



PIANO DI BACINO STRALCIO ASSETTO IDROGEOLOGICO DEL DISTRETTO IDROGRAFICO DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE PER LA GESTIONE DEL RISCHIO DA DISSESTI DI NATURA GEOMORFOLOGICA (PAI DISSESTI)



Relazione

MARZO 2024

Sommario

1. Premessa4
2. Inquadramento normativo5
2.1 Dal Progetto di Piano al Piano7
3. Metodologia e criteri adottati11
4. Il territorio del distretto13
5. Il quadro di pericolosità e rischio da dissesti di natura geomorfologica a scala distrettuale15
6. Disciplina di Piano18
Appendice 1 – Riferimenti Bibliografici21
Appendice 2 – Metodologia per la definizione delle aree a suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica di pericolosità elevata (P3b), media (P2b) e moderata (P1)41
Appendice 3 – Metodologia per l'individuazione delle aree interessate da fenomeni di subsidenza del terreno50
Appendice 4 – Prime indicazioni per la valutazione delle condizioni di pericolosità nelle Conoidi detritico- alluvionali e conoidi soggetti a fenomeni di debris-flow55
Appendice 5 - Linee guida per l'utilizzo dei dati di deformazione (PS) derivati da analisi multi-interferometrica di immagini radar satellitari

Alla stesura del PAI "dissesti geomorfologici" hanno contribuito per l'Autorità di bacino

Gaia Checcucci, Marco Alossa, Elena Bartoli, Laura Benvenuti, Maddalena Bini, Marcello Brugioni, Roberta della Casa, Nicola Coscini, Francesco Falaschi, Valentina Francalanci, Danilo Lorenzo, Alberto Mazzali, Giovanni Montini, Catia Ridolfi, Lorenzo Sulli e Iris Vaiarini.

1. Premessa

La riforma della *governance* distrettuale, attuata a far data dal 2016-2017 con la costituzione e l'avvio operativo delle Autorità di bacino distrettuali, ha gettato le basi per il sostanziale perseguimento di importanti ed ambiziosi obiettivi volti, da un lato, alla riduzione del numero di enti - ad iniziare da quelli operanti in materia di acqua e suolo all'interno di uno stesso distretto idrografico – e, dall'altro, alla razionalizzazione delle competenze e alla semplificazione delle filiera decisionale, con l'allocazione univoca delle funzioni pianificatorie e programmatorie in materia di gestione del rischio da alluvione e da dissesti geomorfologici per l'intero territorio distrettuale in capo alle nuove Autorità di bacino e compiti di attuazione e di definizione delle condizioni di gestione del rischio, incardinati a scala sub distrettuale e regionale.

Con l'adozione del nuovo Piano di bacino stralcio Assetto Idrogeologico del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica (in seguito anche PAI dissesti) si arricchisce di un ulteriore importante tassello il quadro pianificatorio alla scala distrettuale che l'Autorità ha implementato sin dal momento della sua istituzione, garantendo il progressivo superamento degli strumenti di pianificazione di bacino elaborati dalle Autorità di bacino *ex lege* 183/1989 nella nuova e omogenea prospettiva distrettuale, prospettiva fondata su un approccio integrato alle tematiche acqua e suolo. Prospettiva quest'ultima che, come previsto dalle direttive comunitarie e come esplicitamente raccomandato a più riprese dalla stessa Corte dei Conti, dovrebbe rappresentare l'ambito spaziale ottimale, quando si pianifica e si programma nel settore della difesa e tutela del suolo, contrasto al dissesto idrogeologico, gestione delle risorse idriche e mitigazione del rischio siccità.

Il nuovo PAI dissesti è un masterplan di settore, al pari del Piano di gestione delle acque (in seguito anche PGA), redatto ai sensi della direttiva 2000/60/CE, e del Piano di gestione del rischio di alluvioni (in seguito anche PGRA), elaborato ai sensi della direttiva 2007/60/CE. Il PAI dissesti ha natura di piano stralcio del più generale piano di bacino distrettuale ed è, ai sensi dell'art. 65 comma 1 del D.lgs. 152/2006, *lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso* in materia di pericolosità e di gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica. La sua adozione è dunque coerente, non solo sul piano formale e procedurale ma anche sostanziale e contenutistico, con il processo pianificatorio che ha portato all'approvazione del secondo aggiornamento del PGA con d.p.c.m. 7 giugno 2023 e del primo aggiornamento del PGRA con d.p.c.m. 1° dicembre 2022.

Si tratta, in tutti e tre i casi, di Piani stralcio di bacino che rappresentano il punto di arrivo di un articolato processo pianificatorio, ma anche un nuovo punto di partenza e una sfida per i prossimi anni. Essi, infatti, non costituiscono l'ennesimo strumento di pianificazione di settore che si stratifica sugli altri previgenti, ma sono un passaggio quanto mai sostanziale e strategico nell'ottica della semplificazione, del consolidamento e della omogeneizzazione a scala distrettuale delle politiche di prevenzione.

Anche per il PAI dissesti, così come per il PGRA, questo comporta da parte delle amministrazioni coinvolte, ed in particolare dell'Autorità di bacino ma anche delle regioni e delle amministrazioni locali, una precisa assunzione di responsabilità nella gestione, nella manutenzione e nel governo del territorio, nella consapevolezza del ruolo sempre più strategico che riveste la pianificazione di bacino nell'ambito delle politiche di prevenzione: per decidere se e dove intervenire e, quindi, per scegliere le misure finalizzate a mitigare e/o gestire il rischio e, conseguentemente, governare, valorizzare e mantenere un territorio è indispensabile disporre di un quadro conoscitivo solido, puntuale e costantemente aggiornato della pericolosità e del rischio da dissesti (alluvioni e frane) a scala di singolo bacino e distrettuale. Questo non può che essere il quadro conoscitivo alla base della pianificazione di bacino elaborata dall'Autorità, che le regioni e le amministrazioni locali devono recepire e integrare nei rispettivi strumenti di governo del territorio, contribuendo poi ad implementarla ed aggiornarla nel rispetto delle reciproche competenze.

Come ha evidenziato la Corte dei Conti in più di un'occasione, le misure e gli interventi contro il dissesto idrogeologico hanno "natura sistemica in considerazione della forte interrelazione tra le diverse cause che producono il dissesto (il consumo di suolo in primis, i cambiamenti climatici, le politiche urbanistiche, ...). Solo l'adozione di una pianificazione pluriennale e intersettoriale, di natura preventiva e strutturale (...) potrà assicurare risultati concreti positivi nella lotta al dissesto" (cfr. deliberazione n. 17 del 31 ottobre 2019, avente ad oggetto "Fondo per la progettazione degli interventi contro il dissesto idrogeologico").

Mappe aggiornate su tutto il distretto in materia di pericolosità e di rischio da dissesti di natura geomorfologica e legende uniche per attuare gli indirizzi e le norme a scala territoriale sono la prima risposta concreta e chiara da mettere sul tavolo con il PAI dissesti, a disposizione delle amministrazioni regionali e locali, ma anche degli stessi cittadini.

Se è vero che senza la conoscenza non si può pianificare bene e gestire efficacemente un territorio e le problematiche ad esso afferenti, è altrettanto vero che la conoscenza per essere utile deve essere condivisa in modo che tutte le istituzioni competenti partano da comuni basi conoscitive e, nel rispetto dei reciproci ruoli, mettano in atto un quadro di azioni coordinate e integrate.

E' questa, dunque, la sfida che attende l'attuazione del PAI dissesti nei prossimi mesi, sin dalla sua adozione: la vera prevenzione si fa con i fatti e con gli atti, si basa sulla conoscenza, richiede una visione complessiva e integrata, presuppone una filiera chiara delle competenze e una programmazione di misure che poggi su un quadro conoscitivo aggiornato. In altri termini tutto ciò che, sul piano della pericolosità e del rischio da dissesti di natura geomorfologica, è contenuto nel presente Piano.

2. Inquadramento normativo

Il Piano di bacino distrettuale è disciplinato, anche dal punto di vista contenutistico, all'art. 65 del <u>D.lgs. n.</u> <u>152/2006</u>, che al comma 8 prevede che lo stesso possa essere redatto e approvato sia per sottobacini che per stralci relativi a settori funzionali. Il PAI dissesti è appunto uno stralcio funzionale del più generale Piano di bacino distrettuale.

Del Piano stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico (PAI) si occupa poi l'art. 67 dello stesso decreto n. 152 che al comma 1 prevede che "nelle more dell'approvazione dei piani di bacino, le Autorità di bacino adottano, ai sensi dell'articolo 65, comma 8, piani stralcio di distretto per l'assetto idrogeologico (PAI), che contengano in particolare l'individuazione delle aree a rischio idrogeologico, la perimetrazione delle aree da sottoporre a misure (...) e la determinazione delle misure medesime".

Ciascun Piano stralcio, ai sensi delle norme sopra richiamate contiene e deve contenere, in particolare, il quadro conoscitivo organizzato ed aggiornato del sistema fisico, l'individuazione e la quantificazione delle situazioni, in atto e potenziali, di degrado del medesimo e le relative cause; le direttive e gli indirizzi, ai quali devono uniformarsi la difesa del suolo, la sistemazione idrogeologica ed idraulica e l'utilizzazione delle acque e dei suoli; l'indicazione delle opere necessarie distinte in funzione dei pericoli (di inondazione e della gravità ed estensione del dissesto o di siccità o di frane, smottamenti e simili); le priorità degli interventi ed il loro organico sviluppo nel tempo, in relazione alla gravità del dissesto. Nello specifico il PAI dissesti deve individuare e perimetrare le aree a rischio e stabilire quali norme e misure si applicano sulle stesse.

Il comma 4 dell'art. 65 del D.lgs. n.152/2006 evidenzia poi che *"le disposizioni del Piano di bacino approvato hanno carattere immediatamente vincolante per le amministrazioni ed enti pubblici, nonché per i soggetti privati, ove trattasi di prescrizioni dichiarate di tale efficacia dallo stesso Piano di bacino. In particolare, i piani e programmi di sviluppo socio-economico e di assetto ed uso del territorio devono essere coordinati, o comunque non in contrasto, con il Piano di bacino approvato". Nei successivi commi è previsto che <i>"entro dodici mesi dall'approvazione del Piano"* le autorità competenti provvedano ad adeguare allo stesso i rispettivi piani territoriali e programmi regionali e che, a tal fine *"le regioni, entro novanta giorni dalla data di pubblicazione del Piano di bacino sui rispettivi Bollettini Ufficiali regionali, emanano ove necessario le disposizioni concernenti l'attuazione del piano stesso nel settore urbanistico. Decorso tale termine, gli enti territorialmente interessati dal Piano di bacino sono comunque tenuti a rispettarne le prescrizioni nel settore urbanistico. Qualora gli enti predetti non provvedano ad adottare i necessari adempimenti relativi ai propri strumenti urbanistici entro sei mesi dalla data di comunicazione delle predette disposizioni, e comunque entro nove mesi dalla pubblicazione dell'approvazione del Piano di bacino, all'adeguamento provvedono d'ufficio le regioni".*

Sul piano procedurale l'adozione e approvazione del piano di bacino e nello specifico del PAI è disciplinata rispettivamente agli articoli 66 e 68. In particolare, l'art. 68 relativamente al PAI prevede che al fine di garantire la *"necessaria coerenza tra pianificazione di distretto e pianificazione territoriale"*, le regioni convochino una conferenza programmatica, articolata per sezioni provinciali, o per altro àmbito territoriale deliberato dalle stesse, alla quale partecipano le province ed i comuni interessati, unitamente alla regione e ad un rappresentante

dell'Autorità di bacino. Inoltre, sempre con riferimento al solo PAI, la norma specifica al comma 1 che "*i progetti di PAI non sono sottoposti a valutazione ambientale strategica (VAS)*" e che siano adottati con le modalità di cui all'articolo 66, quindi nella Conferenza Istituzionale Permanente e approvati con decreto del Presidente del Consiglio dei ministri, con le modalità di cui all'articolo 57, comma 1, lettera a), numero 2) del D.lgs. n. 152/2006.

Nel momento in cui l'Autorità ha avviato il processo pianificatorio del PAI dissesti, si è trovata di fronte a molteplici Piani stralcio, vigenti sui singoli bacini regionali, interregionali e nazionali presenti nel distretto e approvati dalle Autorità di bacino ex lege 183/1989. L'obiettivo primario del nuovo PAI dissesti è stato, sin da subito, quello di uniformare e allineare alla nuova scala distrettuale i PAI in essere, riconducendoli sotto un'unica cornice pianificatoria e, quindi, superandoli definitivamente.

Si elencano di seguito i piani stralcio di assetto idrogeologico (PAI) adottati dalle Autorità di bacino di cui alla legge 183/1989 vigenti all'avvio della riforma della governance nel territorio dei bacini ricadenti nel distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale:

- Piano di bacino stralcio assetto idrogeologico del fiume Arno, approvato con d.p.c.m. 6 maggio 2005;
- Piano di bacino stralcio Assetto Idrogeologico del fiume Serchio 1° aggiornamento, approvato con d.p.c.m. 26 luglio 2013;
- Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino di rilievo regionale Toscana Nord, approvato con delibera di Consiglio Regionale n.11 del 25 gennaio 2005;
- Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino di rilievo regionale Ombrone, approvato con delibera di Consiglio Regionale n. 12 del 25 gennaio 2005;
- Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino di rilievo regionale Toscana Costa, approvato con delibera di Consiglio Regionale n. 13 del 25 gennaio 2005;
- Piano di bacino, stralcio per l'Assetto Idrogeologico del fiume Magra e del Torrente Parmignola", approvato con delibera di Consiglio Regionale 05.07.2006, n. 69 per il territorio toscano e con delibera di Consiglio Regionale 18.07.2006, n. 24 per il territorio ligure;
- Piano di bacino, stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Provincia di Imperia, approvato per ambiti;
- Piano di bacino, stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Provincia di Savona, approvato per ambiti;
- Piano di bacino, stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Provincia di Genova, approvato per ambiti;
- Piano di bacino, stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Provincia di La Spezia, approvato per ambiti;

I Piani stralcio sopra richiamati presentavano differenti impostazioni tecniche e normative, in quanto prodotti da Autorità di bacino diverse, con la conseguenza che sulla stessa tematica risultavano vigenti all'interno del territorio distrettuale quadri conoscitivi e regole anche molto differenziate tra loro, che non erano più giustificabili nell'ottica distrettuale. E' dunque per questo motivo che l'Autorità dell'Appennino Settentrionale, in continuità con quanto già fatto per le problematiche afferenti alla pericolosità idraulica con il PGRA, unica a livello nazionale, ha avviato il percorso pianificatorio di superamento dei vecchi PAI anche per la parte geomorfologica.

2.1 Dal Progetto di Piano al Piano

Con la delibera n. 20 del 20 dicembre 2019 della Conferenza Istituzionale Permanente, l'Autorità aveva adottato il "Progetto di Piano di bacino del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale, stralcio Assetto Idrogeologico per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica relativo al territorio dei bacini del fiume Arno, del fiume Serchio e dei bacini della Toscana" con lo scopo principale di estendere a tutti i territori toscani e umbri del distretto il medesimo quadro conoscitivo, rendendo coerenti ed omogenee tra loro le diverse mappe di pericolosità, definire norme analoghe per tutti i bacini idrografici interamente ricadenti nel territorio toscano e umbro interessati dalla revisione e individuare specifiche procedure univoche di aggiornamento nel tempo del quadro di pericolosità. In ragione della notevole complessità e differenziazione dei criteri che nel tempo hanno portato ai vari PAI ex lege 183/1989, la scelta è stata di procedere per gradualità, affrontando prima i PAI interamente ricadenti nel territorio toscano e umbro, scelta facilitata dal fatto che la porzione umbra del distretto era già integrata nel territorio dell'ex Autorità di bacino dell'Arno. Attraverso le misure di salvaguardia, contestualmente adottate, è stato possibile garantire l'approvazione delle varianti ai PAI vigenti ex lege 183/1989 e al contempo aggiornare in continuo anche il quadro conoscitivo della pericolosità da frana del progetto di PAI frane. Tutto ciò, da un lato ha consentito di procedere da parte degli enti locali con i procedimenti di approvazione degli strumenti di governo del territorio e allo stesso tempo ha garantito un allineamento perfetto tra i vecchi PAI e il nuovo progetto di PAI distrettuale, sia pure all'epoca limitato al solo territorio toscano ed umbro del distretto.

Il percorso pianificatorio avviato nel 2019 è proseguito con l'estensione del progetto di Piano anche agli ex bacini regionali liguri e all'ex bacino interregionale del Magra, giungendo all'adozione, con la deliberazione della Conferenza Istituzionale Permanente <u>n. 28 del 21 dicembre 2022</u>, del "*Progetto di Piano di bacino stralcio Assetto idrogeologico (PAI) del distretto idrografico dell'Appennino settentrionale per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica*" e delle relative misure di salvaguardia, nel cui quadro conoscitivo sono stati recepiti anche i contenuti del Piano di bacino stralcio Assetto Idrogeologico del fiume Serchio 2° aggiornamento, adottato con delibera n. 15 del 18 novembre 2019 della Conferenza Istituzionale Permanente.

Come avvenuto per il progetto di piano adottato nel 2019 relativo al territorio toscano e umbro, anche per il progetto di PAI dissesti a livello distrettuale del dicembre 2022 è stato possibile, attraverso l'adozione delle misure di salvaguardia, garantire l'approvazione delle varianti cartografiche ai PAI vigenti ex lege 183/1989 e contemporaneamente aggiornare in continuo anche il quadro conoscitivo della pericolosità da frana del progetto di piano distrettuale.

In forza di tale misura di salvaguardia, pertanto, tutte le osservazioni che avevano come oggetto una proposta di modifica della mappa di pericolosità del PAI hanno portato all'attivazione di un procedimento ordinario e sono confluite automaticamente nella mappa di pericolosità del PAI, che è pertanto stata portata in adozione già aggiornata. Come è possibile verificare consultando la pagina web dedicata alle <u>modifiche alle Mappe del PAI</u>, al gennaio 2024, facendo riferimento ai procedimenti riguardanti interi territori comunali e modifiche a carattere locale, si contano 36 procedimenti conclusi formalmente con Decreto del Segretario Generale e altri 18 completati in sede istruttoria.

