale (Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24) che influenza i comprensori di bonifica della Pianura Ferrarese e Romagna Occidentale, localizzati tra i comuni di Lagosanto, Comacchio, Ostellato e Argenta e la parte nord del Comune di Ravenna.

I comprensori di bonifica interessati sono: Bonifica Mezzano Sud-Est, Bonifica Mezzano Nord-Ovest, Bonifica Valle Pega, Bonifica Marozzo, Bonifica Torbe, Bonifica Valle Isola, Bonifica Bosco (Figura 35).

Il comprensorio che maggiormente risente degli effetti della subsidenza è la Bonifica di Mezzano Sud-Est, ed è quello che è stato analizzato con maggior dettaglio.

Si ricorda che i modelli non sono da intendersi a verifica del funzionamento della rete di canali, ma solamente per valutare le differenze tra la situazione attuale e quella con le modifiche indotte dalla subsidenza antropica conseguente alla coltivazione dei giacimenti.



Figura 35 Comprensori di bonifica interessati dalla subsidenza

MODELLO IDROLOGICO DEL COMPRENSORIO DI BONIFICA

Il modelli idrologici dei comprensori di bonifica sono stati realizzati con il codice HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic.

La suddivisione in sottobacini è stata fatta sulla base della rete di bonifica. Nella Figura 36 è riportata la schematizzazione adottata secondo la suddivisione dei consorzi di competenza, mentre





nella Figura 37 è evidenziata la schematizzazione del comprensorio di bonifica utilizzata all'interno del modello HEC-HMS.



Figura 36 Individuazione dei sottobacini secondo la nomenclatura dei consorzi di bonifica



Figura 37 Schematizzazione del comprensorio di bonifica nel modello HEC-HMS

Per la Bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne, bacino maggiormente impattato dalla subsidenza, è stata effettuata una schematizzazione più dettagliata sulla base della rete di bonifica, considerando ogni tronco di canale affluente al collettore Fosse, asse portante del sistema di drenaggio della Bonifica. L'area della vecchia Bonifica Gramigne, le cui acque di scolo sono recapitate direttamente all'origine del collettore Fosse attraverso lo Scolo Patachine che sottopassa in botte-sifone il Canale Circondariale Gramigne-Fosse, è stata schematizzata con un solo bacino. Nella Figura 38 è riportata la schematizzazione adottata.



Figura 38 - Schematizzazione della Bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne nel modello HEC-HMS.

Considerando di effettuare simulazioni ad evento e non in continuo, per il calcolo del volume efficace è stato utilizzato il metodo della perdita esponenziale, trascurando le perdite per evapotraspirazione ed il deflusso profondo. Per la determinazione dell'idrogramma del deflusso superficiale è stato utilizzato il metodo cinematico, che ben si adatta ai bacini di bonifica e che permette di considerare l'impatto della variazione di pendenza causato dal cono subsidenziale. Anche per la traslazione dell'onda di piena all'interno dei canali (Bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne) è stato utilizzato il metodo cinematico.

Non essendo in possesso dei coefficienti udometrici dei comprensori di bonifica e nemmeno di dati misurati per la taratura dei modelli idrologici, sono stati valutati i parametri dei modelli analizzando il comprensorio di bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne, dove si hanno maggiori dati.

Si è partiti dalla portata massima nominale delle elettropompe installate presso l'impianto idrovoro di Fosse a servizio del comprensorio di Bonifica: idrovoro Fosse A.B., strutturato su tre elettropompe da 6 m³/s ed idrovoro Fosse Esterno, strutturato su due elettropompe da 3 m³/s, per





una portata massima nominale complessiva pari a 24 m³/s. Le acque sollevate dalle idrovore vengono convogliate nel canale Fosse Foce – Logonovo, il quale funge da adduttore di acqua per le Valli di Comacchio.

Ipotizzando che la portata delle pompe sia stata dimensionata per un evento con tempo di ritorno 25 anni, si è quindi cercato di generare un evento pluviometrico con Tr=25 anni che determinasse una portata al colmo di 24 m³/s.

Il tempo di corrivazione del bacino è stato calcolato con la formula di Pasini

$$t_c = \frac{0.0045}{\sqrt{i}} \sqrt[3]{SL} \qquad \qquad \sqrt{i} = \frac{\sum l}{\sum \frac{l_n}{\sqrt{i_n}}}$$

Dove t_c è il tempo di corrivazione in giorni, S la superficie del bacino in km² ed L la lunghezza del collettore in km, h_{in} rispettivamente lunghezza e pendenza dei diversi tratti del collettore. Considerando solamente la superficie del Mezzano Sud-Est (Ha 7420), il percorso più lungo è dato da: il collettore Fosse (L = 8.3 km i = 0.0002) ed il collettore Bocchetta (L = 3.8 km i = 0.0001), ottenendo un tempo di corrivazione di 3.5 giorni. Considerando che nel calcolo non è stato incluso il bacino Gramigna si è assunto un tempo di corrivazione di 4 giorni.

Per l'intensità di pioggia si è fatto riferimento allo studio "E. Todini & Partners - Indagine Statistica sulle piogge intense nel Comprensorio di Bonifica Renana". I risultati dello studio sono riportati in <u>www.bonificarenana.it/documenti/Tabelle%20piogge.htm</u>. In particolare sono stati utilizzati i risultati per il territorio di Sinistra Idice, che è prossimo a quello del comprensorio di Mezzano.

È stato creato un evento pluviometrico della durata di 5 giorni, con un massimo di intensità relativa a 4 giorni (pari al tempo di corrivazione) preceduto da 1 giorno con intensità pari all'intensità residua consentita dalle curve di possibilità climatica (Figura 39).



Figura 39 letogramma utilizzato per la generazione dell'evento.

Il tempo di corrivazione nel modello è principalmente regolato dalla pendenza imposta ai sottobacini, mentre la portata al colmo dai parametri della curva di infiltrazione.

Per tutti i sottobacini la pendenza è stata posta pari a i=0.000015.

Anche per l'infiltrazione per tutti i bacini sono stati utilizzati gli stessi parametri della formula:

$$Loss = (Coeff _Base + Coeff _Increase) \operatorname{Pr}ecip^{Exponent}$$
$$Coeff _Base = \frac{InitialCoef}{(CoefRatio^{(0.1*CUML)})}$$
$$Coeff _Increase = 0.2*InitialRange \left(1 - (\frac{CUML}{InitialRange})\right)^{2}$$

InitialRange=0.0 InitialCoef=0.4 CoefRatio=1.0 Exponent=0.85

Nella Figura 40 è riportato l'idrogramma risultante alla sezione di chiusura.



Figura 40 Idrogramma risultante alla sezione di chiusura del bacino Mezzano Sud-Est Gramigna

Sempre con la formula di Pasini sono stati determinati i tempi di corrivazione degli altri bacini:

- Bacino Mezzano Nord Ovest Tc = 5 giorni
- Bacino Marozzo Tc = 3.7 giorni
- Bacino Principale Valle Isola Tc = 4 giorni
- Bacino Bosco Tc = 1.5 giorni
- Bacino Torbe Tc = 1 giorni
- Bacino Valle Pega Tc = 2.8 giorni

ed utilizzando parametri analoghi a quelli del bacino Mezzano Sud-Est Gramigna sono stati calcolati gli idrogrammi per questi bacini



Figura 41 Idrogrammi risultanti alle sezioni di chiusura dei bacini

Per quanto riguarda la parte idrologica del comparto romagnolo si è fatto riferimento allo "Studio Idrologico Idraulico del canale di Bonifica Destra Reno" del'Ing. Massimo Plazzi del 2007; in particolare sono state prese a riferimento le elaborazioni pluviometriche idrologiche dello studio ricavando le portate per l'evento con tempo di ritorno pari a 30 anni.

Per tale evento sono stimati circa 160 mm di precipitazione in 4 giorni di pioggia per cui si ottiene una portata:

$$Q_{max} = \Phi \cdot h \cdot A/T_c$$

dove:

 Φ è il coefficiente di deflusso

h l'altezza di precipitazione

A la superficie del bacino

T_c il tempo di corrivazione.

Di qui si è ottenuto $Qmax = 20.5 \text{ m}^3/\text{s}$ la portata raccolta dall'intero bacino romagnolo occidentale.