Con la pubblicazione dell'avviso di adozione del Progetto di Piano nella <u>Gazzetta Ufficiale n. 3 del 04.01.2023</u> ha avuto inizio il procedimento pubblico di consultazione e osservazione previsto dall'art. 66 c. 7 del Dlgs 152/2006. Lo stesso avviso è stato pubblicato nel Bollettino Ufficiale Regionale della Liguria (BURL n. 3 del 18.01.2023), Toscana (BURT n. 2 del 11.01.2023) e Umbria (BURU n. 2 del 10.01.2023).

Nel periodo di consultazione sono pervenute un numero relativamente limitato di osservazioni di carattere normativo o comunque volte all'applicazione normativa dei criteri dettati dal progetto di Piano. Tali osservazioni sono state tutte trattate nell'ambito delle Conferenze Programmatiche e fatte proprie nel parere espresso dalle Regioni, quindi nel merito recepite nei documenti di piano.

Appare significativo evidenziare che le osservazioni al progetto di PAI adottato nel dicembre 2022 formulate da parte degli utenti (singoli enti o privati) e riguardanti criteri, metodi o norme della Disciplina, sono state un numero limitato, e che esse sono sostanzialmente riferibili a due precise categorie di problematiche legate ai dissesti di natura geomorfologica: la subsidenza e le attività estrattive. Il limitato numero di tali osservazioni può

essere motivato dal fatto che i territori toscano e umbro del Distretto erano già stati oggetto della precedente fase di presentazione di osservazioni, successiva all'adozione del progetto di PAI nel dicembre 2019, osservazioni che sono state prese in considerazione in fase di redazione del progetto di PAI del dicembre 2022.

Richiedente	Argomento osservazione	Rilevanza per l'ambito territoriale del Distretto			
Comune di Bibbiena (AR)	Gestione applicazione misure di salvaguardia in ambito urbanistico	Tutto il territorio toscano del Distretto			
Comune di Bientina (PI)	Gestione aree subsidenza classificate in P3a	Tutte le aree con fenomeni di subsidenza			
Comune di Framura (SP)	Applicazione normativa PAI liguri per specifica area P4 del comune	Tutto il territorio del Distretto			
Confindustria Liguria	Applicazione normativa attività estrattive nelle aree P3a del PAI	Tutto il territorio del Distretto			
Ordine Geologi della Liguria	Passaggio da aree a suscettibilità dei PAI Liguri alle aree a pericolosità del PAI "dissesti". Riesame della Mappa di pericolosità del PAI.	Tutto il territorio ligure del Distretto			
Privato	Gestione previsione urbanistica in area P4	Locale			
Tabella 1: Sintesi delle osservazioni al Progetto di PAI con rilevanza sulla disciplina e/o su criteri e metodi.					

Le osservazioni riguardanti criteri, metodi o norme della Disciplina sono sintetizzate nella seguente tabella

In linea con la procedura indicata dall'art. 68 commi 1-4 del D.lgs. 152/2006, le Regioni hanno provveduto a convocare le conferenze programmatiche degli enti ricadenti nel territorio regionale ai fini dell'espressione del parere sul progetto di piano. Tutte le sedute sono state accompagnate da un costante lavoro istruttorio in coordinamento con le regioni finalizzato all'esame delle osservazioni pervenute.

Le sedute delle Conferenze Programmatiche ex art.68, c.3 del Dlgs 152/2006 relative alle tre regioni sono state attivate il 16 marzo 2023 e si sono concluse il 31 luglio 2023 secondo il seguente calendario.

REGIONI LIGURIA e TOSCANA per ex bacino interregio- nale MAGRA	16 MARZO 2023
REGIONE LIGURIA plenaria di apertura per ex bacini re- gionali del Distretto	22 MARZO 2023
REGIONE TOSCANA plenaria di apertura per territorio del Distretto in Toscana	16 MAGGIO 2023
REGIONE TOSCANA territoriali per bacini del Distretto in Toscana	Valdarno Centrale - 1° GIUGNO 2023 Valdarno Inferiore - 7 GIUGNO 2023 Toscana Nord - 20 GIUGNO 2023 Toscana Sud - 22 GIUGNO 2023 Valdarno Superiore - 23 GIUGNO 2023
REGIONE UMBRIA plenaria unica per territorio del Di- stretto in Umbria	12 LUGLIO 2023
REGIONE TOSCANA plenaria di chiusura per territorio del Distretto in Toscana	20 LUGLIO 2023
REGIONE LIGURIA plenaria di chiusura per territorio del Distretto in Liguria	31 LUGLIO 2023

Il Parere delle Regioni, propedeutico all'adozione definitiva è stato rilasciato con i seguenti atti.

Regione Liguria	Delibera di Giunta Regionale n. 961 del 06.10.2023
Regione Umbria	Delibera di Giunta Regionale n. 1163 del 08.11.2023
Regione Toscana	Delibera di Giunta Regionale n. 1354 del 20.11.2023

La disponibilità dei pareri regionali ha determinato i tempi dell'istruttoria sulle osservazioni e le relative modifiche che sono state introdotte negli elaborati del progetto di PAI, l'esame in sede di Conferenza Operativa si è svolto nelle sedute del 6 e 13 dicembre 2023 e ha portato ad un parere positivo in linea tecnica.

Il processo complessivo dell'adozione del PAI può essere riassunto con il seguente schema che descrive l'iter complessivo e il dettaglio della fase conclusiva per l'adozione in CIP e la successiva approvazione con dpcm.





Per ricostruire il dettaglio delle modalità e dei criteri che hanno portato al progetto di PAI 2022 a partire dai singoli PAI delle Autorità di Bacino ex L. 183/89, attraverso il progetto di PAI 2019 relativo alla parte toscana del Distretto, si rimanda alle documentazioni di piano adottate e approvate nel corso del tempo, disponibili ai seguenti indirizzi web.

PIANO	Bacino	Risorsa web	
Progetto PAI "dissesti" adottato nel 2022	Tutti	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=11242	
Progetto PAI "dissesti" adottato nel 2019	Arno – Ombrone - Serchio – Toscana Costa - Toscana Nord	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=5734	
PAI Arno approvato	Arno	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3487	
PAI Bacini Regionali Liguri approvati	Regionali Liguri	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3456	
PAI Magra approvato	Magra	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3520	
PAI Serchio approvato	Serchio	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3512	
PAI Bacini Regionali Toscani approvati	Ombrone – Toscana Costa – Toscana Nord	https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3426	
Tabella 2: Riferimenti web dei PAI che hanno concorso alla redazione del PAI "dissesti"			

3. Metodologia e criteri adottati

Come chiarito sopra, il PAI è frutto di un lavoro lungo e articolato, iniziato nel 1999, con la prima stesura del "Piano Straordinario" ex DL 180/98, lavoro che ha sempre preso a riferimento, come previsto dalla normativa, l'atto di indirizzo e coordinamento di cui al <u>dpcm 29 settembre 1998</u>.

Come noto, in tale atto di indirizzo e coordinamento, come riferimento metodologico per la definizione della pericolosità, e quindi del rischio, è stato indicato lo strumento della "Carta inventario dei fenomeni franosi", cioè una banca dati geomorfologica incentrata sulla descrizione, con un livello minimo di informazioni, di fenomeni di dissesto riconducibili alla casistica dei dissesti di origine gravitativa. Tale "Carta inventario" è lo strumento prevalente per la definizione della pericolosità del territorio anche per il PAI "dissesti", infatti, come chiaramente indicato all'art.17 della Disciplina, la banca dati geomorfologica *"costituisce il quadro conoscitivo di riferimento per la definizione della pericolosità da dissesti di natura geomorfologica"* e, in linea di principio, da essa derivano le perimetrazioni delle aree a pericolosità delle classi P4, P3a e P2a.

Per la definizione della pericolosità da dissesti geomorfologici, allo strumento della banca dati geomorfologica si accompagna quello dell'analisi della suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica, secondo i criteri indicati nell'<u>allegato 3</u> della disciplina di Piano e nell'appendice 2 della presente relazione. Il territorio del Distretto non perimetrato e classificato nelle classi P4, P3a e P2a è comunque coperto dalle classi P1, P2b e P3b; queste ultime hanno una diffusione che dipende dalla metodica adottata e dalle conseguenze del riesame delle mappe del PAI intercorso dalla sua prima adozione nel dicembre 2019.

L'attuale *"mappa della pericolosità da dissesti di natura geomorfologica"* del PAI, richiamata all'art.6, comma 1 della Disciplina, è frutto dell'elaborazione di informazioni che derivano sia da banche dati geomorfologiche sia da banche dati della suscettività, sviluppate secondo criteri e metodi che differiscono, in parte, da quelli indicati nell'allegato 3. I criteri e i metodi indicati nell'Allegato 3 costituiscono il riferimento per l'aggiornamento della mappa di pericolosità del PAI a partire dal gennaio 2023; pertanto, la lettura dell'attuale versione della Mappa di pericolosità deve tenere conto del fatto che numerose aree a pericolosità sono state definite prima del 2023 e che dopo tale data è sempre stato applicato il *principio delle approssimazioni successive* (illustrato al paragrafo 1.2.1 dell'allegato 3), che ammette il progressivo miglioramento delle conoscenze e quindi anche della possibilità di non applicare in toto i criteri e i metodi indicati dallo stesso allegato 3.

Per il territorio della regione Liguria, ad esclusione di quello ricadente nel bacino del Magra, è importante sottolineare che, al momento, alla Mappa di pericolosità non è accompagnata una banca dati geomorfologica realizzata secondo le specifiche di cui all'allegato 3, pur essendo disponibili numerose informazioni utili in tal senso.

Bacino	Fonte principale	Copertura suscettibilità classe P3b	Corrispondenza con db geomorfologia PAI per le classi P4, P3a e P2a	Aggiornamento db geomorfologia PAI secondo criteri Allegato 3
Arno	Banca dati geomorfologica (IFFI Arno e poi geomorfologia PAI)	Bassa	Alta	Alto
Regionali Liguri	Pericolosità PAI liguri	Alta	Assente	Assente
Magra	Pericolosità PAI Magra e geomorfologia PAI	Bassa	Media	Medio

In estrema sintesi, è possibile riassumere le fonti delle aree a pericolosità delle classi P4, P3a, P3b e P2a del PAI al gennaio 2024 secondo lo schema seguente.

Bacino	Fonte principale	Copertura suscettibilità classe P3b	Corrispondenza con db geomorfologia PAI per le classi P4, P3a e P2a	Aggiornamento db geomorfologia PAI secondo criteri Allegato 3
Serchio	Banca dati franosità del Serchio ereditata integralmente nella geomorfologia PAI	Bassa	Completa	Basso
Toscana Costa	Pericolosità PAI toscani e geomorfologia PAI	Bassa	Media	Medio
Toscana Ombrone	Pericolosità PAI toscani e geomorfologia PAI	Bassa	Media	Medio
Toscana Nord	Pericolosità PAI toscani e geomorfologia PAI	Bassa	Media	Medio
Tabella 3: coerenza con i criteri PAI "dissesti" per ogni bacino (o UOM) a gennaio 2024				

Dalla tabella è possibile verificare che, allo stato attuale, l'aggiornamento della banca dati geomorfologica secondo criteri dell'Allegato 3 in nessun caso è completo, nemmeno per il bacino dell'Arno, che da tempo applica criteri simili a quelli indicati nell'Allegato stesso.

Per quanto riguarda la banca dati geomorfologica, nel rimandare alla lettura dell'Allegato 3 della Disciplina per il dettaglio dei criteri e metodi presi a riferimento, è opportuno approfondire i criteri adottati nel PAI dissesti per la definizione dello stato di attività, in ragione degli effetti che tale definizione ha sulle classi di pericolosità.

Nei vari bacini (o *Unit of Management*, UoM, secondo la dicitura adottata nel PGA e nel PGRA e prevista dalle Direttive Comunitarie 2000/60 e 2007/60) che costituiscono il Distretto, si è consolidata con il tempo la prassi operativa prevalente di identificare nello stato di attività dei dissesti il discrimine per l'assegnazione della classe di pericolosità, prassi del tutto coerente sia con l'atto di indirizzo di cui al citato DPCM 29.09.98 che con la letteratura scientifica in materia.

L'esperienza operativa maturata in più di vent'anni di sviluppo dei PAI ha però evidenziato che l'applicazione letterale dei criteri indicati dalle <u>raccomandazioni</u> UNESCO WP/WLI (*Working Party on World Landslide Inventory* – *Gruppo di Lavoro per l'Inventario Mondiale delle Frane*) per l'identificazione dello stato di attività presenta un limite pratico che ne impedisce l'efficace applicazione negli strumenti di pianificazione e contrasta con il c.d. *"principio di precauzione"* (recepito nel PAI dissesti al paragrafo 1.2.2 dell'allegato 3) che deve guidare il pianificatore. L'identificazione dello stato *"attivo"* con un movimento che si sia verificato nell'ultimo anno/stagione porta a escludere in prima battuta una serie di casi dei quali è invece stata dimostrata nel tempo l'estrema pericolosità e che le raccomandazioni WP/WLI riferiscono alla condizione *"inattiva - quiescente"*. La casistica dei dissesti *"inattivi quiescenti"* è, infatti, talmente ampia da corrispondere a livelli di gestione del rischio molto diversi tra loro e inapplicabili nella pratica, poiché porterebbe a confondere le situazioni di pericolo reale, da gestire tramite criteri limitanti, con quelle caratterizzate da vari livelli di pericolo soltanto potenziale, da gestire con criteri condizionanti. Inoltre, un'attenta analisi delle evidenze indica che, nella gran parte dei casi, è presente uno stato attivo "ricorrente" che interessa in tutto o in parte l'area in dissesto; diventa pertanto dirimente l'intervallo di tempo al quale fare riferimento per la determinazione dello stato di attività, così come precisato al paragrafo 2.4 dell'allegato 3.

La scelta fatta per il PAI dissesti, illustrata nell'allegato 3 alla Disciplina, è quindi volta a definire il limite tra lo stato *"attivo"* e lo stato *"inattivo"* applicando il principio di precauzione secondo un criterio operativamente applicabile ai fini della pianificazione. Nell'ambito della pianificazione è, infatti, necessario indicare, come livello minimo di prestazione attesa, i casi di dissesto *"attivo"*, in cui sono imposte norme d'uso limitanti, e i casi di

dissesto *"inattivo"*, in cui sono imposte norme d'uso condizionanti, connesse alla permanenza di elementi di potenziale instabilità.

4. Il territorio del distretto

I dati amministrativi del territorio del Distretto possono essere schematicamente riassunti nella seguente tabella, che riporta la suddivisione del Distretto stesso nei vari bacini (o *Unit of Management* – UOM) che lo compongono, indicando, per ciascun bacino, le regioni e i comuni coinvolti.

Bacino (UoM)	Area (kmq)	Suddivisione per Regioni	Comuni interessati (in tutto o in parte)
Arno	9.128	98,3% Toscana (8.976 kmq) 1,7% Umbria (152 kmq)	154 Toscana 7 Umbria
Bacini Regionali Liguri	3.106	100% Liguria	177
Magra	1.717	42% Liguria (724 kmq) 58% Toscana (993 kmq)	30 Liguria 16 Toscana
Ombrone	5.612	100% Toscana	54
Serchio	1.625	100% Toscana	38
Toscana Costa	2.718	100% Toscana	45
Toscana Nord	374	100% Toscana	12
Distretto	24.280	83,6% Toscana (20.298 kmq) 15,8% Liguria (3.830 kmq) 0,6% Umbria (152 kmq)	456 Distretto 260 Toscana 189 Liguria 7 Umbria

Tabella 4: sintesi dei dati di superficie per suddivisione amministrativa



Figura 1: Unit Of Management del Distretto Appennino Settentrionale

Le superfici sono calcolate sulla base della delimitazione del Distretto definita dal <u>Decreto Direttoriale Ministeriale</u> <u>n. 416 del 08.08.2018</u>; i Comuni interessati sono quelli indicati nell'<u>allegato 1</u>. I dati che si riferiscono al totale dei comuni interessati non coincidono con i dati parziali, poiché uno stesso comune può ricadere in più bacini o UOM; inoltre, sono stati conteggiati, per i singoli bacini o UOM, solo i comuni interessati per almeno 1 ettaro.

Nella tabella non sono riportati i dati della parte francese del bacino del F. Roja, bacino internazionale gestito, per le direttive 2000/60 e 2007/60, secondo il *"Protocollo d'Intesa transfrontaliero del fiume Roja e dei suoi affluenti"* del 30 settembre 2013, al quale l'Autorità di Distretto ha aderito con <u>Decreto del Segretario Generale n. 24 del 11.05.2020</u>. In assenza di una direttiva comunitaria in materia di dissesti geomorfologici, il territorio francese del bacino del F. Roja non è oggetto, al momento, di definizione delle aree interessate da pericolosità da dissesti geomorfologici secondo criteri condivisi. Il territorio italiano del bacino (67 kmq su 600 kmq totali), è compreso nell'UoM "Bacini Regionali Liguri".

Dal punto di vista fisiografico, per il Distretto possono essere estrapolati una serie di dati approssimati ma significativi, che aiutano a identificarne le caratteristiche principali.

Caratteristica	Valore	Note	
Aree di pianura o fondovalle	4.784 kmq (19,5% del distretto) 4.173 kmq interessati da PGRA	Inviluppo PGRA ligure e aree PO del PAI in aree di pianura per Toscana e Umbria.	
Aree collinari o montane con pericolosità P1 o maggiore	19.496 kmq (79,6%)	Valore per differenza con aree di pianura. Non tiene conto delle aree PGRA che interessano zone collinari in Liguria.	
Quota massima del Distretto	2.185 m s.l.m.	DTM 1x1 Ministero dell'Ambiente (EPSG 4326). Monte Saccarello in provincia di Imperia nelle Alpi marittime nel punto di confine tra Piemonte e Francia.	
Quota minima del Distretto	- 1,6	CTR 10k Regione Toscana. Pianura pisana - livornese	
Linea di costa	1.287 km	Dato estratto da limiti amministrativi ISTAT Stima da fotointerpretazione: costa bassa 201 km costa alta 1.086 km	
Tabella 5: elementi fisiografici caratteristici del Distretto.			