La portata sul Destra Reno, invece, è stata desunta dallo studio dell'ing. Massimo Plazzi per cui considerando i diversi immissari nel canale a partire da monte fino all'ultimo importante immissario, il Fosso Vecchio, si è stimata una portata Qmax dell'ordine dei 150 m³/s.

Si tiene ad ogni modo a precisare che, indipendentemente dagli eventi contemplati nella presente analisi, le valutazioni hanno comunque valore generale e possono essere estese anche a quei canali che non sono stati oggetto di verifica modellistica. Si ribadisce ancora che i bacini indagati sono grossomodo omogenei, indipendentemente dalle dimensioni e sviluppo preferenziale, sono prevalentemente piatti e regolati da impianti di sollevamento.

MODELLO IDRAULICO DEL COMPRENSORIO DI BONIFICA

I modelli idraulici dei comprensori di bonifica sono stati realizzati con il codice HEC-RAS (River Analysis System) sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Il codice è descritto in appendice.

BONIFICA MEZZANO SUD-EST GRAMIGNE

La geometria del sistema Bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne è stata realizzata sulla base del "PROGETTO MEZZANO SUD EST Opere di bonifica per l'adeguamento delle reti di scolo principali e secondarie nei bacini Mezzano nord-ovest e Mezzano sud-est agli abbassamenti del terreno, con ricalibratura delle sezioni, impianti idrovori sussidiari, presidi di sponda nei comuni di Argenta e Comacchio", fornito dal CONSORZIO DI BONIFICA 2º CIRCONDARIO POLESINE DI S. GIORGIO FERRARA.

Le tavole sono datate al 1991 per quanto riguarda i profili longitudinali e le sezioni trasversali ed al 1998 per i manufatti. Nel modello sono stati schematizzati i seguenti canali, con relativi manufatti:

| > Collettore Fosse | > Bocchetta |
|--------------------|--------------------------------------|
| > Baro Bocca | > Barone |
| > Curzio | > Mottalunga |
| > Caldirolo | > Menate |
| > Filo | > Collettore Anita |
| > Fosse | > Fondo |
| > Ripalunga | > Della Fossa |
| > Burana | > Albertini |
| > Umana | > Del Lupo |
| > Agosta | > tratto allacciante Albertini Umana |





> tratto allacciante Umana Del Lupo

> tratto allacciante Del Lupo Agosta

Nella Figura 42 è riportato lo schema idraulico utilizzato.



Figura 42 Schematizzazione del comprensorio di bonifica nel modello HEC-RAS.

Per l'impianto idrovoro (Fosse A.B. e Fosse Esterno) sono a disposizione solamente il numero e la portata delle pompe, con indicazione delle quote di avviamento e arresto della prima pompa da 6 m³/ s e la quota di avviamento della prima pompa da 3 m³/s. Sulla base di queste informazioni si è ipotizzato un funzionamento dell'impianto idrovoro come schematizzato nella Tabella 5.



| Pompa n. | portata | Quota avvio | Quota arresto |
|----------|---------|-------------|---------------|
| 1 | 6 m³/s | 5.30 | 5.10 |
| 2 | 6 m³/s | 5.35 | 5.15 |
| 3 | 6 m³/s | 5.40 | 5.20 |
| 4 | 3 m³/s | 5.45 | 5.25 |
| 5 | 3 m³/s | 5.50 | 5.30 |

Tabella 5 Schema di funzionamento dell'impianto idrovoro simulato nel modello

Come accennato, oltre all'impianto idrovoro, sono stati schematizzati all'interno del modello tutti i manufatti interferenti, tranne la botte sifone sottopassante il Canale Circondariale Gramigne-Fosse che collega il bacino della Bonifica Gramigne al Collettore Fosse, la portata calcolata dal modello idrologico è immessa direttamente all'inizio del Collettore Fosse.

L'input al modello è determinato dai risultati del modello idrologico, ogni sottobacino schematizzato in HMS determina la portata di input per il relativo canale, portata che viene uniformemente distribuita come afflusso laterale lungo il canale. Nelle simulazioni i manufatti con opere mobili sono considerati completamente aperti. Su tutti i canali è stato considerato un coefficiente di scabrezza n=0.03 m^{-1/3}s secondo la formulazione di Manning.

Con il modello idraulico è stata effettuata la simulazione dell'evento, riportando (Figura 43) i livelli nelle sezioni più a monte dei seguenti canali: Collettore Fosse (il canale principale della rete di drenaggio), Bocchetta (il più distante dall'impianto idrovoro, escludendo la Bonifica Gramigne), Albertini (il canale secondario con maggior estensione), Agosta (il più vicino all'impianto idrovoro). Per gli stessi canali è riportato il profilo dei livelli massimi (FigureFigura 44,Figura 45,Figura 46 eFigura 47).

Nella Figura 48 è riportato, infine, il funzionamento complessivo dell'impianto idrovoro, livelli a monte dell'impianto e portate sollevate dalle elettropompe. L'andamento oscillante dei livelli è dato dalla combinazione tra le portate in arrivo e i livelli di avvio e arresto delle pompe.



Figura 43 Livelli durante l'evento nelle sezioni di monte di alcuni canali della rete.



Figura 44 Profilo dei livelli massimi lungo il Collettore Fosse.







Figura 46 Profilo dei livelli massimi lungo il canale Albertini.







Figura 48 Livelli e portate all'impianto idrovoro durante l'evento.





ALTRI BACINI

Per i restanti bacini i dati disponibili sono molto meno numerosi. Le sezioni di calcolo pervenute non coprono l'intero comprensorio, taluni tratti sono mancanti, altri non completamente sviluppati, per cui si è reso necessario un lavoro di interpolazione e di ricostruzione delle sezioni sulla scorta dei dati cartografici e delle indicazioni dedotte durante i sopralluoghi condotti in zona; laddove sono mancate completamente le informazioni topografiche non sono stati inseriti i canali. Inoltre i dati di rilievo in alcuni casi sono alquanto datati e, con ogni probabilità, non rappresentativi della situazione attuale reale, tuttavia lo scopo di questa analisi è quello di mettere a confronto il sistema in configurazioni pre e post fenomeno subsidenziale non tanto quello di riprodurre la reale gestione dell'intero comprensorio.

I canali che si è riusciti a ricostruire per la parte ferrarese in base ai dati geometrici sono indicati in Figura 49 che rappresenta l'editor di gestione planimetrica del modello HEC-RAS; in particolare sono stati ricostruiti i canali dei bacini Mezzano Nord Ovest, Bosco e Principale Valle Isola. La figura include anche Mezzano Sud-Est Gramigne descritto nel paragrafo precedente.

I canali ricostruiti per la parte romagnola, indicati in Figura 50, sono il Destra Reno, Canalone, Busona, Delle Vacche, Fabrizio, Fenario, Gattolo, Gulandi, Marcaccina, Pinetale, San Pietro e Savarna.

I risultati ottenuti devono essere interpretati alla luce della presente analisi, non tanto come verifica idraulica del sistema di drenaggio dal punto di vista dell'officiosità idraulica o meno, piuttosto una ordinaria messa a confronto dei profili idrici nei diversi scenari.







Figura 49 Definizione della geometria complessiva del sistema in HEC-RAS per la parte ferrarese.


Figura 50 Definizione della geometria complessiva del sistema in HEC-RAS per la parte romagnola

L'input ai modelli è determinato dai risultati dei modelli idrologici, ogni sottobacino schematizzato in HMS determina la portata di input per il relativo canale, portata che viene uniformemente distribuita come afflusso laterale lungo il canale. Per queste reti non è disponibile alcuna informazione sulle pompe, pertanto, come condizione al contorno di valle è stata fissata una pendenza di moto uniforme. Tale condizione non può in alcun modo rappresentare in modo esauriente il reale comportamento della rete idraulica, ma si sottolinea ancora una volta come l'obbiettivo dell'analisi è evidenziare l'impatto del cono subsidenziale sulla rete di scolo e non di rappresentare in modo corretto il comportamento idraulico dei bacini. Per il Destra Reno si è ipotizzato come condizione di valle un livello medio mare pari a 0.5 m.

Su tutti i canali è stato considerato un coefficiente di scabrezza n=0.03 m^{-1/3}s secondo la formulazione di Manning.