5. Il quadro di pericolosità e rischio da dissesti di natura geomorfologica a scala distrettuale

Nel territorio del distretto sono individuate quattro classi di *"pericolosità da dissesti di natura geomorfologica"* di cui all'art. 6 della Disciplina di Piano.

La distribuzione della pericolosità del Distretto per le classi più elevate è riassumibile secondo la seguente tabella (aggiornamento pericolosità PAI al gennaio 2024).

Bacino (UoM)	Classe di pericolosità	Superfici totali classi di pericolosità (kmq)	% nel bacino	Numero di aree a pericolosità
A	Р3	1.278,0	14,0%	25.395
Arno	P4	448,5	4,9%	9.530
	Р3	588,3	18,9%	22.564
Bacını Regionali Liguri	Ρ4	53,0	1,7%	4.056
Magra	Р3	167,3	9,7%	8.558
	P4	59,0	3,4%	3.674
Conchin	Р3	426,0	26,2%	19.519
Serchio	Ρ4	75,5	4,7%	6.366
Bacini Regionali Toscani	Р3	1.318,5	15,2%	21.138
	P4	392,7	4,5%	7.765
Distretto	Р3	3778,0	15,4%	97.174
	P4	1028,7	4,2%	31.391
Taballa () dati sintatisi dasarittivi dal livalla di narisalasità dal Distratta a dai singali basini (UAM) nar la				

Tabella 6: dati sintetici descrittivi del livello di pericolosità del Distretto e dei singoli bacini (UoM) per le classi più alte

Nella lettura della tabella sopra riportata si deve tenere presente che ogni bacino o UoM ha un diverso livello di omogeneità di aggiornamento rispetto ai criteri del PAI "dissesti" e quindi i dati relativi alla pericolosità risentono in parte dei diversi criteri adottati nei PAI originali; si riportano di seguito alcune considerazioni di dettaglio.

Per il bacino del Magra si può ritenere plausibile una sottostima delle aree a pericolosità P3, in ragione dell'originale definizione della classe P2 che in parte comprendeva anche dissesti potenzialmente instabili.

Per i bacini regionali liguri è nota una certa differenza di dettaglio nelle varie province che si occupavano della redazione dei PAI regionali; inoltre, alcune categorie di dissesti attivi (le aree a franosità diffusa) sono state classificate in origine come aree P3 in ragione della loro magnitudo più bassa rispetto alle frane in s.s. Tali elementi portano a ritenere che, quanto meno in alcune parti del territorio, le aree P4 e le aree P3 siano sottostimate rispetto agli attuali criteri PAI.

Per il bacino dell'Arno e per i bacini regionali toscani alcune porzioni di territorio presentano evidenti carenze di dati, poiché gli approfondimenti e gli aggiornamenti sono stati prevalentemente agganciati a procedimenti di iniziativa comunale.

Per Il bacino del Serchio, a fronte di un ottimo livello di copertura e di omogeneità dei dati disponibili, deve essere considerato che l'applicazione puntuale dei criteri dell'allegato 3 del PAI "dissesti" è attualmente limitata ad una porzione del territorio.

Valutazioni alla scala di Distretto basate sulla banca dati geomorfologica non sono al momento possibili dato che è in corso di implementazione un database organizzato per la parte ligure.



Figura 2: mappa della pericolosità da dissesti di natura geomorfologica del Distretto

Un indicazione delle condizioni di rischio del Distretto per le classi più elevate è deducibile secondo la seguente tabella (aggiornamento gennaio 2024).

Bacino (o UoM)	Classe di rischio	Superfici totali classe rischio (kmq)	Numero di aree a rischio	
A === 0	R3	59,2	45.134	
Arno	R4	12,6	13.406	
Desini Desienali Lisuri	R3	20,8	10.041	
Bacini Regionali Liguri	R4	1,6	989	
Magra	R3	2,8	1.971	
	R4	1,1	1.107	
Serchio	R3	23,4	21.149	
	R4	3,8	5.670	
	R3	40,2	30.978	
Bacını Regionali Toscanı	R4	9,2	9.259	
Distretto	R3	146,3	109.273	
	R4	28,2	30.431	
Tabella 7: dati sintetici descrittivi del livello di rischio del Distretto e delle singole UOM per le classi più alte				

Per quanto riguarda il rischio, una valutazione rigorosa a scala di Distretto è significativa solo quando è possibile verificare il valore e la vulnerabilità degli elementi a rischio effettivamente presenti; tali dati non sono però disponibili in forma omogenea, completa e sufficientemente aggiornata in alcuna delle varie banche dati ad oggi reperibili. E' comunque possibile elaborare un quadro sintetico che indichi le superfici delle aree delle classi di rischio più elevate e il numero di aree appartenenti a tali classi, tenendo conto che tali aree sono frutto dell'intersezione tra gli elementi poligonali che descrivono i beni esposti e le aree a pericolosità; pertanto, un singolo bene esposto (ad esempio una strada) può comparire più volte all'interno di una stessa area a pericolosità.

6. Disciplina di Piano

Il PAI dissesti rappresenta il primo esempio, a livello nazionale, di PAI distrettuale in materia di dissesti di natura geomorfologica, nel quale sia i criteri tecnici con cui è stato elaborato, che la disciplina trovano applicazione e sono coerenti per tutto il territorio di competenza. Partendo da un impostazione coerente agli altri piani stralcio del Piano di Bacino distrettuale già operativi, quali PGRA e PGA, Il lavoro svolto ha condotto all'elaborazione di una disciplina di piano unica applicabile alla scala distrettuale e al contempo adattabile alle singole realtà regionali attraverso l'emanazione di specifiche disposizioni regionali nel settore urbanistico.

La disciplina del PAI dissesti è articolata in norme e indirizzi ed è integrata da 3 allegati:

- <u>Allegato 1</u>, che contiene l'elenco delle regioni, delle province, delle città metropolitane e dei comuni ricadenti nel distretto dell'Appennino settentrionale;
- <u>Allegato 2</u>, relativo ai criteri di rappresentazione ed interpretazione delle mappe del PAI dissesti, modalità di visualizzazione ed accessibilità dei dati;
- <u>Allegato 3</u>, contenente le modalità di redazione delle proposte di redazione delle mappe del PAI dissesti e delle proposte di riesame.

La disciplina ha recepito gran parte delle osservazioni normative pervenute nel periodo di consultazione. Risultano altresì in gran parte recepite le osservazioni e raccomandazioni contenute nei pareri delle conferenze programmatiche della Regione Toscana e della Regione Liguria, che sono state valutate attraverso un'accurata istruttoria esplicitata in sede di Conferenza Operativa; negli specifici documenti di seguito richiamati per ogni osservazione riportata nel parere regionale vengono dettagliate le controdeduzioni dell'Autorità.

- <u>Schema sintetico istruttoria ed indicazioni recepimento osservazioni parere Conferenza Programmatica</u> <u>Regione Liguria.</u>
- <u>Schema sintetico istruttoria ed indicazioni recepimento raccomandazioni parere Conferenza</u> <u>Programmatica Regione Toscana.</u>

La Regione Umbria nel formulare il suo parere non ha ritenuto necessario dare indicazioni di modifiche o integrazioni alla disciplina.

Rispetto alla versione del progetto di piano adottata, particolare attenzione è stata posta nella revisione dell'art. 5 in cui sono state aggiornate e riviste le definizioni per renderle più chiare e strettamente coordinate con il contenuto delle norme e degli allegati scopo di facilitarne l'applicazione. A tal fine, in particolare, il concetto di "nuove opere pubbliche e di interesse pubblico, riferite ai servizi essenziali" nell'ambito della gestione del rischio, ai fini del divieto di previsione nelle aree a pericolosità molto elevata (P4) di cui all'art. 8 comma 1 lettera a) delle norme, sarà da intendersi valutando la sostanza e la funzione del servizio pubblico essenziale e sarà esplicitato in specifiche linee guida, che saranno adottate successivamente all'adozione del PAI.

Sulla scorta delle osservazioni contenute nei pareri regionali sono state apportate modifiche puntuali e sostanziali a numerosi articoli, in particolare a quelli inerenti le norme e gli indirizzi nelle aree a pericolosità molto elevata (artt. 7 e 8) e elevata (artt. 9, 10 e 11) e le procedure di modifica delle Mappe del PAI dissesti (art. 15). Inoltre, è stato sostanzialmente modificato anche l'Allegato 3 che è stato riorganizzato nel contenuto, per maggiore chiarezza e linearità operativa, in coerenza con quanto emerso nella fase istruttoria dei numerosi procedimenti di riesame delle mappe PAI dissesti.

La disciplina del Piano recepisce i principi che hanno improntato la riforma della governance distrettuale, in ordine alla razionalizzazione delle competenze e alla semplificazione della filiera decisionale e si basa pertanto su una netta distinzione di competenze e di ruoli: alle Autorità distrettuali è attribuita la competenza sul quadro conoscitivo della pericolosità da dissesti di natura geomorfologica e le indicazioni di norme e indirizzi per la gestione del rischio, alle Regioni l'attuazione della gestione del rischio, sempre in coerenza con gli obiettivi e le finalità del PAI. Estrapolando l'inquadramento proposto dalla Regione Toscana nel suo parere della Conferenza programmatica è possibile sintetizzare il quadro delle competenze nel seguente schema.

	Attività	Competenza
QUADRO CONOSCITIVO	Definizione quadro conoscitivo per le condizioni di pericolosità del territorio	Autorità di bacino
DIANIEICAZIONE	Norme e Indirizzi per gestione del rischio	Autorità di bacino
	Disciplina sulle condizioni di gestione del rischio	Regioni
PROGRAMMAZIONE	Pianificazione urbanistica	Regioni
	Controllo indagini geologiche	Città metropolitane/Province
	degli strumenti urbanistici	Comuni
	Programma delle misure	
	Piani e programmi in materia di difesa del suolo	Autorità di bacino e Regioni
	Attuazione delle misure di	Comuni, Province.
ATTUAZIONE E CONTROLLO MISURE	mitigazione	Consorzi, Regione
	Valutazione dell'efficacia della	Regione
	progettazione e monitoraggio dell'attuazione delle misure	Autorità di bacino

Secondo lo schema proposto sopra è possibile individuare i seguenti riferimenti nella disciplina del PAI dissesti

	Attività	Articoli
QUADRO CONOSCITIVO	Definizione quadro conoscitivo per le condizioni di pericolosità del territorio	6, 15 e 17
PIANIFICAZIONE	Norme e Indirizzi per gestione del rischio	7-13, 16, 18 e 19
PROGRAMMAZIONE	Programma delle misure	21
ATTUAZIONE E CONTROLLO MISURE	Valutazione dell'efficacia della progettazione e monitoraggio dell'attuazione delle misure	20 e 21

Nel rispetto del nuovo riparto delle competenze delineato dalla riforma, ai sensi della nuova disciplina di piano artt.7, 9, 10 e 21, l'Autorità si esprime sulle misure di protezione tese alla riduzione della pericolosità delle aree classificate P4 e P3, con conseguente riesame del quadro conoscitivo e dei suoi effetti sulle mappe di pericolosità. Per le aree P4 e P3a obiettivo della disciplina è quindi valutare gli effetti degli interventi di protezione sulla pericolosità nel rispetto delle finalità del PAI, stabilendo se vi sono le condizioni per una riduzione della classe di pericolosità o, nel caso queste non siano raggiunte, se la misura ha valore di stralcio funzionale che agendo sulla pericolosità concorre alla mitigazione del rischio. Per le aree P3b invece l'obiettivo è valutare solo quelle misure di protezione che raggiungono le condizioni per raggiungere un livello di pericolosità medio o moderato.

Si evidenzia come il parere dell'Autorità di bacino previsto agli art.7, 9, 10 e 21 concorre al procedimento di aggiornamento del quadro conoscitivo disciplinato dall'art.15, alla redazione del programma delle misure di cui all'art.21 e all'attuazione del monitoraggio degli interventi così come previsto all'art. 63 comma 8 lettera f) del d.lgs 152/06.

I contenuti del parere dell'Autorità sono dettagliati all'art. 20 che specifica che il parere è finalizzato ad attestare la congruenza delle misure di protezione con gli obiettivi del PAI dissesti. Spetta invece alla competenza regionale la disciplina delle condizioni di "gestione del rischio" in ambito urbanistico, sulla base del quadro conoscitivo e degli indirizzi definiti dall'Autorità di bacino distrettuale. In particolare, negli artt. 7,8, 9, 10 e 11 si prevede che nelle aree a pericolosità le Regioni disciplinino le condizioni di gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica emanando le disposizioni concernenti l'attuazione del Piano nelle materie di propria competenza. Il concetto di gestione del rischio su cui già si basava il progetto di piano è stato ampliato e specificato, in linea con gli indirizzi contenuti nelle più recenti direttive della Protezione civile. Ai sensi dell'art. 5 delle norme di piano relativo alle definizioni, *"la gestione del rischio si attua attraverso la realizzazione di misure di prevenzione, protezione, preparazione e risposta e ripristino volte a ridurre le potenziali conseguenze negative, derivanti da dissesti di natura geomorfologica, per gli elementi a rischio. La gestione può essere, pertanto, attuata attraverso la realizzazione di misure tese a ridurre la pericolosità e/o la vulnerabilità e/o l'entità degli elementi a rischio, anche mediante azioni di difesa locale e piani di gestione collegati alla pianificazione di protezione civile."*

In analogia con il PGRA, anche nel PAI dissesti, è stata inserita una norma che disciplina le procedure per l'aggiornamento e la modifica delle mappe del PAI individuate nell'ambito del programma annuale definito dall'Autorità, prevedendo la pubblicazione ai fini di consultazione e osservazione pubblica per 30 giorni sul sito internet delle singole proposte di riesame e modifica e la successiva approvazione con decreto del Segretario Generale a seguito dell'istruttoria delle osservazioni pervenute (art. 15 commi 1 e 2). Al fine di assicurare la coerenza dei quadri conoscitivi redatti a scala locale con il quadro di pericolosità definito dal PAI dissesti, l'attività di riesame delle mappe può essere svolta anche dalle Regioni, dalle Province e dai Comuni secondo quanto previsto da appositi accordi tra Regioni e Autorità che disciplineranno i casi di riesame e le modalità di raccordo e coordinamento tra gli enti, anche attraverso l'attivazione di tavoli tecnici con le singole regioni per l'esame degli aggiornamenti (art. 15 comma 3).

Come per PGA e PGRA con l'art.21 è disciplinata la redazione di un programma coerente delle misure, sviluppato in coordinamento con le attività regionali e nazionali e con le attività di aggiornamento del quadro conoscitivo (art.15) e di monitoraggio di attuazione degli interventi.

L'integrazione del PAI nella pianificazione comunale e di protezione civile, garantendo un quadro conoscitivo coerente su tutto il territorio distrettuale, risulta fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi del PAI dissesti. Tale attività, come specificato all'art. 1 della stessa disciplina, è finalizzata all'individuazione di misure strutturali e non strutturali, tese alla mitigazione del rischio, coerenti con il quadro conoscitivo della pericolosità e del rischio, in coordinamento con le strategie nazionali di adattamento ai cambiamenti climatici e con le direttive emanate in materia di protezione civile e in coerenza con gli obiettivi specifici fissati dal PGRA e dal PGA.

Appendice 1 – Riferimenti Bibliografici

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Autori vari	Progetto IFFI – Allegato 1. Guida alla Compilazione della Scheda Frane IFFI	2001	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	https:// www.progettoiffi.isprambi ente.it/wp-content/ uploads/2020/01/ Allegato_1.pdf
Autori vari	Progetto IFFI - Allegato tecnico Convenzione 2004-05	2005	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	https:// www.progettoiffi.isprambi ente.it/wp-content/ uploads/2020/01/ Allegato_Tecnico_Conv_ 05.pdf
Autori vari	Atlante delle opere di sistemazione costiera. Manuali e Linee guida 44/2007	2007	ΑΡΑΤ	https:// www.isprambiente.gov.it/ it/pubblicazioni/manuali- e-linee-guida/atlante- delle-opere-di- sistemazione-costiera
Autori vari	Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato	2009	2° Workshop internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato"	Link ISPRA

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Autori vari	I sinkholes: metodologie d'indagine, ricerca storica, sistemi di monitoraggio e tecniche d'intervento	2013	Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia vol. 93/2013	Link ISPRA
Autori vari	Linee guida per la valutazione del dissesto idrogeologico e la sua mitigazione attraverso misure e interventi in campo agricolo e forestale	2013	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	https:// www.isprambiente.gov.it/ files/pubblicazioni/ manuali-lineeguida/ MLG_85_2013.pdf
Autori vari	Voragini in Italia. I sinkholes e le cavità sotterranee: ricerca storica, metodi di studio e d'intervento	2015	Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia vol. 99/2015	Link ISPRA
Autori vari	Decreto Dirigenziale n.4505 del 10.04.2017 - Specifiche tecniche per la strutturazione, la codifica e l'acquisizione in formato digitale delle cartografie della banca dati geomorfologica della regione Toscana	2017	Regione Toscana	http:// www301.regione.toscana. it/bancadati/atti/ DettaglioAttiD.xml? codprat=2017AD0000000 4917
Autori vari	Aggiornamento ed integrazioni delle linee guida della carta geomorfologica d'italia alla scala 1:50.000 e banca dati geomorfologica	2021	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale	https:// www.isprambiente.gov.it/ it/pubblicazioni/periodici- tecnici/i-quaderni-serie- iii-del-sgi/quaderno-13- fascicolo-1.pdf

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Autorità di bacino del fiume Arno	Progetto di Piano di bacino Stralcio "Bilancio idrico"	2008	Delibera di Comitato Istituzionale n. 204 del 28 febbraio 2008	
Autorità di Bacino di Rilievo Regionale Liguria	Criteri per l'elaborazione dei Piani di Bacino Raccomandazione 3 bis. Legende per: carta geolitologica carta dell'orientamento dei versanti carta dell'acclività dei versanti carta idrogeologica carta geomorfologica	1999	Regione Liguria	https:// www.regione.liguria.it/ components/ com_publiccompetitions/ includes/download.php? id=44930:raccomandazion e-3-bis-1995.pdf
Autorità di Bacino di Rilievo Regionale Liguria	Criteri per l'elaborazione dei Piani di Bacino Linea Guida n. 2 Indicazioni metodologiche per la redazione della carta di suscettività al dissesto dei versanti	2000	Regione Liguria	https:// www.regione.liguria.it/ components/ com_publiccompetitions/ includes/download.php? id=44939:linea-guida-2- 2000.pdf
Baoyuan X., Lixian W., Zhong Z., Guosheng W.	Torrent classification and mapping of hazard zones in mountain area of Beijing	1994	Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, Tokio, Japan, October, 513-520.	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Baoyuan X., Lixian W., Zhong Z., Guosheng W.	Torrent classification and mapping of hazard zones in mountain area of Beijing	1994	Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, Tokio, Japan, October, 513-520.	
Bernardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.	A New Algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms	2002	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 40: 2375-2383	
Bock Y., Wdowinsky S., Ferretti A., Novali F. & Fumagalli A.	Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar	2012	Geochemestry Geophysics Geosystems. 13 (1)	
Bonforte A., Guglielmino F., Coltelli M., Ferretti A. & Pugliesi G.	Structural assessmen of Mt. Etna volcano from Permanent Scatterers analysis	2011	Geophysical Research. 12 (2)	
Borselli L.	SSAP 2010 – Reference Manual	2023	Www.ssap.eu	https://www.ssap.eu/ manualessap2010.pdf
Brugioni M., Mazzanti B., Montini G. & Sulli L.	Use of SAR interferometry for landslide analysis in the Arno river basin	2010	Landslide Science and Practice. 3: 203-210. HEIDELBERG-BERLIN- NEW YORK: Springer Verlag Inc., ISBN 978-3- 642-31309-7.	
Brugioni M., Mazzanti B., Montini G., Sulli L.	Use of SAR interferometry for landslide analysis in the Arno river basin	2011	Atti del "Second World Landslide Forum", Roma, 3-7 ottobre 2011	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Brugioni M., Menduni G., Montini G.	Lo studio del bacino dell'Arno con interferometria satellitare PSInSAR	2008	Supplemento speciale "Subsidenza" in ARPA Rivista n. 1, gennaio- febbraio 2008. Regione Emilia-Romagna	
Bruschi A.	Meccanica delle rocce nella pratica geologica ed ingegneristica	2004	Dario Flacovio Editore	
Buchignani V. et al.	Analisi sulla predisposizione al dissesto sinkhole nella Conca di Camaiore (LU), di supporto all'aggiornamento del P.A.I. ed alla pianificazione urbanistica	2015	Mem. Descr. Carta Geol. D'lt. XCIX (2015), pp. 81 - 100	
Canuti P. et al.	Land subsidence in the Arno river basin studied through SAR interferometry	2005b	Proc. of SISOLS 2005, 7th International Symposium on Land Subsidence. Shangai, China, 23-28 ottobre 2005, 1: 407-416	
Canuti P. et al. (a cura di)	Atlante dei Centri Abitati Instabili della Toscana	2000	CNR – GNDCI – Progetto SCAI	
Canuti P., Casagli N., Catani F., Farina P.	Landslide hazard mapping at a basin scale using remote-sensing data and neural networks	2005a	4th International Symposium on Landslides Risk Mitigation and Protection of Cultural and Naturale Heritage. Kyoto, 15-16 January 2005. (ICL).	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Carbognin I. et al. (edited)	Land Subsidence	2000	Proceedings of the sith international symposium on land subsidence. Ravenna 2000. 2 volumi	
Carter M. & Bentley S.P.	The geometry of slip surfaces beneath landslides: predictions from surface measurements	1985	Canadian Geotechnical Journal, 22, 234-238	
Casagli N., Corazza A., Del Conte S., Ferretti A., Proietti C.	Contribution of permanent scatterers to the analysis of subsidence in urban area	2008	Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03536, EGU 4th General Assembly 2008, Wien, Austria, April 13-18, 2008	
Casale R. e Margottini C.	Floods and Landslides – Integrated Risk Assessment	1999	Springer	
Cascini L., Fornaro G. & Peduto D.	Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales	2010	Engineering Geology, v.112 (1-4), pp. 29-42	
Castiglioni G.B.	Geomorfologia	1986	UTET	
Cavalli M., Macchi G., Monegato G., Crema S., Marchi L. e De Fanti B.et al.	Analisi geomorfologica per il riconoscimento e la determinazione dei volumi mobilizzabili delle colate detritiche - WP4	2022(?)	Progetto Interreg SedInOut – CNR IRPI	https://doi.org/10.5281/ zenodo.7524841

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Church M. E Jakob M.	What Is a Debris Flood?	2020	Water Resources Research, 56	https://doi.org/ 10.1029/2020WR027144
Colesanti C. & Wasowski J.	Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides	2004	Proceeding of the ninth International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 28 june – 2 july 2004. 1: 795-802	
Colesanti C. & Wasowski J.	Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry	2006	Engineering Geology. 88: 173-199	
Colesanti C. & Wasowski J.	Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry	2006	Engineering Geology 88 (2006) 173-199	
Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C. & Rocca	SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique	2003	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 41: 1685-1700	
Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F.	Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique	2003b	Engineering Geology, 68 (2003), 3-14	
Colesanti C., Locatelli R. & Novali F.	Ground deformation monitoring exploiting SAR Permanent Scatterers	2002	Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 24-28 June 2002. Toronto, Canada. 2: 1219-1221	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Colesanti C., Locatelli R. & Novali F.	Ground deformation monitoring exploiting SAR Permanent Scatterers	2002	Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 24-28 June 2002. Toronto, Canada. 2: 1219-1221	
Colombo D., Farina P., Moretti S., Nico G. & Prati C.	Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry	2003	Proceedings of IGARSS 2003, 21-25 July 2003. Tolouse, France. 1-3	
Costantini M., Falco S., Malvarosa F. & Minati F.	A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images	2008	Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 7-11 July 2008. Boston MA. pp. 449-452	
Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. & Trill F.	Method of Persistent Scatterers Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry	2009	Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 12-17 July 2009. Cape Town, South Africa	
Cruden D.M. e Varnes D.J.	Landslide types and processes.	1996	Chap 3 in Landslide: Investigation and Mitigation pag. 36-75	Link ResearchGate
Cruden D.M. e Varnes D.J.	Landslide types and processes.	2004	USGS Fact Sheet 2004- 3072	https://pubs.usgs.gov/fs/ 2004/3072/

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Cruden, D.M.	The geometry of slip surfaces beneath landslides: predictions from surface measurements: Discussion	1986	Canadian Geotechnical Journal, 23, 94	
D'Agostino V.	Scritti dedicati a Giovanni Tournon, Associazione Italiana di Ingegneria Agraria	1996	Associazione Idrotecnica Italiana – Giugno 1996 pp. 111-123	
D'Agostino V., Cerato M., Coali R.	Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del trentino Orientale	1996	Atti del Convegno Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Band 1, pp.377-386	
Dei Cas L., Trigila A., Iadanza C. (eds)	Linee Guida per il monitoraggio delle frane	2021	Linee Guida SNPA 32/2021	Link SNPA
Ercoli A, Montini G. e Sulli L.	Guida Pratica per l'individuazione, la classificazione, la rappresentazione e la gestione degli elementi geomorfologici applicati alla pianificazione territoriale	2005	Autorità di Bacino del Fiume Arno - Ordine dei Geologi della Toscana	
Farina P., Casagli N., Ferretti A.	Radar-interpretation of In-SAR measurements for landslide investigation in civil protection practices	2007	First North American Landslide Conference, June 3-8, 2007. Vail, Colorado	
Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Gontier E., Moretti S.	Integration of permanent scatterers analysis and high resolution optical images within landslide risk analysis	2003	FRINGE 2003, Frascati, 1- 8	
Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F. & Moretti S.	Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project	2006	Engineering Geology, 88: 200-217 pp	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Ferretti A. & Hanssen R.	Deformation monitoring by satellite radar interferometry	2002	GIM International, The Worldwide Magazine for Geomatics. 16 (9): 52-57	
Ferretti A. et al.	Permanent Scatterers technology: a powerful state of the art tool for historic and future monitoring of landslides and other terrain instability phenomena	2005	Proc. of 2005 International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada	
Ferretti A. et al.	Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation	2007	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (5): 1142- 1153 pp.	
Ferretti A. et al.	A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR	2011	IEEE TGRS 49 (9), 3460- 3470	
Ferretti A., Prati C. & Rocca F.	Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach	1999	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 37 (2): 705-715	
Ferretti A., Prati C. & Rocca F.	Permanent Scatterers InSAR Interferometry	2001	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 39 (1)	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Ferretti A., Prati C., Rocca F.	Measuring subsidence with SAR interferometry: applications of the permanent scatterers technique	2000	Proceedings of the sixth International Symposium on Land Subsidence. Vol 2, SISOLS 2000, 24-29 Settembre 2000, Ravenna, 67-79	
Froldi P.	Dissesto idrogeologico e stabilità dei versanti. Consolidamento dei pendii con palificate. Analisi e progettazione	2015	Maggioli editore. Geotecnica	
Gantenbein C.	Creating Shaded Relief for Geologic Mapping using Multiple Light Sources	2012	Digital Mapping Techniques '10— Workshop Proceedings" U.S. Geological Survey Open-File Report 2012– 1171 http://pubs.usgs.gov/of/ 2012/1171/	https://pubs.usgs.gov/of/ 2012/1171/pdf/ usgs_of2012-1171- Gantenbein_p101-106.pdf
Giani G.P.	Caduta Massi – Analisi del moto ed opere di protezione	1997	Argomenti di Ingegneria Geotecnica - Helvelius Edizioni	
Gibson S e Sanchez A.	HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual – Version 6.0	2020	US Army Corps of Engineers	Link USACE
Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero	Studi Costieri n. 22/2014	2014	GNRAC	https://www.gnrac.it/it/ rivista/22/dettaglio

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Hanssen R. F.	Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)	2001	Springer Science & Business Media	
Heidemann H.K	Lidar Base Specification ver 1.3.	2018	U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, chap. B4, 101 p.	<u>https://doi.org/10.3133/t</u> <u>m11b4</u>
Hilley G., Bürgmann R., Ferretti A., Novali F. & Rocca F.	Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis	2004	Science, 304 (5679): 1952-1955	
Hilley G.E, Burgmann R., Ferretti A., Novali F., Rocca F.	Dynamics of slow-moving landslides from Permanent Scatterer analysis	2004	Science, 304 (5679), 1952-1955	
Holfe B. e Rutzinger M.	Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective	2011	Zeitschrift für Geomorphologie Vol. 55, Suppl. 2, 1–29	Link ResearchGate
Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L.	The Varnes classification of landslide types, an update.	2014	Landslides 11 , 167–194	Link ResearcGate
La Rosa A. et al.	Growth of a sinkhole in a seismic zone of the northern Apennines (Italy)	2018	Nat. Hazards Earth System Science	https:// nhess.copernicus.org/ articles/18/2355/2018/
Lin X. et al.	Detectability of Repeated Airborne Laser Scanning for Mountain Landslide Monitoring	2018	MDPI - Geosciences 2018, 8, 469	https://www.mdpi.com/ 2076-3263/8/12/469

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
M. Marchetti	Geomorfologia Fluviale	2000	Pitagora Editrice Bologna	
Manunta P. et al.	SLAM, a Service for LAndslide Monitoring based on EO-Data	2003	Fringe 2003, Frascati 1-5 dicembre	
Marchi L. & Brochot S.	Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises	2000	Révue de Géographie Alpine, n°3/2000, 23-28.	
Marchi L. & Tecca P.R.,	Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane	1999	Edizione GEAM, Difesa del Suolo, n°2-3, 1996, 79-86.	
Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R.	Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps	1993	Z. Geomorph. N. F., 37, 447-458.	
Massonnet D. & Feigl K.L.	Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface	1998	Rev. Geophys., 36. 441- 500	
Meisina C. et al.	Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation	2007	Quaternary International. 171-172: 90-107	
Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J.	Ground deformations monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: the example of Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)	2006	Engineering Geology, 88: 240-259	
Melton M.A.	The geomorphic and paleoclimate significance of alluvial deposits in Southern Arizona	1965	Journal of Geology 73, 1- 38.	http://dx.doi.org/ 10.1086/627044

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio - Regioni	Linee Guida Nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici	2018	Documento elaborato dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera MATTM-Regioni con il coordinamento tecnico di ISPRA	http:// www.erosionecostiera.isp rambiente.it/files/linee- guida-nazionali/ TNEC_LineeGuidaerosione costiera_2018.pdf
Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare	Linee guida per l'analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici. Versione 1.0	2009	Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale, Lotto 2	
Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti	Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».	2018	Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20.02.2018 – Suppl. Ordinario n.8	https:// www.gazzettaufficiale.it/ eli/gu/2018/02/20/42/so/ 8/sg/pdf
Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti	Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 CSLLPP - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.	2019	Gazzetta Ufficiale n. 35 del 11.02.2019 – Suppl. Ordinario n.5	https:// www.gazzettaufficiale.it/ eli/gu/2019/02/11/35/so/ 5/sg/pdf
Montini G., Brugioni M., Consumi F.	Valutazione degli effetti della variazione delle riserve idriche sotterranee sulle velocità di subsidenza nella pianura di Prato (PO) durante il periodo 1992-2010	2012	Geologia Tecnica e Ambientale. 3: 22-34	
Montini G., Mazzanti B., Brugioni M.	Utilizzo dell'interferometria radar satellitare per la gestione delle risorse idriche sotterranee nel bacino del fiume Arno	2016	Il Geologo- Anno XXVI n. 100. Luglio 2016	
Munafò M. (a cura di)	Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici.	2023	Report SNPA 37/2023	Link SNPA

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Nocilla N. e Urciuoli	Stabilità dei Pendii in Roccia	1997	Argomenti di Ingegneria Geotecnica -Helvelius Edizioni	
Omar E. Mora et al.	Landslide change detection based on Multi-Temporal airborne LIDAR-derived DEMs	2018	MDPI - Geosciences 2018, 8, 23	https://www.mdpi.com/ 2076-3263/8/1/23
Peltier A. et al.	PSInSARTM as new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton	2010	Geophysical Research Letters. 37	
Perissin D. & Ferretti A.	Urban-target recognition by means of repeated space-borne SAR images	2007	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 15: 4043-4058	
Petschko H. et al.	Effectiveness of visually analyzing LiDAR DTM derivatives for earth and debris slide inventory mapping for statistical susceptibility modeling	2016	Landslides 13 , 857–872	Link ResearchGate
Picarelli L.	Meccanismi di deformazione e rottura dei pendii	1999	Argomenti di Ingegneria Geotecnica - Helvelius Edizioni	
Pierson TC. e Costa JE.	A rheologic classification of subaerial sediment-water flow in Debris Flows/avalanches: Process, Recognition, and Mitigation	1987	Geological Society of America – Reviews in Engineering Geology, Volume VII	link Google books
Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
--------------------------------------	---	-------------------	--	---
Presidenza Consiglio dei Ministri	Dpcm 29 settembre 1998 - Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180.	1998	Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 3 del 05.01.1999	https:// www.gazzettaufficiale.it/ eli/gu/1999/01/05/3/sg/ pdf
Regione Liguria	DGRT 1338 del 09.11.2007. Indirizzi per riperimetrazione e riclassificazione delle frane attive e quiescenti, che determinano aree a suscettività al dissesto elevata e molto elevata, a seguito di studi di maggior dettaglio nella pianificazione di bacino rilievo regionale (delibera della Giunta regionale n.1338 del 2007)	2007	Bollettino Ufficiale Regione Liguria n.49 del 05.12.2007 parte seconda.	https://www.burl.it/ ArchivioFile/ B_000000091507492000. pdf
Regione Liguria	DGRT 265 del 09.02.2010. Criteri per la definizione di classi di pericolosità relativa in aree a suscettività al dissesto elevata e molto elevata per frana a cinematica ridotta nonché integrazioni alla DGR 1338/07.	2010	Bollettino Ufficiale Regione Liguria n.10 del 10.03.2010 parte seconda.	<u>Link bollettino</u> <u>Link estratto</u>
Regione Liguria	PTAMC. Ambiti 08-15-16-17-18	2012,201 62023	Regione Liguria. Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero	Link Regione Liguria
Rinaldi m. et al.	SUM Sistema di classificazione delle unità morfologiche dei corsi d'acqua	2016	ISPRA, Manuali e linee guida, 132/2016	Link ISPRA
Rinaldi M. et al.	IDRAIM. Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua	2016	ISPRA, Manuali e linee guida, 131/2016	https:// www.isprambiente.gov.it/ files/pubblicazioni/ manuali-lineeguida/ MLG_131_2016.pdf
Rosen P.A. et al.	Synthetic aperture radar interferometry	2000	Proc. I.E.E.E. 88 (3). 333- 382	

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Scotto di Santolo A.	Le Colate Rapide	2002	Argomenti di Ingegneria Geotecnica -Helvelius Edizioni	
Strozzi T. et al.	Survey and monitoring of landslide displacements by means of L- band satellite SAR interferometry	2005	Landslides. 2 (3): 193- 201	
Stular B. et al.	Airborne LiDAR Point Cloud Processing for Archaeology. Pipeline and QGIS Toolbox	2018	Remote Sens. 2021 , 13, 3225.	https://doi.org/10.3390/ rs13163225
Tanzini M.	Fenomeni Franosi e Opere di Stabilizzazione	2001	Dario Flacovio Editore	
Tanzini M.	L'indagine geotecnica	2002	Dario Flacovio Editore	
Università degli Studi di Genova – DICAT e Regione Liguria Settore Assetto del Territorio	Manuale di morfodinamica fluviale	2009	Regione Liguria	Link regione Liguria
Università di Cagliari	Azione T.2.3.4 - metodologia coste alte	2020	Interreg MAREGOT	Link MareGot
Università di Cagliari	Metodologia Coste Alte. Azione T.2.3.4	2020	Progetto Interreg MARITTIMO-IT FR- MARITIME MAREGOT 2014-2020	https://interreg- maritime.eu/web/ maregot/checosarealizza
Van Westen, C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L.	Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment: an overview.	2008	Engineering geology, 102 (3-4), 112-131.	Link ResearchGate

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Varnes D.J.	Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.	1984	Commission on Landslides of the IAEG, UNESCO, Natural Hazards, 3, 61 pp.	https:// www.isprambiente.gov.it/ files/pubblicazioni/ manuali-lineeguida/ MLG_85_2013.pdf
Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)	A Suggested method for reporting a lanslide	1990	Bulletin of the International Association og Engineering Geology	https:// www.researchgate.net/ publication/ 290438810_A_suggested_ method_for_reporting_a_ landslide
Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)	A Suggested method for a landslide summary	1991	Bulletin of the International Association og Engineering Geology	https:// www.researchgate.net/ publication/ 225177441_A_suggested_ method_for_a_landslide_ summary
Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)	A Suggested method for describing the activity of a lanslide	1993a	Bulletin of the International Association og Engineering Geology	Link ResearchGate
Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)	Multilingual Ladslide Glossary	1993b	Bitech, Richmond. British Columbia	https:// www.researchgate.net/ publication/ 267868150_Multilingual_ Landslide_Glossary

Autore	Titolo	Anno	Fonte/editore	Link Web
Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)	A Suggested method for describing the rate of movement of a lanslide	1995	Bulletin of the International Association og Engineering Geology	Link ResearchGate
Yazawa A., Mizuyama T.	Measures against debris flow on roads	1987	Technical Memorandum of PWRI No. 2492, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan, 1-25.	
Zhou X., Chang N. B Li S.	Applications of SAR Interferometry in earth and environmental science research	2009	Sensors, 9 (3), 1876- 1912	

Appendice 2 – Metodologia per la definizione delle aree a suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica di pericolosità elevata (P3b), media (P2b) e moderata (P1)

Premessa

La mappa della suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica nasce dall'esigenza di definire, a livello distrettuale, il livello di propensione al dissesto di un'area, risultante dalla presenza di fattori predisponenti legati essenzialmente alle condizioni geologiche, morfologiche, geotecniche e di copertura del suolo.