Nelle Figure Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 sono riportati i profili dei massimi livelli ottenuti in alcuni dei canali simulati.



Figura 51 Profilo dei livelli massimi lungo il canale Mezzano Nord-Ovest.



Figura 52 Profilo dei livelli massimi lungo il canale Bosco.



Figura 53 Profilo dei livelli massimi lungo il canale Principale Valle Isola.



Figura 54 Profilo dei livelli massimi lungo il Destra Reno





IMPATTO DELLA SUBSIDENZA SULLA RETE SCOLANTE

BONIFICA MEZZANO SUD-EST GRAMIGNE

Il cono subsidenziale provoca abbassamenti differenziali all'interno del bacino scolante modificando le pendenze della rete dei collettori minori. Tale effetto può essere rappresentato nel modello idrologico variando la pendenza dei due versanti che schematizzano il territorio scolante su ogni canale. Sulla base della previsione della subsidenza attesa al 2030 per le condizioni *Upper* e *Medio* scenario sono state determinate le variazioni di pendenza media per i sottobacini schematizzati. I valori diversi da zero sono riportati nella Tabella 6.

| | Upper | Medio |
|--------------------|-----------|-----------|
| Caldirolo(1) | -1.14E-05 | 3.50E-05 |
| Caldirolo(2) | -2.54E-05 | 2.63E-05 |
| Menate(1) | 3.40E-05 | 2.20E-05 |
| Menate(2) | -5.40E-05 | -2.70E-05 |
| Filo(1) | 5.90E-05 | 3.00E-05 |
| Filo(2) | -5.00E-05 | -2.30E-05 |
| Fosse Monte(1) | 1.00E-06 | 0.00E+00 |
| Fosse Monte(2) | 3.10E-05 | 1.80E-05 |
| Anita Monte1(1) | -5.10E-05 | -2.80E-05 |
| Anita Monte1(2) | 4.00E-05 | 2.30E-05 |
| Anita Valle(1) | -5.10E-05 | -2.80E-05 |
| Anita Valle(2) | 4.00E-05 | 2.30E-05 |
| Albertini Monte(1) | 7.00E-07 | 8.70E-07 |
| Albertini Monte(2) | -1.40E-06 | -1.69E-06 |
| Albertini Valle(1) | 4.10E-06 | 3.20E-06 |
| Albertini Valle(2) | -9.30E-06 | -5.90E-06 |
| Umana Monte (1) | 2.60E-06 | 2.80E-06 |
| Umana Monte(2) | -3.80E-06 | -4.20E-06 |
| Umana Medio(1) | 4.70E-06 | 4.00E-06 |
| Umana Medio(2) | -7.60E-06 | -6.20E-06 |
| Umana Valle(1) | 1.87E-05 | 1.09E-05 |
| Umana Valle(2) | -4.43E-05 | -2.37E-05 |
| Del Lupo Monte(1) | 2.25E-05 | 1.61E-05 |
| Del Lupo Monte(2) | -3.10E-05 | -2.10E-05 |
| Del Lupo Medio(1) | 5.05E-05 | 2.80E-05 |
| Del Lupo Medio(2) | -6.20E-05 | -3.56E-05 |
| Del Lupo Valle(1) | 8.70E-05 | 3.60E-05 |
| Del Lupo Valle(2) | -8.80E-05 | -3.46E-05 |
| Agosta Monte(1) | 4.30E-05 | 2.60E-05 |
| Agosta Monte(2) | -1.60E-05 | -1.60E-05 |
| Agosta Valle(1) | 3.60E-05 | 2.30E-05 |
| Agosta Valle(2) | 1.00E-05 | -3.00E-06 |
| Fosse Valle(1) | 3.60E-05 | 2.30E-05 |
| Fosse Valle(2) | 1.00E-05 | -3.00E-06 |

Tabella 6 Variazione delle pendenze dei sottobacini dovute alla subsidenza





Le variazioni delle pendenze lungo i canali principali non sono state considerate nel modello idrologico, ma solo nel modello idraulico. Infatti la loro schematizzazione all'interno del modello idrologico è stata fatta solo per "completezza" del modello, ma il modello idraulico è direttamente collegato ai sottobacini del modello idrologico.

Nella Figura 55 è riportato il confronto tra gli idrogrammi generati dal sottobacino afferente al canale Filo considerando la situazione attuale, abbassamento al 2030 nello scenario *Upper* e nello scenario *Medio*. Si nota come non si riscontrino variazioni sulla portata massima, ma solamente un leggero anticipo nella risposta del bacino dovuta alle maggiori pendenze.

Nella Figura 56 è riportato lo stesso confronto, ma per l'intero bacino. E' evidente che le variazioni siano ancora minori visto che l'effetto diminuisce all'allontanamento dal punto più subsidente.



Figura 55 Confronto tra gli idrogrammi di piena nel sottobacino del canale Filo nella situazione attuale e con effetto della subsidenza.



Figura 56 Confronto tra gli idrogrammi di piena alla chiusura del bacino della Bonifica Mezzano Sud-Est nella situazione attuale e con effetto della subsidenza.

Per la verifica complessiva dell'effetto della subsidenza sulla rete di bonifica, le variazioni indotte dalla subsidenza sono state applicate anche alle sezioni del modello idraulico. Per ogni sezione del modello è stato calcolato l'abbassamento per gli scenari *Upper* e *Medio*, creando due nuove geometrie in cui questi abbassamenti sono stati applicati alle sezioni. La Tabella 7 riporta i massimi abbassamenti per ogni canale, i valori sono stati approssimati al cm, non sono riportati i canali in cui il massimo abbassamento è inferiore a 1 cm.

| Canale | Upper [cm] | Medio [cm] |
|------------------|------------|------------|
| Agosta | 18 | 9 |
| Caldirolo | 3 | 3 |
| Canale Anita | 18 | 10 |
| Collettore Fosse | 18 | 10 |
| Dell Lupo | 11 | 6 |
| Dell Lupo Agosta | 15 | 8 |
| Filo | 13 | 8 |
| Fosse | 17 | 9 |
| Menate | 7 | 6 |
| Umana | 3 | 2 |
| Umana Dell Lupo | 3 | 2 |

Tabella 7 Massimi abbassamenti per i canali schematizzati nel modello





La modifica più sostanziale si ha sui livelli di avviamento e arresto delle elettropompe. Infatti, il maggiore abbassamento avviene in corrispondenza dell'impianto idrovoro, quindi, assumendo che l'intero edificio si abbassi di 18 cm, così come tutti i livelli riportati nella Tabella 5, l'avvio e l'arresto delle pompe avverrà prima (Figura 57), aumentando il dislivello tra rete e corpo ricettore, con conseguente incremento dell'energia necessaria per lo smaltimento delle acque.

Le variazioni nell'intero sistema sono minime. L'effetto sull'attacco-stacco pompe è praticamente irrilevante, essendo i volumi da smaltire analoghi in tutte le situazioni (Figura 57). Per quanto riguarda i livelli, le differenze maggiori si hanno ovviamente in corrispondenza della stazione di pompaggio con differenze massime di circa 20 cm tra la situazione attuale e lo scenario Upper (Figura 58 e Figura 59 Confronto tra i livelli su Collettore Fosse alla confluenza con il canale Caldirolo negli scenari attuale, Upper e Medio.), ma con differenze trascurabili in corrispondenza dei livelli massimi. Tali differenze diminuiscono progressivamente all'allontanamento dalla stazione di pompaggio. Nella sezione di monte del Collettore Fosse, ad esempio, le differenze di livello tra i diversi scenari sono praticamente nulle (Figura 60).



Figura 57 Confronto tra le portate pompate nello scenario attuale e nello scenario Upper.



Figura 58 Confronto tra i livelli alla pompa negli scenari attuale, Upper e Medio.



Figura 59 Confronto tra i livelli su Collettore Fosse alla confluenza con il canale Caldirolo negli scenari attuale, Upper e Medio.



Figura 60 Confronto tra i livelli della sezione di monte del Collettore Fosse negli scenari attuale, Upper e Medio.

Per evitare un aumento dei consumi energetici dovuto al maggiore dislivello tra il punto di presa della stazione di pompaggio e il corpo idrico ricettore, i livelli di attacco e stacco delle pompe devono essere riportati in quota assoluta nella posizione attuale.