La determinazione della suscettibilità si affianca, integrandola, alla pericolosità definita secondo il criterio direttamente derivato dalla presenza di un dissesto di natura geomorfologica.

La suscettibilità è individuata nelle tre classi P3b, P2b e P1 ed è definita secondo procedure differenziate per il territorio toscano-umbro e per il territorio ligure. La ragione della differenziazione è conseguenza della disponibilità nelle singole UOM della valutazione della suscettibilità al momento della predisposizione del Progetto di PAI. Per la Liguria infatti la definizione della suscettibilità è stata attuata da tempo secondo criteri omogenei all'interno dei Bacini Regionali Liguri, mentre per Arno, Magra, Bacini Regionali Toscani e Serchio la suscettibilità era assente o definita secondo criteri fortemente differenziati.

Di seguito vengono pertanto richiamati i criteri adottati per i Bacini Regionali Liguri ed ereditati dal PAI "dissesti", mentre viene illustrata la procedura definita ex-novo utilizzata per la realizzazione della suscettibilità al dissesto per i bacini dell'Arno, Serchio, Magra ed ex bacini regionali della Toscana (Ombrone, Toscana costa e Toscana Nord).

Metodologia definizione suscettibilità per la UOM Bacini Regionali Liguri

Per la realizzazione della "Carta della suscettività al dissesto" dei PAI afferenti agli ex-bacini regionali liguri, da cui derivano le aree denominate Pg1, Pg2 e Pg3b, e che sono confluite nel PAI come P1, P2b e P3b, il riferimento sono state le linee guida e raccomandazioni pubblicate pagina "<u>ambiente</u>" del sito istituzionale della Regione Liguria e disponibili nelle seguenti risorse web.

Linee Guida n. 2/2000 - Indicazioni	PDF - Link web Regione Liguria	PDF - Link web ABDAS
di suscettività al dissesto dei versanti		
Raccomandazione n. 4B/1996 - Valutazione	PDF - Link web Regione Liguria	PDF - Link web ABDAS
della pericolosità e del rischio idraulico e		
idrogeologico. Carte Derivate		

I principi generali riportati in questi documenti sono stati poi adattati alle peculiarità dei diversi territori secondo quanto riportato nella Relazione Generale del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico di ogni singolo bacino a cui si rimanda per i necessari approfondimenti (<u>http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/index.html</u>).

Si precisa che tali metodiche, utilizzate in origine solo nell'ambito dei bacini regionali liguri, possono essere applicate a tutti i procedimenti di riesame delle aree a suscettibilità relative al territorio del Distretto.

Metodologia definizione suscettibilità per il territorio delle UOM Arno, Magra, Bacini Regionali Toscani e Serchio

La metodologia utilizzata per l'elaborazione della cartografia di suscettibilità da dissesti di natura geomorfologica al dissesto tiene conto, in linea generale, della combinazione di alcuni parametri predisponenti riconducibili alle caratteristiche geologiche del substrato, tipologia, spessore e caratteristiche idrogeologiche dei suoli affioranti, pendenza dei versanti e uso del suolo. Anziché esaminare ognuno di questi parametri e verificare le loro possibili combinazioni in relazione alla presenza di dissesti di natura geomorfologica nel territorio esaminato, si è scelto di utilizzare come dato di riferimento le Unita di Paesaggio (UdP) del database pedologico in scala 1:10.000 elaborato dalla Regione Toscana in collaborazione con il Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena e il Consorzio LAMMA nel periodo 2009-2016, per i cui dettagli si rimanda all'indirizzo web http://www.regione.toscana.it/-/pedologia. Come meglio esplicitato più avanti La definizione delle UdP infatti

Pag. 42 di 118

nasce dalla combinazione dei fattori considerati come predisponenti alla suscettibilità indicati sopra. Per quanto riguarda invece l'ex bacino di rilievo interregionale del fiume Magra, il suddetto materiale è stato integrato, per la porzione ligure del bacino, con la cartografia delle unità di suolo-paesaggio in scala 1:25.000, per i cui dettagli si rimanda all'indirizzo web <u>https://srvcarto.regione.liguria.it/geoviewer2/pages/apps/geoportale/index.html?</u> id=151.

Quest'ultima cartografia non risulta peraltro disponibile per il bacino del fiume Vara a monte della confluenza con il torrente Usurana (circa 550 kmq). Per tale area si è quindi proceduto alla ricostruzione delle UdP attraverso un'analisi gis basata sulla omogenea combinazione dei principali fattori alla base della definizione delle UdP, quali uso del suolo, acclività dei versanti e caratteristiche geo-litologiche.

In particolare, per effettuare l'analisi di propensione al dissesto sono state utilizzate le Unità di Paesaggio (UdP) restituite in formato vettoriale nell'ambito dei suddetti lavori. Le UdP, infatti, rappresentano degli ambienti omogenei per caratteri morfologici, litologici, erosivi, vegetazionali e di uso del suolo e possono quindi essere considerate rappresentative di una determinata combinazione dei principali parametri predisponenti generalmente utilizzati per analisi di propensione al dissesto. In tali unità i fattori di pedogenesi possono inoltre essere considerati costanti, potendo ragionevolmente ipotizzare la presenza di una tipologia di suolo predominante all'interno di ogni UdP. Nell'intero database pedologico della Regione Toscana sono individuate 795 UdP e per ognuna di esse è stato successivamente definito l'indice di franosità.

Come dato di base per il censimento delle frane presenti sul territorio toscano, sono stati utilizzati diversi strati informativi, in modo da tenere conto dello sia stato di aggiornamento del dato che della sua coerenza con altre banche dati geografiche a carattere locale o regionale. In particolare, per gli ex bacini regionali di cui alla ex L 183/89 è stato considerato il database geomorfologico della Regione Toscana scaricabile all'indirizzo http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/geomorfologia.html, aggiornato al giugno 2017. Considerate le finalità del lavoro, sono state utilizzati solo i poligoni di frana con geometria areale (FR e FD), escludendo quindi gli elementi non cartografabili a geometria puntuale (FN) o altre tipologie di frana non considerate nella propensione al dissesto come le deformazioni gravitative profonde di versante (DG). Tale database è stato integrato, per la porzione ligure del bacino interregionale del fiume Magra, con il database IFFI 2014 (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) scaricabile dal sito della Regione Liguria all'indirizzo http://srvcarto.regione.liguria.it/geoviewer2/pages/apps/geoportale/index.html?id=492.

Per quanto riguarda il bacino del fiume Arno, come dato di base per l'individuazione dei dissesti di natura geomorfologica è stato invece utilizzato integralmente il database IFFI, curato da questa Autorità di Bacino e aggiornato ad aprile 2019, mentre per il bacino del fiume Serchio si è fatto riferimento al database delle frane elaborato per la predisposizione del PAI e aggiornato al 2017. In particolare, per ognuno dei database utilizzati sono stati considerati solo i fenomeni attivi e quiescenti, in modo da escludere forme di dissesto geomorfologico originatesi in condizioni meteoclimatiche diverse dalle attuali.

Infine, per far sì che l'analisi dell'indice di franosità, così come descritta in seguito, fosse eseguita su aree di riferimento più omogenee possibile relativamente alla tipologia e genesi dei dissesti censiti, il territorio della Regione Toscana rientrante nel Distretto Appennino Settentrionale è stato suddiviso in "aree omogenee" (AO) sulla base di considerazioni di carattere geologico-geomorfologico. In particolare, sono state individuate 16 AO di cui 6 rientranti nel bacino del fiume Arno (area appenninica, area tirrenica, area Bientina-Fucecchio, Val di Chiana, medio Valdarno, area Pesa-Elsa-Era), 3 nell'ex bacino Regionale Ombrone (Ombrone, Bruna, Albegna) e 4 nell'ex bacino regionale Toscana Costa (Cecina, Cornia-Pecora e bacini minori, Fine e bacini minori, Arcipelago toscano e Monte Argentario); non sono invece stati suddivisi ulteriormente il bacino del fiume Serchio, l'ex bacino regionale Toscana nord e l'ex bacino interregionale del Magra. In figura 1 è riportata la delimitazione delle AO come sopra indicate.



Figura 1 - Aree Omogenee utilizzate per le elaborazioni sulla propensione al dissesto (FIGURA AGGIORNATA)

Metodologia generale

La metodologia per la predisposizione della mappa di propensione al dissesto è finalizzata alla definizione delle aree a pericolosità moderata (*P1*), media (*P2b*) ed elevata (*P3b*) del PAI ed è basata sull'analisi dell'indice di franosità (IF) che, per un determinato tema geografico di natura poligonale, è definito dal rapporto tra area in frana all'interno di tale ambito e area totale dello stesso. Generalmente l'analisi di IF per la definizione della propensione al dissesto viene effettuata su aree territoriali omogenee (ATO), ognuna caratterizzata da una determinata combinazione di fattori predisponenti al verificarsi di dissesti di natura geomorfologica, come ad esempio le caratteristiche geo-litologiche, morfologiche e di uso del suolo. In questo lavoro, come accennato precedentemente, le ATO utilizzate per la definizione di IF corrispondono alle UdP estratte dal database pedologico in scala 1: 10.000 della Regione Toscana e, per la porzione ligure del bacino del fiume Magra, dalla cartografia delle unità di suolo-paesaggio in scala 1: 25.000. Tali unità risultano infatti caratterizzate da una predominante combinazione di fattori predisponenti il verificarsi di fenomeni franosi (litologia, acclività, presenza di fenomeni erosivi in atto, vegetazione, uso del suolo) e pertanto si prestano molto bene ai fini di questo lavoro.

Nell'ambito di questa impostazione metodologica generale, basata sulla definizione di IF, è stato seguito un diverso percorso applicativo per la definizione delle aree *P1/P2b* e delle aree *P3b*, come di seguito descritto.

Metodologia per la definizione delle aree P1-P2b

Come prima cosa è stato assegnato ad ogni AO un IF caratteristico (IF_AO) dato dal rapporto tra l'area di tutte le frane ricadenti in quella AO e la sua superficie totale. Questo valore, che ci indica quindi la percentuale di superficie di ogni AO interessata da dissesti di natura geomorfologica, è stato successivamente utilizzato per la definizione delle classi di propensione al dissesto. Nella seguente tabella sono riportati i valori delle superfici interessate e i conseguenti valori di IF_AO.

Nome AO	Area frane (kmq)	Area totale AO (kmq)	IF_AO (%)
Arcipelago	6.38	353.81	1.80
Arno - area appenninica	447.85	2695.87	16.61
Arno - area tirrenica	19.72	654.15	3.01
Arno - area Bientina-Fucecchio	45.21	740.76	6.10
Arno - val di Chiana	46.42	1223.65	3.79
Arno - medio Valdarno	156.12	1411.17	11.06
Arno - area pesa-elsa-era	246.95	2249.61	10.98
Ombrone	289.57	3697.55	7.83
Bruna	23.85	815.52	2.93
Albegna	67.89	1033.15	6.57
Serchio	173.14	1624.88	10.66
Fine e bacini minori	37.18	356.17	10.44
Cecina	148.63	905.06	16.42
Cornia, Pecora e bacini minore	98.11	1164.49	8.43
Toscana nord	28.78	374.02	7.70
Magra	225.77	1717.37	13.15

All'interno di ogni area omogenea è stata quindi calcolata l'area in frana di ogni UdP, in modo poi da assegnare a quest'ultima un IF caratteristico (IF_UdP) dato dal rapporto tra area in frana e area totale di ogni UdP presente all'interno della AO interessata. Per ogni AO, le UdP sono infine state classificate come aree a pericolosità da frana moderata (P1) o media (P2b) a seconda che risultasse rispettivamente IF_UdP <= IF_AO oppure IF_UdP > IF_AO. Quindi, se una determinata UdP presenta un indice di franosità inferiore o uguale a quello dell'area omogenea di riferimento allora viene considerata a moderata propensione al dissento, mentre se l'indice è superiore viene definita come a propensione media. Dalla cartografia risultante sono state infine escluse le aree di pianura, per le quali la metodologia utilizzata non risulta applicabile in quanto non interessate direttamente da fenomeni gravitativi di versante. L'area di pianura, in particolare, è stata definita considerando i morfotipi individuati nel Piano di Indirizzo Territoriale (PIT) della Regione Toscana, mentre per le porzioni ligure e umbra dell'area di studio è stata definita manualmente partendo dalle aree a bassa probabilità di inondazione individuate nel Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA).

In figura 2 è riportata la carta di propensione al dissesto con individuazione delle classi di pericolosità da processi geomorfologici di versante e da frana moderata (*P1*) e media (*P2b*), con la sovrapposizione dei dissesti di natura geomorfologica utilizzati in questo lavoro per la definizione degli indici di franosità (IF_AO e IF_UdP). Come possiamo osservare, la distribuzione dei dissesti attivi e potenzialmente instabili utilizzati per questo lavoro ricadono prevalentemente nelle aree classificate come *P2b*, confermando la correttezza del risultato finale. In particolare, considerando tutto il territorio esaminato, risulta che circa l'81% dei dissesti censiti ricade nella classe di pericolosità *P2b*, mentre il restante 19% ricade in *P1*. Il risultato finale può quindi essere considerato soddisfacente, oltre ad essere facilmente modificabile in funzione dello stato di aggiornamento del database dei dissesti di natura geomorfologica utilizzato per questo lavoro.



Figura 2 - Mappa della propensione al dissesto con riportati i dissesti utilizzati per la definizione di IF_AO e IF_UdP (FIGURA AGGIORNATA)

Nel grafico di figura 3 sono riportati, per ognuna delle 16 AO considerate, le percentuali di dissesti attivi e potenzialmente instabili ricadenti nelle classi *P1* e *P2b*. Come possiamo vedere, anche a livello di AO i risultati ottenuti possono essere considerati soddisfacenti. In particolare, il risultato migliore si ottiene per la AO "Bruna", dove il solo il 7% delle aree in dissesto si trovano in classe *P1*, mentre quello peggiore è riferibile alla AO "Cecina" dove in area *P1* ricadono circa il 35% dei dissesti. In ogni caso, considerato lo scopo del lavoro, i risultati ottenuti possono essere considerati accettabili e sicuramente migliorativi rispetto alla precedente definizione delle aree *P1* e *P2* (bacino del fiume Arno) ottenuta con una simile metodologia ma considerando un solo parametro predisponente (litologia) derivato dalla carta geologica d'Italia in scala 1: 100.000.



Figura 3 – Percentuali dissesti attivi e potenzialmente instabili nelle aree P1 e P2b

La metodologia utilizzata per la realizzazione della mappa di propensione al dissesto a supporto del PAI della porzione toscana del Distretto si è rilevata un utile strumento per la definizione delle aree a pericolosità da dissesti di natura geomorfologica moderata (*P1*) e media (*P2b*). L'utilizzo delle UdP derivate dal database pedologico della Regione Toscana in scala 1:10.000 ha permesso di utilizzare uno strato informativo di riferimento condiviso a livello regionale e compatibile con le finalità di questo lavoro. L'utilizzo dell'indice di franosità per la definizione delle classi di propensione al dissesto ha permesso di ottenere un buon adattamento delle frane censite alle due classi di riferimento, permettendo un notevole miglioramento nella loro definizione, sia come combinazione di parametri predisponenti utilizzati che come definizione cartografica.

Metodologia per la definizione delle aree P3b

Le aree P3b individuate in questo lavoro rappresentano zone del territorio che, oltre ad avere un alto valore dell'indice di franosità a livello di UdP, presentano anche una importante continuità spaziale con i dissesti di natura geomorfologica censiti. Per individuare tali aree sono stati utilizzati sempre il database pedologico in scala 1:10.000 della Regione Toscana e, per la porzione ligure del bacino del fiume Magra, le unità di suolo-paesaggio in scala 1: 25.000 viste al paragrafo 2, ma invece di prendere le UdP come unità elementari (ATO) per il calcolo di IF, sono stati utilizzati i singoli poligoni che le compongono. Praticamente questa procedura permette di estendere la pericolosità di un'area interessata dai dissesti di natura geomorfologica censiti a tutto il suo intorno che presenta simili caratteristiche dei fattori predisponenti considerati, ovvero litologia, acclività, presenza di fenomeni erosivi in atto, vegetazione e uso del suolo. Non vengono invece inserite in questa classe le aree che, sebbene appartenenti ad una UdP con valore di IF superiore alla media a livello di bacino (*P2b*), non presentano evidenze dirette della presenza di dissesti sul rispettivo poligono.

La procedura operativa consiste nell'esplodere i poligoni multipli delle UdP ed intersecare ogni poligono ottenuto con i dissesti di natura geomorfologica censiti per poi assegnarvi il corrispondente indice di franosità. I poligoni che presentano un IF >= 50, ovvero che hanno almeno il 50% della loro superficie in frana, vengono infine classificati come aree a pericolosità elevata *P3b*.

In figura 4 è riportato un esempio dell'applicazione della procedura sopra descritta, che permette di visualizzare come la metodologia utilizzata per la definizione delle aree *P3b* consenta di estendere la pericolosità determinata dalla presenza di fenomeni franosi al suo intorno con simili parametri predisponenti.

Pag. 47 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024



Figura 4 – Esempio di applicazione della procedura utilizzata per la definizione delle aree P3b.

In generale, considerando tutti i 16 bacini esaminati, risulta che circa il 69% delle *P3b* sono direttamente interessate dalla presenza di dissesti, evidenziando il loro effettivo stato di pericolosità.

Nel grafico di figura 5 sono riportati, per ognuna delle 15 AO considerate, le percentuali di dissesti attivi e potenzialmente instabili ricadenti nella classe *P3b*. Come possiamo vedere, anche a livello di AO i risultati ottenuti possono essere considerati molto soddisfacenti. In particolare, il risultato migliore si ottiene per la AO "Magra", dove circa il 79% delle aree P3b risulta interessata dai dissesti censiti, mentre quello peggiore è riferibile alla AO "Arno – Bientina-Fucecchio" dove i dissesti che ricadono in area *P3b* sono circa il 57% della loro superficie totale. In ogni caso, l'elevata percentuale di dissesti individuata dalle aree *P3b*, unitamente alla loro continuità spaziale con i dissesti censiti in relazione ai parametri predisponenti considerati, giustificano l'attribuzione a queste aree di una elevata pericolosità geomorfologica.



Figura 4 – Percentuale di aree in frana nelle aree P3b

La metodologia utilizzata per la definizione cartografica delle aree *P3b* ha evidenziato una buona coerenza con la distribuzione dei dissesti censiti e ha permesso di individuare le aree ad essi spazialmente continue con simile valore dei parametri predisponenti considerati (litologia, acclività, presenza di fenomeni erosivi in atto, vegetazione e uso del suolo). Tali aree possono quindi essere considerate zone ad elevata pericolosità, sia per la probabile evoluzione dei dissesti censiti che per l'attivazione di dissesti di neoformazione. Anche in questo caso, come già visto per la definizione delle aree *P1* e *P2b*, l'utilizzo delle UdP derivate dal database pedologico della Regione Toscana in scala 1: 10.000 e dalla cartografia delle unità di suolo-paesaggio della Regione Liguria in scala 1: 25.000, sebbene trattate in maniera diversa, ha permesso di utilizzare uno strato informativo di riferimento condiviso a livello regionale e compatibile con le finalità di questo lavoro.

Si precisa che tali metodiche, utilizzate in origine solo nell'ambito dei bacini Arno, Magra, Bacini Regionali Toscani e Serchio, possono essere applicate a tutti i procedimenti di riesame delle aree a suscettibilità relative al territorio del Distretto.

Appendice 3 – Metodologia per l'individuazione delle aree interessate da fenomeni di subsidenza del terreno.

Premessa

La metodologia utilizzata, basata sull'analisi delle velocità di deformazione del terreno ottenute dall'elaborazione interferometrica multi-temporale di immagini radar satellitari, risulta efficace per la definizione spaziale del fenomeno ma non permette a priori di definirne le cause scatenanti. Nelle aree interessate dalla presenza di acquiferi porosi di tipo alluvionale, tali fenomeni risultano generalmente correlati al forte emungimento di acque sotterranee in associazione alla presenza di sedimenti argilloso limosi. Altri fenomeni da considerare risultano invece da mettere in relazione all'estrazione di fluidi geotermici, alla coltivazione di risorse minerarie in sotterraneo o alla compattazione di sedimenti recenti non ancora completamente consolidati.

Materiali utilizzati

Per l'analisi delle deformazioni del terreno sono stati utilizzati i dati puntuali di deformazione (PS) ottenuti dall'elaborazione interferometrica differenziale delle immagini radar acquisite dal satellite SENTINEL-1 nel periodo gennaio 2016 – dicembre 2020. Tali dati sono disponibili liberamente nell'ambito del servizio europeo per i movimenti del suolo (European Ground Motion Service - EGMS) facente parte dei prodotti Copernicus previsti dal programma spaziale dell'Unione Europea. Per questo lavoro, in particolare, sono stati utilizzati i prodotti di terzo livello (Ortho), ovvero le componenti di movimento orizzontale (est-west, EW) e verticale (up-down, UD) ottenute dalla combinazione dei dataset ascendente e discendente ricampionati su celle quadrate con lato di 100 dettagli è possibile consultare il sito web ufficiale EGMS m. Per maggiori all'indirizzo https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service. Questi dati, essendo elaborati su tutto il territorio della Comunità Europea, hanno permesso di effettuare un'analisi omogenea a scala di Distretto ed individuare alcune criticità da indagare con approfondimenti successivi.

Metodologia

Per individuare le aree chiaramente interessate da fenomeni di subsidenza del terreno sono stati inizialmente considerati i centroidi delle celle di ricampionamento con componente UD della velocità media inferiore a - 2 mm/anno, quindi in evidente abbassamento rispetto al piano di campagna. Per tali punti, i valori UD sono stati confrontati con i corrispondenti valori EW in modo da ricostruire l'orientamento del vettore velocità media nel piano EW-UD per poi estrarre solo i punti con inclinazione del vettore superiore a 70°, quindi molto prossimi alla verticale. Questi punti sono stati poi analizzati e delimitati spazialmente attraverso processi di aggregazione e generalizzazione, in modo da formare dei poligoni che li delimitassero in maniera più accurata possibile.

Considerate le finalità di questo lavoro, orientato in particolare all'individuazione delle zone dove i fenomeni di subsidenza risultano diffusi e spazialmente distribuiti su vaste aree, si è provveduto ad estrarre solamente i poligoni sopra definiti che contenevano al loro interno almeno 10 punti con valori del vettore EW-UD chiaramente anomali e con una componente della velocità media annua nel piano UD inferiore o uguale a – 2 mm/anno, in modo da delimitare le "aree a maggiore concentrazione di fenomeni di subsidenza" come mostrato nell'esempio di figura 1.

Nello strato informativo prodotto sono riportati il numero di punti EGMS Ortho ricadenti in ogni poligono individuato (N_ortho) e la loro velocità media annua nel piano UD (avg_Vud).



Figura 1 – Esempio di aggregazione e generalizzazione delle aree a più elevata concentrazione di fenomeni di subsidenza nella pianura Firenze-Prato-Pistoia

Risultati

I risultati ottenuti hanno mostrato una buona approssimazione delle aree maggiormente interessate da fenomeni di subsidenza del terreno, in quanto basate sull'analisi congiunta dei dataset ascendente e discendente e sulla coerenza dei rispettivi valori di velocità di deformazione media annua su tutto il periodo di analisi.

In tabella 1 viene riportata la distribuzione per Provincia delle aree a più elevata concentrazione dei fenomeni di subsidenza, mentre in Figura 2 è mostrata la distribuzione spaziale di tali aree su tutto il territorio del Distretto.

Le aree individuate risultano particolarmente concentrate nella pianura Firenze-Prato-Pistoia, dove si raggiungono valori medi di deformazione della componente UD pari a circa 3-4 mm/anno, con massimi fino a circa 60 mm/anno. Un'altra zona del Distretto in cui tali fenomeni risultano particolarmente concentrati riguarda le aree della Provincia di Pisa ubicate in corrispondenza dei sedimenti alluvionali recenti del fiume Arno, dove si raggiungono valori medi di deformazione della componente UD di circa 3 mm/anno con massimi fino a circa 20 mm/anno. Tali fenomeni sono principalmente riconducibili al forte emungimento di acque sotterranee in acquiferi alluvionali o alla naturale compattazione di sedimenti fluviali e marini recenti non ancora completamente consolidati. Per quanto riguarda invece le aree a maggiore concentrazione di fenomeni di subsidenza ubicate al confine tra le Province di Pisa, Siena e Grosseto, con valori medi della componente UD di circa 9 mm/anno fino a massimi di circa 36 mm/anno, i valori osservati sono principalmente riconducibili all'estrazione di fluidi geotermici dal campo pozzi dell'area di Larderello. Le altre situazioni individuate a livello di Distretto risultano molto localizzate e la loro natura è difficilmente ipotizzabile a meno di ulteriori approfondimenti.

REGIONE	PROVINCIA	numero aree	superficie (kmq)
Liguria	La Spezia	2	10.59
Toscana	Arezzo	1	1.24
Toscana	Firenze	8	25.02
Toscana	Grosseto	13	17.63
Toscana	Livorno	17	56.35
Toscana	Lucca	8	48.43
Toscana	Massa - Carrara	2	2.50
Toscana	Pisa	24	226.94
Toscana	Pistoia	6	91.83
Toscana	Prato	2	33.69
Toscana	Siena	3	6.37

Tabella 1 – Distribuzione per Provincia delle aree a più elevata concentrazione di fenomeni di subsidenza con indicazione di numero e superficie interessata



Figura 2 – Distribuzione spaziale delle aree a maggiore concentrazione di fenomeni di subsidenza



Figura 3 – Valori assoluti delle velocità media e massima riferite alla componente UD per le aree a maggiore concentrazione di fenomeni di subsidenza raggruppate per Provincia

Appendice 4 – Prime indicazioni per la valutazione delle condizioni di pericolosità nelle Conoidi detritico-alluvionali e conoidi soggetti a fenomeni di *debris-flow*

Premessa

Vari Autori hanno identificato diverse categorie di trasporto solido in cui il passaggio da *debris flow* a forme di flusso iperconcentrato (*hyperconcentraded Flow* e *debris flood*) non è generalmente di immediata identificazione. Tale distinzione ha una certa rilevanza dato che i fenomeni iperconcentrati ricadono nell'ambito della direttiva 2007/60 (*floods with a high content of transported sediments and debris floods* – art.6, comma 5 lett. d) ovvero sono di competenza del Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA).

Può quindi essere utile, tra le numerose proposte di classificazione disponibili, proporre alcuni riferimenti analitici utili a definire i meccanismi principali del problema e quindi inquadrare correttamente l'ambito proprio del PAI rispetto a quello del PGRA, evidenziando al contempo la stretta interconnessione.



Figura 1: Classificazione "geotecnica" dei processi di trasporto misti acqua/terra (HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual - 2020)



Nell'esame degli schemi proposti è importante evidenziare che i termini *hyperconcentraded flow* e *debris flood* sono considerati come sinonimi, anche se, come è noto, dal punto di vista strettamente tecnico non lo sono. Il primo indica flussi caratterizzati da una concentrazione molto elevata di materiale fine mentre il secondo indica le "piene di detriti" in cui è presente un forte trasporto solido al fondo che coinvolge granulometrie eterogenee.

I fenomeni di colata rapida di detrito a forte componente liquida (*debris flow*), originati in concomitanza di precipitazioni brevi e di forte intensità, si muovono con velocità elevata e, autoalimentandosi per l'innesco di frane lungo i versanti, raggiungono il fondovalle con effetti distruttivi nell'area di conoide.

L'analisi della propensione delle aree di conoide ad essere soggette a fenomeni di sovralluvionamento e *debris-flow* può essere intrapresa valutando gli studi presenti in letteratura e, ad esempio, i casi che in particolare trattano l'analisi quantitativa delle caratteristiche morfologiche e morfometriche dell'area di conoide e del bacino idrografico a monte, al fine di ottenere elementi quantitativi e oggettivi utili ad una valutazione speditiva della propensione al fenomeno.

Le variabili e i parametri che influenzano l'entità del fenomeno legato allo sviluppo e formazione delle conoidi detritico-alluvionali sono molteplici: superficie del bacino, pendenza del collettore, forma di trasporto, geologia, pendenza della conoide, ecc.

Dalla letteratura, prendendo in esame ad esempio gli studi che fanno riferimento all'analisi del numero di Melton si possono individuare quei casi in cui la pendenza del conoide, abbinata ad un indice morfologico del bacino (Me: numero di Melton), fornisce indicazioni utili in merito alla forma di trasporto dominante in un bacino idrografico: *debris flow/flood* o trasporto di fondo per scorrimento.

Il numero o indice di Melton è possibile ricavarlo dai seguenti parametri fisiografici, scegliendo come sezione di chiusura del bacino l'apice della conoide.

 $Me = \Delta H A^{(-0.5)}$

dove:

 ΔH : dislivello fra la quota massima e la quota minima del bacino;

A: la superficie del bacino stesso.

Alcuni studi hanno evidenziato che la pendenza del conoide risulta influenzata soprattutto dalla tipologia dei processi deposizionali piuttosto che da altre variabili come ad esempio le caratteristiche litologiche del bacino. Appartengono dunque alla categoria dei bacini a rischio di *debris flow e/o debris flood* quelli caratterizzati da valori di Numero di Melton (Me) e pendenza del conoide (espressa in gradi) tali da soddisfare la disequazione:

S > 7 - 14 Me

Quando non sia presente o non sia morfologicamente ben definita la forma del cono di deiezione, è possibile utilizzare più semplicemente la relazione:

Me > 0.5

Facendo invece riferimento al solo parametro della pendenza media dell'alveo e richiamando dalla letteratura (vedi appendice 1) gli aspetti salienti degli studi specifici, in molti casi si individuano le condizioni a maggior rischio di *debris flow* per pendenze con valori superiori al 27%. A questa classe segue, con indice di rischio legato a processi tipo *debris flood*, il campo di pendenze compreso fra il 27% ed il 14%.

Appendice 5 - Linee guida per l'utilizzo dei dati di deformazione (PS) derivati da analisi multi-interferometrica di immagini radar satellitari

1. Generalità sui sistemi radar satellitari

I sistemi radar satellitari sono costituiti da sensori di tipo attivo e forniscono immagini elettromagnetiche della superficie terrestre con risoluzione spaziale dell'ordine del metro. Le lunghezze d'onda utilizzate per l'analisi di movimenti del terreno rientrano nel campo delle microonde, generalmente comprese tra 2 e 20 cm (frequenze tra 1,5 e 15GHz), caratteristica fondamentale per apprezzare spostamenti millimetrici.

Un aspetto molto importante di questo sistema di acquisizione è dato dal fatto che, rispetto ai più noti sistemi ottici, opera con continuità, potendo acquisire dati anche in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte. Inoltre, i sistemi radar montati sui satelliti, denominati SAR ovvero radar ad apertura sintetica, operano in modo tale che uno stesso punto P ubicato sulla superficie terrestre venga illuminato più volte dal radar in movimento, in modo da simulare un'antenna di grosse dimensioni che permette di ottenere un'elevata risoluzione geometrica.

I satelliti con a bordo sistemi di acquisizione radar percorrono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota di circa 800 km, una striscia di terreno larga circa 100 km (satelliti ERS-ENVISAT). La direzione della congiungente sensore bersaglio (LOS) risulta perpendicolare alla direzione dell'orbita (azimut) ed è generalmente inclinata di un determinato angolo rispetto alla verticale detto off-nadir (Figura 1A) che, nel caso dei satelliti ERS ed ENVISAT, risulta essere di circa 23°.



Figura 1 – Geometria di acquisizione del satellite ERS (A) e andamento planimetrico generale delle orbite eliosincrone dei satelliti SAR

La stessa orbita viene ripercorsa dopo un determinato intervallo di tempo, detto tempo di rivisitazione, consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite eliosincrone dei satelliti risulta che la stessa area della superficie terrestre viene illuminata dalla radiazione radar sia durante un passaggio del satellite da nord verso sud, denominata orbita discendente, sia durante un passaggio del satellite da sud verso nord, denominata orbita ascendente (Figura 1B). La possibilità di acquisire dati sulla stessa scena nelle due geometrie è molto importante perché permette di analizzare uno stesso fenomeno da due diversi punti di osservazione, permettendo di superare alcuni inconvenienti legati ad orientazione e geometria del versante. Infatti, il sensore radar si trova collocato sulla destra rispetto al senso di marcia del satellite e questo fa sì che in geometria ascendente la scena sia osservata da ovest verso est, mentre in geometria discendente sia osservata da est verso ovest (Figura 2).

Il sistema di acquisizione radar non perpendicolare al suolo fa sì che nelle aree collinari e montane possano verificarsi alcuni effetti di distorsione nelle immagini di ampiezza che sono denominati foreshortening, layover e shadowing.

L'effetto di foreshortening si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio, facendo sì che il contributo di molti punti si concentri in poche celle producendo pixel molto luminosi che non permettono di discriminare i diversi contributi. I sistemi radar satellitari, al contrario di quelli ottici, tendono infatti a risolvere meglio situazioni dove il versante viene osservato con bassa inclinazione rispetto alla linea di vista del satellite e per tale motivo i versanti esposti ad est vengano generalmente risolti

Pag. 60 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

meglio in geometria ascendente, mentre quelli esposti ad ovest in geometria discendente; pertanto avere le immagini acquisite in entrambe le geometrie permette di migliorare notevolmente la risoluzione geometrica del fenomeno che vogliamo esaminare.