In questo caso la gestione dei livelli alla stazione di pompaggio è del tutto analoga alla situazione attuale, con minime differenze legate alla diversa risposta del bacino drenato (Figura 61). I maggiori livelli alla chiusura del bacino si ripercuotono però lungo la rete scolante (Figura 62), si noti comunque che in corrispondenza dei livelli massimi, i più critici per il franco di bonifica, le differenze sono irrilevanti. In ogni caso tali incrementi si annullano nelle zone più periferiche del bacino scolante (Figura 63).



Figura 61 Confronto tra i livelli alla pompa negli scenari attuale e Upper, considerando i livelli di attacco e stacco attuali.



Figura 62 Confronto tra i livelli su Collettore Fosse alla confluenza con il canale Caldirolo negli scenari attuale e Upper, considerando i livelli di attacco e stacco attuali.



Figura 63 Confronto tra i livelli della sezione di monte del Collettore Fosse negli scenari attuale e Upper, considerando i livelli di attacco e stacco attuali.

ALTRI BACINI

Gli altri bacini interessati dagli abbassamenti indotti dalla coltivazione dei giacimenti subiscono impatti molto inferiori a quelli della bonifica Mezzano Sud-Est Gramigne, con variazioni delle pendenze dei bacini scolanti irrilevanti. Si può ritenere pertanto che gli idrogrammi di piena calcolati siano validi anche al 2030, pur considerando l' effetto subsidenziale.

La Tabella 8 riporta i massimi abbassamenti che si riscontrano sui canali schematizzati. A parte il canale che drena il bacino Mezzano Nord-Ovest, in cui si hanno abbassamenti massimi dell'ordine dei 5 cm, per tutti gli altri la subsidenza indotta ha impatto praticamente nullo. Sulla scorta dei risultati ottenuti per il bacino Mezzano Sud-Est Gramigne si può affermare che la rete drenante di questi bacini non subirà alcun impatto legato alla coltivazione dei giacimenti. Per la bonifica Mezzano Nord-Ovest potrà essere conveniente riportare i livelli di attacco e stacco delle pompe alla quota assoluta attuale per non modificare il consumo di energia dell'impianto.



| Canale | Upper [cm] | Medio [cm] |
|---|---------------|---------------|
| Mezzano Nord-Ovest | 6 | 5 |
| Bosco | 1 | 1 |
| Principale Valle Isola | 2 | 2 |
| Poazzo | 1 | 1 |
| Taglio Nuovo | 1 | 1 |
| S.Giureppe-Bordighino- Rellina-Cavallina | 1 | 1 |
| Scacchi | 2 | 2 |
| Canalone | 0 | 0 |
| Gattolo | 0 | 0 |
| Sant'Alberto | 1 | 1 |
| Busona | 1 | 1 |
| Pinetale | 2 | 2 |
| Destra Reno | 1 | 1 |

Tabella 8 Massimi abbassamenti per i canali schematizzati nei modelli

PIANO DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA

Le misurazioni a disposizione evidenziano come buona parte del territorio costiero ferrarese/ravennate attorno alle Valli di Comacchio, l'area di possibile impatto della produzione residua del sistema Agosta - Dosso degli Angeli, sia soggetta a fenomeni di subsidenza di entità anche rilevante (fino anche a 15-20 mm/anno). Rilevante è anche la variabilità spaziale degli spostamenti misurati. L'applicazione previsionale del modello geomeccanico di Agosta-Dosso degli Angeli ha calcolato che la subsidenza antropica dovuta alla produzione del sistema dovrebbe raggiungere un valore massimo di 6 mm/anno nel caso più sfavorevole dello scenario "Upper" (Figura 64) nel periodo 2017-2030, un contributo quindi minoritario rispetto ai valori di abbassamento recentemente registrati.

Al fine di tenere sotto controllo l'andamento spazio-temporale della subsidenza, ed in particolare il contributo relativo all'attività di estrazione idrocarburi prevista dal sistema Agosta - Dosso degli Angeli, Eni E&P ha messo in opera un complesso piano di monitoraggio geodinamico integrato; tale piano viene qui analizzato, proponendone eventuali azioni migliorative.



Analisi degli effetti della subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento di idrocarburi denominato Agosta





Est Gauss - Boaga [m]

Attualmente sono disponibili diverse tecniche di monitoraggio della subsidenza (livellazione geometrica di precisione, CGPS, SAR, LIDAR). Data la difficoltà nella previsione accurata del processo e nell'attribuzione alle possibili concause che lo generano, è fortemente consigliato l'utilizzo integrato di tali tecniche, soprattutto nel caso di indagini su aree di vasta estensione (Gambolati et al., 2007).

Nell'ultimo decennio il progresso tecnologico sviluppato consente di ottenere informazioni circa le variazione altimetriche territoriali con ottima accuratezza. Nell'ipotesi di monitorare la subsidenza

Figura 64 Velocità di subsidenza (mm/anno) antropica prevista dal modello geomeccanico del sistema Agosta - Dosso degli Angeli per il periodo 2017-2030 (isolinee). I punti rossi rappresentano la posizione dei PS, ovvero i punti monitorabili con il metodo dell'interferometria SAR utilizzando le immagini del satellite RADARSAT-1.





indotta dalla coltivazione di un giacimento risulta indispensabile acquisire informazioni altimetriche di un'area più vasta rispetto a quella di influenza del campo stesso; in tal modo gli effetti indotti dalla coltivazione possono essere estrapolati dai normali abbassamenti subsidenziali (di origine naturale o antropica) che affliggono l'area. In considerazione del fatto che buona parte delle deformazioni provocate dallo sfruttamento del giacimento si trovano in aree lagunari (Valli di Comacchio) sarà inoltre indispensabile prevedere un monitoraggio che tenga conto anche degli effetti sui fondali. A tale scopo, onde poter acquisire informazioni circa l'altimetria territoriale in un'area vasta, l'uso di un sistema LIDAR (Light Detection And Ranging) consente di ottenere con estrema rapidità informazioni altimetriche sia su aree emerse che sommerse. Si tratta di una tecnica di telerilevamento "attivo", eseguita per mezzo di un aeromobile sul quale è installato un laserscanner composto essenzialmente da un trasmettitore (scanner), un ricevitore (telescopio) ed un sistema di acquisizione dati. Risulta poi di fondamentale importanza poter suddividere le componenti della subsidenza profonda, ovvero quella dovuta alla produzione della giacimento, da quelle superficiali causate da estrazioni d'acqua di falda, carico di strutture sulla superficie del suolo, consolidazione naturale dei depositi più recenti, ossidazione di suoli agricoli ad elevato contenuto organico; ciò può essere eseguito attraverso l'installazione di stazioni assestimetriche che sono in grado di misure la compattazione dei depositi sedimentari più superficiali.

Si descrivono quindi brevemente nei successivi paragrafi le caratteristiche generali di tali tecniche, analizzandone la loro integrazione come proposta nel piano Eni E&P.

Livellazione geometrica

Il monitoraggio della subsidenza viene tradizionalmente svolto ripetendo nel tempo delle campagne di misura eseguite applicando la tecnica di livellazione geometrica di alta precisione. Le tecniche di livellazione sono svariate e si distinguono fra loro sia per la strumentazione utilizzata, sia per i tempi necessari all'esecuzione delle misure, sia soprattutto per le precisioni raggiungibili nella determinazione dei dislivelli.



Figura 65 Livellazione geometrica di alta precisione.

Tra esse la più precisa è la livellazione geometrica di alta precisione nella quale sono utilizzati livelli muniti di micrometro a lamina pian-parallela (o livelli digitali di alta precisione) e stadie in invar (Figura 65).

Con questa metodologia di misura si rende necessario materializzare fisicamente i punti di indagine, che diventano i punti battuti in tutte le successive campagne di livellazione geometrica, volte, queste ultime, alla determinazione dei cedimenti dei punti indagati al variare del tempo e delle condizioni al contorno. In particolare, i punti sono materializzati tramite dei caposaldi di livellazione, ossia elementi metallici dotati di una parte sferica, in modo che l'accoppiamento stadia-caposaldo risulti il più possibile univoco. Attualmente gli strumenti più precisi sono gli autolivelli digitali, che, utilizzati insieme a stadie in invar codificate, permettono di ottenere precisioni pari a 0,4 mm/km (secondo la normativa ISO 1723).

In ottemperanza alle Linee Guida proposte da Gambolati et al. (2007) per ciascun rilievo la differenza di elevazione tra due capisaldi è misurata due volte cumulando la differenza di quota tra una serie di punti temporanei di appoggio collocati tra due capisaldi limitrofi. La livellazione dal mezzo prevede inoltre una distanza di battuta massima pari a 60 metri e linee di mira con altezza dal suolo non inferiore a 0.5 m o superiore ai 2.8 m.

Stazioni GPS permanenti

Per registrare gli spostamenti in continuo di punti di particolare interesse si fa attualmente ricorso a stazioni GPS permanenti. Il sistema consente la determinazione con elevata precisione la posizione (coordinate geografiche e posizione altimetrica) di un caposaldo su cui sia installata un'apposita antenna ricevente (Figura 66).



Figura 66 Stazione GPS in continuo: foto di un'antenna geodetica e andamento tipico della misura ottenuta.

E' importante che ciascuna stazione CGPS sia agganciata ad una rete internazionale di riferimento (EUREF, ITRF2000, ASI, SOPAC) e che i dati siano raccolti contemporaneamente dalla stazione oggetto del monitoraggio e da almeno 4 stazioni di riferimento. Le stazioni installate, inoltre, dovrebbero essere il più possibile conformi alle specifiche (tipo di ricevitore, antenna, calotte protettive, caratteristiche di acquisizione, posizione e scelta del sito, documentazione) necessarie per poter essere incluse nel network di riferimento stesso.

L'istituzione di una stazione CGPS dovrebbe di norma essere prevista nelle immediate vicinanze di capisaldi di riferimento delle reti di livellazione ed almeno una in posizione baricentrica rispetto all'area affetta da subsidenza indotta dallo sfruttamento del giacimento.

Data la rumorosità intrinseca del segnale GPS acquisito, soprattutto sulla componente verticale, è consigliato che la stima di un trend di subsidenza (statisticamente rappresentativo) sia eseguito su un periodo di rilevamento pari almeno a 12 mesi. I dati vengono usualmente elaborati con adeguati software scientifici (per esempio il Bernese) e le coordinate tridimensionali della stazione CGPS vengono ricavate tramite analisi delle soluzioni settimanali.

Interferometria SAR

Nell'ultimo decennio l'utilizzo del radar ad apertura sintetica (SAR) montato su vettori satellitari ha consentito lo sviluppo e l'affinamento dell'analisi interferometrica differenziale (InSAR) e dell'analisi interferometrica su riflettori persistenti (PSI) che si sono dimostrate di estrema efficacia per il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo.



Figura 67 Principio di funzionamento del metodo SAR.

2' acquisizione

1' acquisizione

Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice (Figura 67): un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, scattering). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione. Il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione consente di valutare la distanza a cui si trovano i singoli bersagli radar, cioè di localizzare gli oggetti lungo la direzione della congiungente con l'emettitore, grazie alle caratteristiche di direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar. Quanto più grande è l'antenna, tanto meglio è localizzato il bersaglio. Un modo per ottenere un'antenna equivalente di grandi dimensioni si tecnologia SAR ("Synthetic realizza attraverso la Aperture Radar"), nella quale l'emettitore/ricevitore radar è fatto scorrere lungo un binario di dimensioni variabili da pochi metri a qualche decina di metri. Oltre alla distanza del bersaglio, l'informazione del segnale di ritorno consente di valutare se il bersaglio si è spostato tra un istante e il successivo. Questo tipo d'informazione differenziale, estesa a tutti i punti dell'area illuminata, può essere rappresentato su mappe (interferogrammi) nelle quali vengono rappresentati i movimenti globali dell'area in studio.

Due sono le principali strategie di elaborazione dei dati SAR che possono essere utilizzate:

interferometria differenziale SAR convenzionale (DInSAR): qualora l'area di indagine sia caratterizzata dalla presenza di centri abitati di estensione significativa (sui quali il DInSAR è in grado di fornire l'interpretazione della fase interferometrica), questo tipo di analisi è preferibile in quanto, eseguendo una media dello spostamento all'interno di ciascun pixel dell'immagine radar, viene fornita una risposta rappresentativa dello spostamento a scala





regionale eliminando picchi locali relativi, ad esempio, ad instabilità strutturali. Tecniche di "stacking" su serie di interferogrammi possono essere utilizzate per studiare l'evoluzione temporale degli spostamenti;

analisi su diffusori puntuali persistenti (PSI, Persistent Scatterer Interferometry): la tecnica dei diffusori puntuali è stata inizialmente sviluppata presso il Politecnico di Milano con l'acronimo PS (Permanet Scatterers), ed è ora applicata da altri enti di ricerca e ditte in diverse parti del mondo con acronimi simili, ad esempio IPTA (Interferometric Point Target dalla svizzera Gamma Remote Sensing AG. L'esecuzione Analysis) dell'analisi interferometrica su singoli diffusori particolarmente riflettenti, puntuali (con dimensione inferiore al pixel di acquisizione) e permanenti (sono presenti in tutte le immagini SAR) consente di estendere la metodologia SAR anche ad aree rurali sulle quali sono rilevati gli spostamenti di singole strutture quali fabbricati, tralicci elettrici, ecc. Ne è suggerito l'utilizzo qualora l'obiettivo sia di fornire una mappatura dei fenomeni di deformazione superficiale di territori rurali di elevata estensione. L'approccio PSI richiede comunque che sia presente una densità spaziale di riflettori sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 per km²). Per l'area d'indagine l'insieme dei bersagli può considerarsi una sorta di rete geodetica naturale. Per ogni singolo riflettore si può ricostruire il trend medio di spostamento con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno (l'accuratezza è comunque funzione del numero di immagini e della "qualità" del bersaglio), e l'intera serie temporale di deformazione. L'accuratezza arriva (per i punti migliori) a 1-2 mm su ogni singola misura.

Numerosi sono i satelliti SAR che hanno acquisito immagini radar della superficie terrestre: ERS-1/2 ed ENVISAT (banda C) dell'Agenzia Spaziale Europea e RADARSAT 1 dell'Agenzia Spaziale Canadese caratterizzati da una risoluzione spaziale di 20 m. Attualmente le acquisizioni vengono effettuate dal RADARSAT 2, dal TerraSAR-X e COSMO-SkyMed (banda X), rispettivamente dell'Agenzia Spaziale Canadese, dell'agenzia spaziale Tedesca e Agenzia Spaziale Italiana, caratterizzati da una risoluzione spaziale di 3 m. Il loro utilizzo sta consentendo di monitorare la subsidenza su un numero di bersagli radar superiori di 2 o 3 ordini di grandezza alla numerosità dei capisaldi li livellazione. Le analisi hanno permesso la mappatura dei movimenti del suolo a scala "regionale" (su aree di $100 \times 100 \text{ km}^2$), locale ($10 \times 10 \text{ km}^2$) e puntale a livello delle singole strutture. Ultimo in ordine di tempo è la costellazione SENTINEL formata da due satelliti che hanno come obbiettivo primario il monitoraggio delle terre emerse e degli oceani. Il fine della missione è





quella di acquisire in continuo i dati della banda SAR banda C colmando il ritiro dell'ERS2 e la fine della missione ENVISAT. Il satellite monta un sensore C-SAR che offre un'acquisizione in media e alta risoluzione in ogni condizione climatica. Il sensore C-SAR è capace di ottenere immagini notturne e determinare piccoli movimenti del terreno che risultano di grande interesse per il monitoraggio terrestre.

L'applicazione della metodologia PSI nell'area di studio è risultata alquanto efficace per la presenza di numerose strutture antropiche sul territorio. La mappa di Figura 64 mostra la distribuzione dei riflettori radar individuati con il satellite RADARSAR-1. La copertura del territorio è significativa, soprattutto in corrispondenza alla zona dove è attesa svilupparsi il contributo maggiore alla subsidenza fornito dalla produzione dei giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli. Un numero rilevante di punti PS è ubicato anche all'interno delle Valli di Comacchio. Le sole zone non coperte sono quelle della Bonifica del Mezzano a ovest del dell'elettrodotto (B) di Figura 11 e l'area subito ad ovest della Strada Statale Romea in corrispondenza delle Vene di Bellocchio. Tali aree, secondo il modello matematico, dovrebbero essere interessate dalla subsidenza prodotta dallo sviluppo residuo del sistema e quindi sarebbe utile avere ulteriori punti.