Figura 2 – Schematizzazione delle due geometrie di acquisizioni dei satelliti con strumentazione SAR

L'effetto di layover si verifica invece quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo che la linea di vista del satellite forma con la verticale, determinando una forte distorsione dell'immagine che non permette la sua corretta interpretazione.

L'effetto di shadowing invece non produce deformazioni di tipo prospettico come i due precedenti, ma si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dal radar perché schermate da altri oggetti (zone in ombra), producendo aree molto scure nelle immagini di ampiezza.

Nel caso si voglia programmare l'acquisizione di immagini radar su una determinata area per effettuare elaborazioni interferometriche, risulta quindi molto importante tenere conto degli effetti sopra descritti per verificare l'effettiva copertura dell'informazione ottenibile. A tal fine è possibile realizzare delle mappe che, in funzione di alcuni parametri morfologici (pendenza ed esposizione dei versanti) e delle caratteristiche geometriche del sistema di acquisizione satellitare, permettono di individuare le aree esenti da effetti di distorsione (mappe di Layover e Shadow). Lo scopo di questo lavoro peraltro è quello di fornire un supporto all'utilizzo dei dati esistenti, già elaborati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (vedi paragrafo 3.1) e del Piano di Monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana (paragrafo 3.2), per cui tali aspetti non verranno trattati (per approfondimenti vedi Cascini et al, 2010).

2. Interferometria radar differenziale

La tecnica tradizionale utilizzata per l'individuazione di aree soggette a movimenti superficiali è l'interferometria radar differenziale, che si basa appunto sull'osservazione dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni, in modo da mettere in luce eventuali differenze di posizione del bersaglio riconducibili a fenomeni di deformazione topografica.

2.1. Concetti generali

In Figura 3 è schematizzato il sistema di funzionamento generale del sistema SAR satellitare e le caratteristiche principali delle immagini radar. Un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide sugli oggetti presenti al suolo subendo un fenomeno di riflessione disordinata. Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, che è equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. In particolare, le grandezze misurate sono l'ampiezza del segnale, che individua la quantità di campo elettromagnetico retro diffusa verso il satellite (luminosità dell'oggetto) e la fase, che risulta strettamente legata alla distanza sensore-bersaglio e che, nelle applicazioni interferometriche, permette di identificare le aree soggette a deformazioni superficiali.



Figura 3 – Sistema di acquisizione radar satellitare e contributi di ampiezza e fase delle immagini radar

I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine radar dipendono fondamentalmente dalla riflettività del bersaglio, dalla distanza sensore-bersaglio e dallo stato fisico-chimico dell'atmosfera terrestre attraversata, oltre ovviamente dall'inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

La fase di una singola immagine risulta quindi inutilizzabile perché è di fatto impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se invece effettuiamo una sottrazione tra i valori di fase di due immagini acquisite sulla stessa scena in momenti diversi, ovvero generiamo un interferogramma, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la differenza di fase dipende, con buona approssimazione, solamente da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni, a parte ovviamente i contributi dovuti all'atmosfera e al rumore, che possono però essere stimati utilizzando opportuni modelli matematici. In questo modo, sapendo lo spostamento avvenuto in una certa area e l'intervallo temporale intercorso, possiamo stimare la velocità di deformazione media durante le due acquisizioni.

L'applicazione dell'interferometria tradizionale a due immagini radar acquisite in tempi diversi (DSInSAR) presenta però molti inconvenienti, dovuti principalmente alla variabilità delle proprietà elettromagnetiche dei bersagli radar nel tempo (decorrelazione temporale), alla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal satellite (decorrelazione geometrica) ed alla variazione delle caratteristiche elettromagnetiche dell'atmosfera terrestre durante le due acquisizioni. Tutte queste problematiche fanno si che l'interferometria radar da piattaforma satellitare tradizionale permetta unicamente di effettuare stime d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto con accuratezza dell'ordine del centimetro.

In Figura 4 ad esempio è riportato un'interferogramma relativo alla zona dell'Aquila generato a partire da due immagini ENVISAT acquisite a febbraio e aprile 2009, quindi a cavallo del terremoto del 6 aprile. L'interferogramma mostra nove frange concentriche che individuano l'area di massimo spostamento tra L'Aquila e Fossa, dove il terreno si è spostato di circa 25 cm lungo la direzione di vista del satellite.



Figura 4 – Esempio di interferogramma ottenuto da elaborazione DInSAR

2.2. Tecniche interferometriche avanzate

Un'evoluzione dell'analisi interferometrica differenziale per lo studio delle deformazioni superficiali è invece costituita dalle tecniche interferometriche avanzate sviluppate a partire dagli anni '90. Queste tecniche permettono infatti di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni, permettendo di raggiungere precisioni dell'ordine del mm, anziché del cm.

2.2.1. Generalità

Le tecniche interferometriche avanzate utilizzate nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PSTA) per l'elaborazione delle immagini acquisite dai satelliti ERS (1992-2000), ENVISAT (2003-2010) e Cosmo-SkyMED (2011-2014), sono quelle dei "Permanent Scatterers" (PSINSAR e SqueeSAR), messa a punto dal Politecnico di Milano e commercializzata dalla società spin-off Telerilevamento Europa (TRE), e quella dei "Persistent Scatterers Pairs" (PSP-IFSAR), sviluppata da e-GEOS, società controllata da Telespazio e da ESA. In entrambe le tecniche l'analisi interferometrica non viene più effettuata su due sole immagini, ma su una serie storica costituita da almeno una trentina di immagini e gli effetti di decorrelazione temporale vengono eliminati selezionando solo i bersagli radar, corrispondenti a singoli pixel o piccoli gruppi di pixel tra loro strettamente connessi, che presentano una firma elettromagnetica particolarmente stabile durante tutto l'intervallo temporale di analisi (PS), ovvero non affetti da decorrelazione temporale. I contributi di fase legati ai fenomeni di decorrelazione geometrica e agli effetti atmosferici vengono invece stimati applicando particolari algoritmi, come nel caso della tecnica PS del Politecnico di Milano, oppure operando in modo differenziale tra coppie di PS vicini, come nel caso della tecnica PSP di e-GEOS.

Indipendentemente dagli algoritmi utilizzati per l'individuazione dei diversi contributi di fase, entrambe le tecniche di elaborazione consistono, in estrema sintesi, nel processare una serie multitemporale di immagini radar acquisite dal satellite sulla stessa scena, almeno una trentina, per poi estrarre un insieme consistente di punti georiferiti, caratterizzati da una forte coerenza del segnale durante tutto l'intervallo di tempo considerato, ai quali può essere associata sia la velocità media di spostamento in mm/anno lungo la linea di vista del satellite riferita a tutto l'intervallo di tempo esaminato, sia il loro spostamento relativo in mm registrato ad ogni data di acquisizione delle immagini considerate (Figura 5). Tutte le misure sono di tipo differenziale, ovvero riferite spazialmente a punti a terra (reference points) di coordinate note e supposti fermi in funzione delle loro caratteristiche geologiche o sulla base di misure dirette derivate da livellazione topografica o analisi GPS, e riferite temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine.



Figura 5 – Schematizzazione dei prodotti ottenibili tramite tecniche interferometriche avanzate

Questi punti, denominati Permanent scatterers o Persistent scatterers (PS), altro non sono che bersagli radar naturali già esistenti sul territorio, caratterizzati dall'avere una risposta al segnale radar particolarmente stabile durante tutto il periodo di analisi, corrispondenti generalmente ad edifici, rocce esposte, strutture metalliche, condotte di vario tipo, viadotti, reti elettriche, monumenti, cioè oggetti contraddistinti da un elevato potere riflettente nei confronti della radiazione elettromagnetica emessa dal satellite. Questa caratteristica fa si che la densità dei PS sia più che soddisfacente nelle aree urbanizzate (fino a qualche centinaio per kmq), ma si riduca notevolmente fino ad annullarsi in aree vegetate o periodicamente innevate.

Per limitare questo inconveniente, nel 2011 TRE ha sviluppato un nuovo algoritmo per l'elaborazione dei dati interferometrici, denominato SqueeSAR (Ferretti et al., 2011), che rappresenta una evoluzione della tecnica PS e permette di ottenere una maggiore densità spaziale dei punti di misura anche in aree dove il segnale radar non presenta le caratteristiche di coerenza necessarie all'individuazione dei PS. Con questa tecnica vengono infatti individuate due famiglie di riflettori, ovvero i PS, le cui caratteristiche sono quelle viste in precedenza, e i DS (Distributed Scatterers), i quali non hanno una natura puntiforme ma rappresentano un gruppo di pixel adiacenti che però generano, nel loro insieme, identiche caratteristiche del segnale radar riflesso, generalmente riferibili ad aree coltivate o detritiche. Questa tecnica è utilizzata per l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite dal satellite SENTINEL-1 nel Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana trattato al paragrafo 3.2, oltre che per l'elaborazione di alcune immagini radar acquisite dalla costellazione COSMO Sky-Med per il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale trattato al paragrafo 3.1.

2.2.2. Principali limiti applicativi

I limiti principali di queste tecniche di elaborazione dell'informazione interferometrica sono invece legati alla particolare geometria di acquisizione delle immagini, alla natura delle onde elettromagnetiche utilizzate e alle caratteristiche dei PS. Per quanto riguarda il primo aspetto, dobbiamo infatti tenere presente che gli spostamenti vengono registrati lungo la linea di vista del satellite (LOS), che risulta essere orientata circa in direzione EO. Mentre tale geometria di acquisizione non comporta particolari problemi nell'analisi di movimenti prevalentemente verticali, tipo fenomeni di subsidenza del terreno, nello studio dei dissesti franosi, dove la componente orizzontale può assumere un carattere predominante, accade che più la direzione del movimento si discosta dalla direzione EO e più la velocità di spostamento viene sottostimata, fino ad arrivare alla situazione estrema di un movimento orizzontale con direzione NS che non viene assolutamente rilevato dal satellite.

L'altro limite della tecnica interferometrica è invece dovuto al fatto che se la differenza di cammino ottico tra due successive acquisizioni risulta essere maggiore o uguale ad un quarto della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica utilizzata, o ad un suo multiplo, nel generale l'interferogramma si perde il contributo intero della fase e lo spostamento viene sottostimato. Questo fenomeno, denominato "equivocazione di fase", fa sì che tra due successive acquisizioni sia possibile esaminare in modo soddisfacente solamente movimenti relativamente lenti che, considerate le lunghezze d'onda generalmente utilizzate, risultano caratterizzati da velocità medie di spostamento in direzione LOS minori di 5-6 cm/anno e spostamenti relativi tra due acquisizioni minori di 1 cm (per ERS ed ENVISAT). Nel caso di fenomeni franosi risultano quindi monitorabili in modo efficace fenomeni di scivolamento e colamento lento, mentre fenomeni di crollo-ribaltamento o colate rapide non possono essere esaminati in maniera soddisfacente. Viste le basse velocità di movimento risultano inoltre ben rilevabili fenomeni di subsidenza e segni precursori di sprofondamenti catastrofici tipo Sinkholes.

Infine, considerata la natura dei PS e la geometria di acquisizione dei satelliti, tale tecnica risulta limitata dall'assenza di misure in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno.

3. Distribuzione spaziale e temporale dei prodotti interferometrici PSInSAR

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche interferometriche avanzate permettono di ottenere migliori risultati di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire l'evoluzione temporale degli spostamenti su un periodo molto esteso.

In Figura 6 vengono riportati i periodi di acquisizione dei principali sistemi radar satellitari, da cui possiamo vedere che esiste una copertura storica delle immagini utilizzabili per elaborazioni interferometriche a partire dagli anni '90.

Nell'ambito di questo lavoro verranno considerati solamente i satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per cui sono già state effettuate e rese disponibili liberamente le elaborazioni PS sul territorio nazionale, con particolare riferimento ai prodotti elaborati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (satelliti ERS, ENVISAT e COSMO Sky-Med), trattato al successivo paragrafo 3.1, e nell'ambito del Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana (satellite SENTINEL-1), trattato al successivo paragrafo 3.2. Verrà inoltre considerato il satellite RADARSAT-1 dell'Agenzia Spaziale Canadese, in quanto utilizzato per il bacino dell'Arno relativamente al periodo di acquisizione 2003-2007.



Pag. 65 di 118 Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

Relativamente a questi satelliti, in Tabella 1 vengono riportati i valori angolari medi che ne definiscono la geometria di acquisizione, ottenuti dalle coperture spaziali dei dataset PS ricadenti nel territorio del Distretto Appennino Settentrionale e dedotti dalle coordinate del versore di puntamento (LOS) definite nei metadati di ogni cluster PS.

Tabella 1 – Valori medi dei parametri di azimut e off-nadir per alcuni sistemi SA satellitari relativamente al Distretto Appennino Settentrionale

satellite	azimut	off-nadir
ERS	+/- 11°	+/- 23°
ENVISAT	+/- 13°	+/- 22°
RADARSAT-1	+/- 11°	+/- 32°
COSMO-SM	+/- 10°	+/- 34°
SENTINEL-1	+/- 10°	+/- 38°

Per verificare l'applicabilità delle tecniche interferometriche avanzate all'analisi delle problematiche ambientali sono stati realizzati diversi progetti, sia a livello nazionale che europeo, che hanno evidenziato la qualità e consistenza dei dati interferometrici, dimostrando che tali tecniche costituiscono sicuramente un valido supporto a metodi di monitoraggio tradizionali nello studio dei fenomeni franosi, quali GPS e livellazione topografica, e ne costituiscono in molti casi una valida alternativa. L'Autorità di Bacino del fiume Arno ha partecipato, in particolare, al progetto SLAM (Service for Landslide Monitoring) finanziato dall'ESA, dove e stata testata sia un'applicazione a livello di bacino idrografico dei dati interferometrici registrati dai satelliti ERS1 e ERS2 nel periodo 1992-2000 per il supporto alla realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi, sia l'utilizzo delle serie storiche di spostamento registrate mensilmente dai satelliti per effettuare un monitoraggio dell'evoluzione dei dissesti.

3.1. Il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PSTA)

Le forti potenzialità dell'interferometria radar satellitare ha portato il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ad effettuare un consistente investimento in queste tecnologie, inserendo nel "Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale" (PST-A), istituito ai sensi dell'art. 27 della legge 179 del 31 luglio 2002, anche l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite su tutta Italia dai satelliti ERS1 e ERS2 nel periodo 1992-2000 e dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010, oltre all'elaborazione di alcune immagini acquisite dal sistema satellitare COSMO Sky-Med nel periodo 2011-2014.

I satelliti ERS ed ENVISAT hanno acquisito immagini radar in banda C, con frequenza pari a 5.3 GHz e, conseguentemente, lunghezza d'onda uguale a 5.66 cm. Le orbite sono eliosincrone, leggermente inclinate rispetto ai meridiani, la LOS risulta perpendicolare alla traiettoria del satellite e inclinata mediamente di un angolo di circa 23° (off-nadir) rispetto alla verticale. Il periodo di rivisitazione è di 35 giorni. Lo spostamento massimo rilevabile tra due acquisizioni è circa 1 cm, mentre la velocità media misurabile è di circa 5-6 cm/anno.

La costellazione COSMO-SkyMed è costituita da quattro satelliti che acquisiscono immagini in banda X, con frequenza compresa tra 8 e 12.5 GHz e quindi lunghezza d'onda tra 3.75 e 2.4 cm. Il tempo di rivisitazione è di 16 giorni, anche se l'uso combinato dei quattro satelliti può permettere di ottenere una frequenza di rivisitazione più elevata.



Figura 7 – Copertura nazionale delle elaborazioni PS effettuate nell'ambito del PST-A

Le immagini acquisite in banda X possiedono maggiori difficoltà di acquisizione in aree vegetate rispetto alla banda C a causa della minore lunghezza d'onda. Peraltro, tali sistemi permettono di ottenere una maggiore precisione nella stima delle deformazioni e sono progettati in modo da avere un tempo di rivisitazione più ridotto, diminuendo quindi i fenomeni di decorrelazione temporale. Inoltre, la minore lunghezza d'onda accentua anche i problemi legati all'equivocazione di fase visti al paragrafo 2.2.2, anche se il minore tempo di rivisitazione limita in parte questo inconveniente.

In Figura 7 viene riportata la copertura nazionale delle elaborazioni PS effettuate nell'ambito del PST-A relativamente ai tre satelliti di riferimento.

I valori di velocità media nei periodi di riferimento dei tre satelliti, opportunamente classificati, sono forniti come servizi WMS del Geoportale Nazionale, mentre le coperture a livello nazionale dei rispettivi dataset sono disponibili come servizi WFS. I dataset puntuali dei singoli PS, riportanti sia velocità medie che serie storiche degli spostamenti, possono essere infine richiesti in formato vettoriale tramite il Geoportale Nazionale.

La disponibilità di questi dati a scala nazionale fornisce sicuramente un valido strumento di supporto alla identificazione e monitoraggio delle aree ad elevato rischio idrogeologico, utilizzabile sia dalle Pubbliche Amministrazioni che da professionisti.

Per i tre satelliti considerati, il database nazionale del Ministero con i dati PS contiene le seguenti informazioni:

САМРО	DESCRIZIONE
CODE	codice identificativo del punto di misura;
VEL	velocità media del PS lungo la LOS espressa in mm/anno e riferita all'intero periodo di acquisizione considerato e valutata rispetto al reference point;
V_STDEV	valore di deviazione standard della velocità, che indica di quanto la stima della velocità vibra rispetto al punto di riferimento;
COHERENCE	indice che misura l'accordo tra i dati e il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi; è variabile tra 0 (nessun accordo con il modello) e 1 (elevato accordo con il modello);
V_aaaa	velocità media del PS nell'anno indicato (aaaa) espressa in mm/anno e valutata rispetto al reference point.
VSTD_aaaa	deviazione standard della velocità del PS nell'anno considerato (aaaa);
D_aaaammgg	iporta il valore di spostamento relativo del PS (mm) rispetto alla prima immagine per ogni data di acquisizione considerata, espressa in anno (aaaa), mese (mm), giorno (gg).