Si deve comunque far presente che con i satelliti di ultima generazione in banda X (TerraSAR-X e COSMO-SkyMed) in modalità di acquisizione "stripmap", la numerosità dei punti PS sarà certamente maggiore, con una copertura quindi del territorio ancora più completa.

Si consideri inoltre che, in aree di particolare interesse e prive riflettori radar, è possibile integrare la rete di punti PS con alcuni riflettori artificiali. Questi sono costituiti da triedri di materiale metallico che, opportunamente fissati al suolo ed orientati nella direzione di illuminazione del satellite, permettono di eseguire l'analisi interferometrica (e quindi ottenere una misura di spostamento) anche in zone prive di strutture antropiche. Recentissime applicazioni su reti di riflettori artificiali nella Laguna di Venezia hanno evidenziato che, per poter eseguire l'analisi interferometrica, la distanza reciproca tra i diversi riflettori artificiali e tra questi e quelli naturali deve essere non superiore a 1-1.5 km (Strozzi et al., 2013).

Lidar

Il sistema LIDAR (Light Detection And Ranging) consente di ottenere con estrema rapidità informazioni altimetriche sia su aree emerse che sommerse. Si tratta di una tecnica di telerilevamento "attivo", eseguita per mezzo di un aeromobile sul quale è installato un laserscanner composto essenzialmente da un trasmettitore (scanner), un ricevitore (telescopio) ed





un sistema di acquisizione dati. L'estrema velocità di acquisizione ne costituisce il principale vantaggio nella caratterizzazione territoriale, mentre la possibilità di misura del tirante d'acqua consente la caratterizzazione batimetrica di aree lagunari e costiere, altrimenti attuabile con tecniche temporalmente molto più dispendiose. L'accuratezza è funzione della quota di volo e compresa nel range 3-30 cm nominali per altitudini di rilievo tra 200 e 3000 metri.

Assestimetri

Gli assestimetri rappresentano ad oggi la metodologia più diffusa per quantificare la compattazione della porzione più superficiale della successione stratigrafica. La profondità di monitoraggio è dell'ordine di qualche centinaia di metri.

Lo strumento (Figura 68) è costituito da un cavo/nastro metallico che, attraverso un foro verticale appositamente realizzato, è ancorato alla profondità di riferimento. In superficie il cavo è accoppiato a un bilanciere che lo mantiene in tensione e registra gli spostamenti. Quando l'intervallo di suolo compreso tra la superficie del terreno e la profondità di ancoraggio dell'assestimetro si compatta, a seguito ad esempio della riduzione del carico piezometrico negli acquiferi per emungimento d'acqua di falda, il bilanciere ruota e misura quindi l'entità della compattazione.

Sottraendo dalla subsidenza totale, misurata con livellazione, stazione GPS o SAR, la compattazione fornita dell'assestimetro si può quantificare la componente profonda della subsidenza, ovvero quella dovuta alla produzione di idrocarburi (più eventuali effetti tettonici e di GIA - Global Isostatic Adjustment).



Figura 68 Principio di funzionamento di una stazione assestimetrica.

Il piano di monitoraggio Eni E&P

Sulla base della presentazione effettuata da Eni E&P il 4 dicembre 2013 a Comacchio, l'attuale piano di monitoraggio geodinamico che la compagnia petrolifera conduce nell'area delle Valli di Comacchio è così composto (Figura 69):

- livellazioni geometriche di alta precisione a cadenza triennale sulla rete riportata in (prossimo survey nel 2014);
- misure GPS in continuo alla stazione di monitoraggio geodinamico di Smarlacca. La stazione GPS è in funzione dal 2002
- monitoraggio assestimetrico-piezometrico in continuo alla stazione di monitoraggio geodinamico di Smarlacca. L'assestimetro è in funzione dal 1997 e misura la compattazione fino alle profondità di 30 e 336 m;
- acquisizione annuale SAR in banda C con immagini dal satellite RADARSAT;
- acquisizione annuale di dati SAR in banda X dal 2012 (Cosmo SkyMed in ascendente e TerraSarX in discendente);





- acquisizione nel 2012 di rilievo LiDAR della costa.



Figura 69 Rete di monitoraggio della subsidenza di Eni E&P nell'area prossima alle Valli di Comacchio .

Proposte migliorative

L'attuale piano di monitoraggio condotto da Eni E&P appare molto completo. Integrando tutte le metodologie oggi a disposizione potrà fornire un controllo dettagliato e affidabile degli spostamenti geodinamici in tutta l'area dove è atteso il contributo alla subsidenza fornito dalla produzione dei campi pozzi. La stazione GPS di Samarlacca, ubicata in posizione baricentrica rispetto alla zona di interesse, costituirà un riferimento accurato per "agganciare" le misure differenziali (livellazione e SAR) fornendo così una quantificazione assoluta degli spostamenti del territorio. Gli assestimetri potranno essere utilizzati per depurare gli spostamenti della superficie dai contributi superficiali, consentendo la stima sufficientemente accurata della componente profonda con cui aggiornare la calibrazione del modello geomeccanico. Si ritengono infine idonei gli intervalli temporali di monitoraggio (3 anni per la livellazione geometrica e 1 anno per il SAR).

Come proposta migliorativa, si possono suggerire i seguenti aspetti:

 il posizionamento di alcuni rifletti artificiali SAR fondati su pali all'interno delle Valli di Comacchio, delle Ancone di Bellocchio e nelle zone ad Ovest del giacimento di Agosta nelle aree dove sono previsti i maggiori valori di subsidenza;



- l'installazione, qualora autorizzata dagli enti competenti, di una stazione permanente GPS su Trepponti di Comacchio, dato che è l'unica struttura di pregio storico-artistico presente sul territorio di studio; tale stazione dovrà poi essere agganciata alla stessa rete internazionale di riferimento utilizzata per la stazione di Smarlacca;
- l'acquisizione dei dati SAR dei nuovi satelliti del sistema SENTINEL: una costellazione in banda C con l'obbiettivo primario di monitorare le terre emerse e gli oceani;
- un monitoraggio batimetrico delle stesse Valli di Comacchio, Ancone di Bellocchio e dei fondali marini prossimi a riva compresi nel tratto di possibile impatto dello sviluppo del campo, per esempio tra Lido delle Nazione e Marina Romea. Qualora la torbidità dell'acqua non consentisse l'utilizzo del Lidar, il rilievo batimetrico potrà essere eseguito attraverso metodologie classiche, tipo multibeam o singlebeam, da definire in corso d'opera.

CONCLUSIONI

E' stata sviluppata una procedura integrata per la valutazione dell'impatto della subsidenza attesa dalla coltivazione di giacimenti a gas naturale sulle strutture ed infrastrutture. Il piano è composto di 5 fasi:

- fase 1: caratterizzazione ambientale del territorio di interesse in relazione al processo subsidenziale oggetto di studio;
- fase 2: quantificazione del fenomeno subsidenziale recente ed in atto;
- fase 3: calcolo degli spostamenti differenziali attesi;
- fase 4: analisi dell'impatto degli spostamenti differenziali a cui saranno soggette le principali infrastrutture;
- fase 5: analisi degli abbassamenti causati dalla subsidenza ai fini del comportamento idrologico-idraulico dei bacini.
- fase 6: predisposizione di un adeguato piano di monitoraggio degli effetti della subsidenza indotti dalla coltivazione dei giacimenti di Agosta e di Dosso degli Angeli.

Il piano è stato applicato al sistema Agosta - Dosso degli Angeli, in particolare in relazione alla subsidenza antropica a seguito dell'atteso sviluppo residuo del campo. Sulla base delle informazioni disponibili alla data, la subsidenza antropica connessa alla coltivazione dei giacimenti





di Agosta e Dosso degli Angeli sarà caratterizzata da un valore massimo pari a circa 8.0 cm nel triennio 2017-2020 e 10.0 cm tra il 2020 ed il 2030 (abbassamento massimo nel periodo 2017-2030 nello scenario "upper" pari a circa 18 cm). Tali valori si collocano all'interno della traccia superficiale del giacimento di Agosta. Al di fuori della traccia del giacimento si determinano valori inferiori che influenzano principalmente l'idrovora "Fosse" e l'argine Agosta. L'analisi specifica condotta per queste opere ha evidenziato che gli abbassamenti sono compatibili con le strutture sia in termini di sicurezza idraulica che di buon funzionamento della rete idraulica e delle opere connesse. In termini di velocità di subsidenza, il valore massimo di 13 mm/anno è di poco inferiore ai tassi annuali mediamente misurati nell'area nell'ultimo decennio.

Sono stati calcolati gli spostamenti differenziali in corrispondenza alle opere più rilevanti (storiche, idrauliche, viarie, industriali) presenti sul territorio. I risultati hanno evidenziato che i valori ottenuti dal modello geomeccanico sono inferiori ai valori limite suggeriti della letteratura tecnica di riferimento per più di un ordine di grandezza, e quindi tali da non provocare danni strutturali alle opere analizzate.

Sono stati successivamente analizzati gli impatti della subsidenza antropica sul comportamento idrologico-idraulico dei bacini. Dalle analisi e dalle simulazioni condotte si è evidenziato che l'impatto dello sfruttamento del sistema Dosso-Agosta risulta praticamente nullo sulla rete drenate dei bacini idrologici coinvolti. Potrebbe essere conveniente, in una seconda fase, riportare i livelli di attacco e stacco delle pompe alla quota assoluta attuale al solo fine di non modificare il consumo di energia dell'impianto.

Infine, è stato analizzato il piano di monitoraggio della subsidenza attualmente utilizzato da Eni E&P. Il piano è composto dall'integrazione di tutte le metodologie di monitoraggio altimetrico oggi a disposizione (livellazioni, GPS in continuo, SAR su satelliti in banda C e X, assestimetri, Lidar) ed è pertanto considerato adeguato al monitoraggio del processo in analisi. Si è infine proposta l'installazione di alcuni riflettori SAR artificiali sia su zone a terra che risultano scoperte dai rilievi SAR (ad esempio a zona ad Ovest del giacimento di Agosta), sia all'interno degli specchi d'acqua della Valli di Comacchio e Vene di Bellocchio, dove sono attesi i maggiori valori di subsidenza antropica. Inoltre, potrebbero essere di completamento una stazione GPS su Trepponti di Comacchio e un monitoraggio batimetrico delle aree vallive interne e dei fondali marini prossimi a riva nell'area antistante il giacimento.





BIBLIOGRAFIA

ARPA Emilia-Romagna. Stato del litorale Emiliano-Romagnolo all'anno 2000. I Quaderni di ARPA, 2000.

Bau' D., Ferronato M., Gambolati G. and Teatini P. Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Geotechnique*, 52(8), pp. 605-616, 2002.

Bitelli G., Bonsignore F., Carbognin L., Ferretti A., Strozzi T., Teatini P., Tosi L. and Vittuari L.. Radar interferometry-based mapping of the present land subsidence along the low-lying northern Adriatic coast of Italy. In: D. Carreón-Freyre et al. (eds.) Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development, IAHS Publication no. pp. 339, 279-286, 2010.

Bitelli G., Bonsignore F., Del Conte S., Novali F., Pellegrino I., Vittuari L., Integreted use of advanced InSAR and GPS data for subsidence monitoring. In: Lollino G., Manconi A., guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F. (eds) Engineering Geology to Society and Territory - Volume 5, Springer, pp. 147-150, 2015.

Bjerrum L., Allowable Settlement of Structures. In: Proc. European Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Weisbaden, Germany, Vol. 3, pp. 135-137, 1963.

Bondesan M., Quadro schematico dell'evoluzione gemorfologica olocenica del territorio compreso tra Adria e Ravenna, In: Atti della Tavola Rotondall Delta del Po, Sezione Geologica, Bologna, pp. 21-36, 1985.

Castiglioni G.B., Bondesan M., Elmi C., Geomorphological mapping of the Po Plian (Italy), with an example in the area of Ravenna. Zeitschr. fur Geomorphologie. N.F., suppl. Bd. 80, pp. 35-44, 1990.

Ferronato M., Gambolati G., Teatini P. and Baù D. Interpretation of radioactive marker measurements to evaluate compaction in the northern Adriatic gas fields. SPE Journal of Reservoir Evaluation and Engineering, 6, pp. 401-411, 2003.

Gambolati G., Teatini P. and Ferronato M. Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetto di sviluppo sostenibile di campi ad olio e gas, T.R. NO. 1/2007, Dept. Mathematical Methods and models for Scientific Applications, University of Padova, 27 pp., 2007.

Hueckel T., Cassiani G., Prevost J. H. and Walters D. A. Field derived compressibility of deep sediments of North Adriatic. In: Proc. of the Seventh International Symposium On Land 89



Subsidence (Sisols2005), Shanghai, China, 2005.

Isamgeo Engineering GmbH. Campi a gas di Dosso degli Angeli e Agosta – Modello predittivo di subsidenza, *Relazione tecnica*, 25 maggio 2015.

Ricceri G. and Soranzo M., An Analysis on Allowable Settlements on Structures. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, pp. 177-188, 1985.

Strozzi T., Teatini P., Tosi L., Wegmuller U. and Werner C. Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 118, pp. 1177-1191, 2013.

Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W. and Gonella M. A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environmental Geology*, 47(6), pp. 831-846, 2005.

U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Hydrologic Modelling System HEC-HMS, *Technical Reference Manual*, March 2000.

U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. River Anaysis System HEC-RAS 4.1, *Hydraulic Reference Manual*, January 2010.

Valpreda E., Valmigli L., Elaborazione delle stratigrafie, relative ai sedimenti Olocenici delle Valli di Comacchio. *ENEA /AMB/MON/AMCOS*, Incarico ENEA n°20026, 1993.

Viggiani C., Fondazioni. Helvelius Edizioni, 565 pp., 2003





APPENDICE

HEC-HMS

Il programma HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) è stato sviluppato a partire dal software HEC-1 Flood Hydrograph, sulla base di più di trenta anni di esperienza nella modellistica idrologica, da parte dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

HMS è un codice ideato per simulare i processi di afflussi e deflussi all'interno di un bacino idrografico, applicabile nelle più generali condizioni geografiche e per diversi problemi di natura idrologica: dalla determinazione dell'onda di piena caratteristica di un corpo idrico in un bacino di notevoli dimensioni, a quella del deflusso relativo a comprensori naturali o urbani di modeste dimensioni. HMS è un modello deterministico, concettuale o empirico (a seconda delle opzioni utilizzate), a parametri concentrati o distribuiti. I principali campi di applicazione di HMS sono i seguenti: previsione di piene, simulazione di oscillazioni di livelli di falda, previsione di magre, analisi afflussi-deflussi per bacini non monitorati, analisi idrologiche generali su bacino, generazione di serie idrologiche di input a sistemi idrici di qualsiasi tipo.

Il codice ricostruisce il ciclo idrologico come descritto dalla Figura 70.



Figura 70 Schematizzazione del processo afflussi-deflussi in HEC-HMS





La rappresentazione fisica delle entità coinvolte nell'implementazione del modello avviene tramite l'utilizzo di elementi idrologici che possono essere connessi tra di loro, quali sottobacini, rami, immissioni, serbatoi, diversioni, sorgenti e pozzi. HMS suddivide la trasformazione afflussi deflussi in quattro fasi distinte:

- Calcolo del volume efficace;
- Determinazione dell'idrogramma per deflusso superficiale;
- Calcolo del deflusso profondo;
- Traslazione dell'onda di piena.

Per ognuna di queste fasi nel calcolo possono essere usate metodologie diverse.

Calcolo del volume efficace

Il calcolo del volume efficace è fatto partendo dal volume di pioggia depurato dalle perdite per infiltrazione ed evapotraspirazione. Negli anni si sono sviluppate varie metodologie per il calcolo del volume efficace, esse possono essere "ad evento" quando prendono in considerazione solamente il deflusso immediatamente conseguente ad un evento meteorico, oppure "continue" quando descrivono l'intero ciclo idrologico. In HMS sono implementate le seguenti:

| - | Initial and costant-rate | evento, parametri concentrati |
|---|-----------------------------|---------------------------------|
| _ | SCS curve number (CN) | evento, parametri concentrati |
| _ | Gridded SCS CN | evento, parametri distribuiti |
| _ | Green and Ampt | evento, parametri distribuiti |
| _ | Deficit and costant rate | continuo, parametri concentrati |
| _ | Soil moisture account (SMA) | continuo, parametri concentrati |
| _ | Gridded SMA | continuo, parametri distribuiti |

I modelli possono essere a parametri concentrati, ogni parametro ha un unico valore all'interno del sottobacino, oppure distribuiti, il sottobacino è suddiviso mediante una griglia a maglie quadrate ed in ogni cella possono variare i valori. Il metodo SMA o gridded SMA rappresenta l'intero ciclo idrologico, permette quindi di effettuare simulazioni anche in periodi senza precipitazioni e quindi





di descrivere le reali condizioni del terreno prima di un evento meteorologico, indispensabili per una corretta valutazione delle piene. Lo schema concettuale del funzionamento del metodo SMA è riportato nella Figura 71.



Figura 71 Schema concettuale dell'algoritmo SMA

Il sottobacino è suddiviso in una serie di serbatoi tra loro collegati:



- Canopy interception storage, rappresenta la parte di precipitazione che si accumula sugli alberi e sulla vegetazione e non raggiunge il suolo.
- Surface depression storage, rappresenta quelle aree di accumulo d'acqua dovuta alle depressioni presenti nel terreno.
- Soil profile storage, rappresenta l'acqua che si accumula nella parte superiore del terreno.
 In ingresso al serbatoio si ha l'acqua di percolazione dalla superficie, in uscita l'acqua che percola verso la falda e l'evapotraspirazione. Il serbatoio è diviso in due: Tension zone storage e Upper zone storage. La Upper zone perde acqua per percolazione e per evapotraspirazione, la Tension zone solo per evapotraspirazione.
- Groundwater storage, rappresenta l'acqua contenuta nella falda, può essere rappresentata da 1 o da 2 serbatoi.

Gli scambi tra serbatoi si hanno per:

- Infiltrazione, acqua che entra nel terreno dalla superficie. L'acqua disponibile per l'infiltrazione deriva dall'acqua che ha superato l'intercettazione fogliare (cioè quando quel serbatoio è pieno) più l'acqua già presente nella superficie del terreno. Il volume che si infiltra in un passo di tempo dipende da: volume disponibile per l'infiltrazione, riempimento del serbatoio (Soil profile) e massima velocità di infiltrazione.
- Percolazione, acqua che dalla zona superficiale del terreno (Soil profile storage) si sposta verso le parti più profonde (Groundwater storage). Il volume che percola dipende dal grado di riempimento del serbatoio sorgente e ricevente. Maggiore è il grado di riempimento del serbatoio sorgente maggiore sarà il volume di percolazione, minore sarà il riempimento del serbatoio ricevente maggiore sarà il volume di percolazione. Il calcolo della percolazione è utilizzato anche per lo scambio tra i due serbatoi che rappresentano la falda.
- Volume di piena, volume che supera la capacità di infiltrazione e forma il deflusso superficiale. Tale volume è trattato dal modulo che determina l'idrogramma per deflusso superficiale.
- Deflusso profondo, è il volume in uscita dalla falda. Tale volume è trattato dal modulo che calcola il deflusso profondo.
- Evapotraspirazione (ET), perdita d'acqua dai serbatoi superficiali. È calclata l'ET





potenziale che viene soddisfatta prima dal Canopy interception, poi dal Surface depression e infine dal Soil profile.

Determinazione dell'idrogramma per deflusso superficiale

L'idrogramma per deflusso superficiale è calcolato a partire dal volume di piena determinato dal modulo descritto al punto precedente. L'idrogramma può essere calcolato con diverse metodologie:

- Idrogramma unitario specificato dall'utente;
- Idrogramma unitario di Clark;
- Idrogramma unitario di Snyder;
- Idrogramma unitario SCS,
- ModClark;
- Approssimazione cinematica.

Come si vede quasi tutti i metodi si basano sul concetto di idrogramma unitario, in cui ogni autore da una formulazione diversa.

Il metodo ModClark è un'evoluzione del metodo dell'idrogramma unitario di Clark. Il metodo originale costruisce l'idrogramma unitario rappresentando due processi di trasformazione della pioggia in eccesso nel formare l'idrogramma:

- Traslazione del volume dal punto di origine al punto di chiusura del bacino;
- Attenuazione della portata dovuta all'accumulo dei volumi all'interno del bacino.

Quest'ultimo processo è calcolato da Clark mediante l'equazione dei serbatoi lineari. Le caratteristiche del bacino sono definite sulla base di un tempo di concentrazione che rappresenta la parte di traslazione e della costante del serbatoio lineare, che rappresenta l'attenuazione.

Nel metodo ModClark il bacino è suddiviso con una griglia quadrata, per ogni cella è definita l'area e la distanza dal punto di chiusura del bacino. Per ogni cella il tempo di concentrazione è calcolato come:





$$t_{cell} = t_c \, \frac{d_{cell}}{d_{max}}$$

dove tcell è il tempo di concentrazione della cella, tc è il tempo di concentrazione del bacino, dcell è la distanza dal punto di chiusura del bacino e dmax è la distanza dal punto di chiusura della cella più distante.

Questo metodo, considerando che l'input di pioggia di ogni cella può essere differenziato, può considerarsi semidistribuito. Il modello, infatti, non considera gli effettivi percorsi fatti dall'acqua all'interno del bacino, ma valuta comunque, anche se solo in forma geometrica, la differenziazione del contributo di parti diverse del bacino.

L'ultimo metodo, di tipo concettuale, non ipotizza empiricamente un idrogramma unitario, ma schematizza il bacino con uno o due versanti definiti come due canali molto larghi il cui input è dato dal volume di piena che confluiscono in un ulteriore canale di sezione e pendenza data. Il metodo risolve l'equazioni del moto nella forma cinematica all'interno dei canali schematizzati in Figura 72.



Figura 72 Rappresentazione di un bacino attraverso l'approssimazione cinematica





Calcolo del deflusso profondo

Il calcolo del contributo della falda può essere fatto con tre metodi:

- Portata costante mensile;
- Recessione esponenziale;
- Serbatoi lineari.

Il metodo dei serbatoi lineari è utilizzabile solamente se la valutazione del volume efficace è fatta con il metodo SMA. Per ogni serbatoio (inteso come volume di stoccaggio) che rappresenta la falda è definita la costante del serbatoio e il numero di serbatoi in cascata che simulano il deflusso dalla falda.

Traslazione dell'onda di piena

L'idrogramma generato da ogni sottobacino può essere sommato a quelli di altri sottobacini, il collegamento tra diversi sottobacini è fatto attraverso elementi canale che traslano gli idrogrammi dai punti di chiusura dei sottobacini al punto di chiusura dell'intero bacino. Questa traslazione può essere fatta con diversi metodi, inoltre possono essere considerati anche altre trasformazioni che avvengono durante la traslazione. La traslazione può essere calcolata con i seguenti metodi:

- Onda cinematica, nel canale sono risolte le equazioni del moto nell'approssimazione cinematica.
- Tempo di ritardo, l'idrogramma viene traslato temporalmente senza nessuna modificazione.
- Modified Puls, viene costruita una scala di deflusso che associa la portata in uscita con il volume immagazzinato nel tratto di canale, relazione che può per esempio essere calcolata con un modello idrodinamico calcolando i profili stazionari per diverse portate.
- Muskingum;
- Muskingum-Cunge standard;
- Muskingum-Cunge a 8 punti, invece di considerare la sezione del canale o circolare definisce la sezione attraverso 8 punti, che consentono di rappresentare una sezione con golene.

Oltre agli elementi canali all'interno di un bacino possono essere definiti anche altri tipi di elementi



che sono collegati agli elementi canale:

- **Confluenze**, permettono di sommare gli idrogrammi provenienti da due differenti canali.
- **Diversioni**, permettono di togliere acqua da un canale e convogliarla in un altro;
- Sorgenti, permettono di assegnare una portata in ingresso nel bacino (per esempio una portata misurata, o proveniente da un altro modello).
- Serbatoi, permettono di simulare laghi o paludi all'interno del bacino.