3.2. Il Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana

Nell'ambito dell'accordo stipulato, ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 6 della legge 24 febbraio 1992, n. 225, con il Dipartimento della Protezione civile della Presidenza del Consiglio dei ministri e la Regione Toscana, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze sta effettuando un monitoraggio in continuo delle deformazioni del terreno del territorio regionale toscano tramite interferometria radar satellitare.

Le immagini radar utilizzate in questo programma sono quelle acquisite dalla costellazione di satelliti SENTINEL-1 a partire dall'ottobre 2014 sull'intero territorio regionale e sono state elaborate secondo la tecnica SqueeSAR vista al paragrafo 2.2.1.

La costellazione SENTINEL-1 opera in banda C, con frequenza pari a 5.4 GHz e conseguentemente lunghezza d'onda uguale a 5.6 cm. Il tempo di rivisitazione e di 6-12 giorni.

Poiché per evitare equivocazioni di fase è necessario che lo spostamento massimo tra due successive acquisizioni non sia superiore ad un quarto della lunghezza d'onda, ne consegue che il massimo spostamento rilevabile tra due successive acquisizioni risulta essere di circa 1.4 cm, mentre la massima velocità media misurabile risulta di circa 80 mm/anno.



Figura 8 - Copertura regionale delle elaborazioni SqueeSAR effettuate nell'ambito del programma di Monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana

In Figura 8 viene riportata la copertura regionale delle elaborazioni PSInSAR effettuate nell'ambito del Piano di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana relativamente ai satelliti SENTINEL-1. Il database della Regione Toscana con i dati PS contiene, in particolare, le seguenti informazioni.

САМРО	DESCRIZIONE
CODE	codice identificativo del punto di misura;
HEIGHT	quota del punto estratta dal modello digitale del terreno utilizzato per l'elaborazione delle immagini radar;
EFF_AREA	nel caso di PS tale valore è uguale a zero, mentre nel caso di DS corrisponde alla superficie, espressa in mq, a cui tale punto si riferisce;
VEL	velocità media del PS lungo la LOS espressa in mm/anno e riferita all'intero periodo di acquisizione considerato e valutata rispetto al reference point;
V_STDEV	valore di deviazione standard della velocità, che indica di quanto la stima della velocità vibra rispetto al punto di riferimento;
H_STDEV	stima dell'errore, espresso in m, nella definizione della quota del punto considerato;
COHERENCE	indice che misura l'accordo tra i dati e il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi; è variabile tra 0 (nessun accordo con il modello) e 1 (elevato accordo con il modello);
V_aaaa	velocità media del PS nell'anno indicato (aaaa) espressa in mm/anno e valutata rispetto al reference point.
VSTD_aaaa	deviazione standard della velocità del PS nell'anno considerato (aaaa);
D_aaaammgg	riporta il valore di spostamento relativo del PS (mm) rispetto alla prima immagine per ogni data di acquisizione considerata, espressa in anno (aaaa), mese (mm), giorno (gg).

I dataset ascendenti e discendenti con copertura regionale possono essere scaricati liberamente insieme ad una breve guida illustrativa che permette di comprenderne meglio il significato e i principali limiti applicativi della tecnica interferometrica utilizzata. E' Inoltre disponibile un progetto webgis che permette la visualizzazione diretta dei valori di velocità media annua dei PS-DS con possibilità di esaminare le serie storiche degli spostamenti e di effettuare analisi di massima a scala locale e regionale.

3.3 European Ground Motion Service (EGMS)

Il servizio europeo per l'analisi dei movimenti del suolo (EGMS) fa parte dei prodotti Copernicus previsti dal programma spaziale dell'Unione Europea. Le tecniche interferometriche satellitari utilizzate come base per l'EGMS fanno riferimento al gruppo delle tecniche interferometriche avanzate (A-DInSAR) illustrate nelle linee generali al paragrafo 2.2. Questo servizio ha la caratteristica unica di essere distribuito su tutto il territorio europeo, permettendo così di fare analisi omogenee a qualsiasi livello di aggregazione spaziale nell'ambito dei paesi partecipanti al progetto Copernicus.

Il sistema satellitare utilizzato per questo servizio è la costellazione Sentinel-1 operante in banda C, con tempo di rivisitazione di 6 giorni (da ottobre 2016 ad oggi) o di 12 giorni (fino a ottobre 2016). I principali prodotti messi a disposizione dall'EGMS sono distribuiti su tre livelli:

Livello 2a: è il prodotto "Base" e fornisce la velocità di deformazione e le serie temporali di deformazione misurate nella direzione della LOS, sia in geometria ascendente che discendente. Ciascun frame presenta un punto di riferimento indipendente per le misurazioni della deformazione (reference point), risultando così particolarmente adatto allo studio dei fenomeni deformativi locali. Questo prodotto viene generato utilizzando le immagini Sentinel-1 alla massima risoluzione.

Livello 2b: Il secondo livello fornisce il prodotto cosiddetto "Calibrato", dove i frame del precedente livello 2a sono stati mosaicati e ancorati ad un modello di deformazione derivato da serie temporali dei sistemi satellitari di navigazione globale (GNSS). Come nel Livello 2a, le misure di deformazione sono riferite alla direzione della LOS, sia in geometria scendente che discendente, ma a differenza del livello 2a i dati non sono riferiti ad un sistema di riferimento locale ma ad un sistema di riferimento assoluto (ETRS 89).

Livello 2c: Il terzo prodotto è il prodotto cosiddetto "Ortho", il quale offre informazioni più avanzate, ovvero le componenti di deformazione orizzontale Est-Ovest e verticale Up-Down. Questo livello è stato ottenuto combinando le informazioni dei dati ascendenti e discendenti del livello 2b secondo celle con lato di 100 m, utilizzando una procedura coerente con quella illustrata al paragrafo 4.3. Ovviamente questo livello presenta una minore risoluzione spaziale rispetto ai prodotti precedenti.

I dati vettoriali a geometria puntuale messi a disposizione dal servizio sono forniti nel sistema di coordinate piane ETRS89 con proiezione azimutale equivalente di Lambert (ETRS89-LAEA) oppure, nel caso dei livelli 2a e 2b, anche nel sistema di coordinate geografiche WGS84. Le celle utilizzate nei prodotti di livello 2c per il ricampionamento dei dati ascendenti e discendenti, essendo generate nel sistema di coordinate piane ETRS89-LAEA, se riproiettate possono essere soggette a distorsioni geometriche e i corrispondenti dati di deformazione del terreno devono pertanto essere ricampionati.

Informazioni più dettagliate sulle caratteristiche e potenzialità dei prodotti EGMS possono essere reperite direttamente sul sito web del servizio al seguente indirizzo:

https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service

Tutti i prodotti disponibili vengono forniti insieme a una varietà di attributi. Queste informazioni sono indispensabili per la valutazione della qualità e delle incertezze dei prodotti EGMS e aiutano l'utente nella comprensione e nell'analisi dei prodotti. Di seguito sono riportati tutti gli attributi essenziali insieme ad una spiegazione pratica del loro significato e utilizzo. Per una descrizione dettagliata di tutti gli attributi per prodotto si rimanda comunque alla letteratura tecnica sopra menzionata.

ATTRIBUTO	DESCRIZIONE
PID	codice identificativo del punto di misura (MP);
MP_TYPE	fornisce all'utente informazioni sul fatto che il movimento del suolo di un determinato MP sia da riferire ad un diffusore persistente (PS) o ad un diffusore distribuito (DS). In particolare, se l'area (espressa in mq) è uguale a zero allora l'informazione è da riferire ad un PS, se invece l'area è maggiore di zero l'informazione deve essere attribuita ad un DS derivato da una superficie corrispondente a quella indicata. Questo attributo è disponibile per i prodotti Base e Calibrati;
TEMPORAL COHERENCE	coerenza temporale, indica la stabilità delle caratteristiche di riflessione del punto nelle serie temporali. Rappresenta quindi una misura di qualità o affidabilità della misurazione. Per il prodotto EGMS Ortho, la coerenza temporale deriva dalla coerenza media degli MP di input di una cella della griglia. In generale la coerenza viene calcolata in termini di coefficiente di correlazione compreso tra 0 e 1. I pixel con valori di coerenza bassi, ovvero inferiori a 0.5, sono solitamente esclusi dall'elaborazione dei dati. L'utente può considerare questo attributo come una misura di qualità che consente all'utente di filtrare i prodotti in base ai valori di coerenza, ad esempio analizzando e visualizzando solo MP con una coerenza \geq 0,8. Questo attributo è disponibile per i prodotti Base e Calibrati;
RMSE	errore quadratico medio, errore residuo o variazione dello spostamento nella serie storica in mm. Rappresenta una misura della precisione dello spostamento. Questo attributo è disponibile per i prodotti Base, Calibrati e Ortho;
MEAN_VELOCITY	descrive la velocità media del PM (mm/anno) valutata sull'intera serie temporale dopo avere applicato un modello di regressione di un polinomio del primo ordine senza considerare accelerazioni o tendenze stagionali misurate nell'arco temporale della serie storica. La velocità viene calcolata rispetto alla LOS per EGMS Base e Calibrati; valori positivi indicano un movimento verso il satellite, mentre valori negativi indicano un movimento in allontanamento. La velocità media per i prodotti Ortho rappresenta invece il movimento nelle direzioni verticale up-down o orizzontale est-ovest. Questo attributo è disponibile per i prodotti Base, Calibrati e Ortho;
ACCELERATION	descrive l'accelerazione media annua (mm/annoq) valutata sull'intera serie temporale dopo avere applicato un modello di regressione di un polinomio del secondo ordine più una componente stagionale sinusoidale. Questo attributo è disponibile per i prodotti Base, Calibrati e Ortho;
SEASONALITY	stagionalità, caratterizza l'entità dello spostamento stagionale nel periodo di un anno. L'oscillazione stagionale è un segnale sinusoidale nelle serie temporali di spostamento che risulta da processi ciclici nel corso dell'anno. L'entità di questa oscillazione dipende dalle caratteristiche della superficie dell'oggetto e dalla sua risposta alla variazione di temperatura. Negli scenari realistici i valori della stagionalità di un PS si trovano nell'intervallo tra 5 mm e 10 mm. Disponibile per il prodotto Base, Calibrati e Orto;
YYYYMMDD	questa serie di attributi descrive lo spostamento di un PS (o DS) riferito alla prima data di acquisizione SAR. Viene fornita una registrazione della storia completa degli spostamenti per ciascun MP durante il periodo di campionamento temporale. Dalla storia dello spostamento è quindi possibile visualizzare e ricavare statisticamente il segnale stagionale, l'andamento lineare o l'accelerazione a partire da una determinata data. Disponibile per il prodotto Base, Calibrato e Orto;
INCIDENCE_ANGLE	Off-Nadir, angolo di incidenza della LOS rispetto alla verticale (°). Questo attributo è disponibile per i prodotti Base e Calibrati;
TRACK_ANGLE	Azimut, angolo tra la proiezione della traiettoria del satellite sul piano orizzontale e il nord
Questi ultimi due parametri risultano molto importanti in quanto sono alla base della definizione delle componenti orizzontale (EW) e verticale (UD) del vettore spostamento o velocità media nel piano EWUD (vedi paragrafo 4.3).

4. Utilizzo ed elaborazione dei dati interferometrici PsInSAR

4.1. Introduzione

Come accennato al paragrafo 2.2.1, i valori di posizione, spostamento e velocità media attribuiti ai singoli PS vengono stimati attraverso elaborazioni statistiche rispetto ad un punto di riferimento supposto stabile. A tali valori può quindi essere associato un errore (deviazione standard) che ci indica di quanto vibra la stima del parametro considerato rispetto al punto di riferimento stesso. La deviazione standard dipende dalla distanza da punto di riferimento, tendendo ad aumentare allontanandosi da esso.

Nel caso della velocità media, il limite di sensibilità della tecnica interferometrica è stimabile in circa +/- 2 mm/anno, per cui i PS che presentano valori di velocità compresi in tale intervallo possono essere considerati stabili, ovvero non adeguatamente risolvibili con tale tecnica di analisi.

Dobbiamo inoltre tenere presente che la velocità media dei PS corrisponde al coefficiente angolare della retta di regressione lineare degli spostamenti registrati alle diverse date di acquisizione su tutto il periodo di analisi. Per tale motivo, risulta sempre molto utile verificare l'effettiva linearità della serie storica degli spostamenti in modo da valutare meglio l'affidabilità della stima. La struttura dei dati, tra l'altro, permette di assegnare agevolmente, tramite un qualsiasi foglio di calcolo, il valore del coefficiente di regressione lineare ad ogni PS individuato; tanto più tale coefficiente risulterà inferiore a uno e tanto maggiore sarà lo scostamento dal trend lineare. Oltre all'affidabilità del valore di velocità media assegnato, questa verifica permette anche di individuare agevolmente quei PS che presentano tendenze deformative marcatamente non lineari, che potrebbero essere dovuti ad improvvise variazioni di velocità durante il periodo di analisi.

Come visto al paragrafo 1, la stima della velocità media di una certa area può essere effettuata, dove ovviamente le condizioni topografiche lo consentono, sia in modalità ascendente, ovvero osservando la scena da ovest verso est, sia in modalità discendente, ovvero osservando la scena da est verso ovest. I vettori velocità e spostamento relativo assegnati ai singoli PS nelle due geometrie sono orientati lungo la rispettiva linea di vista del satellite e possono trovarsi in condizione di allontanamento o avvicinamento rispetto ad esso. Quando si avvicinano, al modulo viene convenzionalmente assegnato segno positivo, mentre se si allontanano il segno è negativo.

L'esame congiunto delle due set di valori di velocità per una stessa area ci permette quindi di capire subito se la componente prevalente del movimento è verticale o orizzontale. Nel primo caso, infatti, registreremo due set di valori di velocità media molto simili tra loro, sia come modulo che come verso, mentre nel caso di moto orizzontale i vettori avranno valore assoluto del modulo molto simile ma segno opposto.

Oltre all'esame congiunto dei dataset acquisiti nelle due geometrie risulta infine molto importante analizzare la distribuzione spaziale dei dati puntuali alla piccola/media scala, in modo da valutare meglio se i movimenti registrati sono da riferire al terreno d'imposta dei bersagli radar oppure alle loro caratteristiche strutturali.

Nei paragrafi che seguono vengono riportate alcune metodologie di analisi che possono essere utili per verificare gli elementi sopra esposti.

4.2. Valutazioni sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come abbiamo visto, i valori di velocità registrati dai PS lungo la LOS sono solamente una componente della velocità reale in una determinata area. In generale, visto che la componente di velocità registrata dal satellite (Vasc o Vdesc) corrisponde alla proiezione della velocità reale (Vreale) lungo la LOS, risulta che la stima del valore di velocità varia come il coseno degli angoli A e B tra la LOS (discendente o ascendente) e direzione di puntamento del vettore (Vreale), come mostrato in Figura 9. Il coseno degli angoli A e B, essendo dato dal rapporto rispettivamente tra Vdesc o Vasc e Vreale, corrisponde infatti alla frazione di movimento reale che viene registrato nella rispettiva direzione di osservazione.

In generale, per verificare l'effettiva componente del movimento reale che viene registrata lungo le LOS ascendente e discendente, conviene esprimere l'orientamento del vettore spostamento reale in termini di "esposizione" e "inclinazione", come definiti di seguito, in modo poi da confrontarli direttamente con i corrispondenti parametri geometrici del versante analizzato nell'ipotesi di movimento lungo la linea di massima pendenza.



Figura 9 – Definizione degli angoli A e B tra vettore spostamento reale (Vreale) e LOS discendente e ascendente

Facciamo riferimento alla Figura 10, dove viene individuato l'angolo A tra la velocità reale (Vreale) e il corrispondente valore registrato lungo la LOS discendente (Vdesc), ipotizzando che la traiettoria del satellite coincida con la direttrice N-S.



Figura 10 – Schematizzazione del rapporto tra sistema di riferimento geografico (E-N-Z) e sistema satellitare in geometria discendente (ndesc-N-LOSdesc)

In questa ricostruzione possiamo individuare due sistemi di riferimento, ruotati tra loro di un angolo V corrispondente all'inclinazione del satellite rispetto alla verticale.

Il primo sistema di riferimento, che si riferisce ai tre assi EST, NORD e ZENIT, ci permette di esprimere le coordinate del vettore Vreale in termini di esposizione (esp), ovvero angolo tra N e proiezione di Vreale sul piano orizzontane (OC), variabile tra 0° e 360° in senso orario partendo da N, ed inclinazione (inc), cioè l'angolo che Vreale forma con la sua proiezione sul piano orizzontale (OC), variabile tra 0° e +/- 90° a seconda che si trovi rispettivamente nel settore con Z positivo o in quello con Z negativo.

Rispetto al primo sistema di riferimento possiamo scrivere:

OC = OP*cos(inc)

e (coordinata est) = OE=OC*sen(esp)

```
z (coordinata zenit) = OP*sen(inc)
```

quindi:

e = OP*cos(inc)*sen(esp)

z = OP*sen(inc)

Il secondo sistema di riferimento, che si riferisce invece ai tre assi ndesc (perpendicolare alla LOS desc), NORD e LOS desc, ci permette di esprimere le coordinate del vettore Vreale in funzione dell'angolo A definito precedentemente:

OK = OP*sen(A)

e1 (coordinata ndesc) = OI = OK*sen(B)

z1 (coordinata LOS desc) = OL = OP*cos(A)

quindi:

e1 = OP*sen(A)*sen(B)

z1 = OP*cos(A)

Applichiamo ora la formula di corrispondenza delle coordinate per la rotazione di un angolo V (negativo per ascendenti e positivo per discendenti) tra i due sistemi di riferimento, in modo da esprimere la coordinata z1 (sistema solidale con il satellite) in funzione delle coordinate e-z (sistema orientato secondo i punti cardinali):

 $z1 = e^*sen(V) + z^*cos(V)$

OP*cos(A) = OP*cos(inc)*sen(esp)*sen(V) + OP*sen(inc)*cos(V)

Da cui si ricava:

cos(A) = cos(inc)*sen(esp)*sen(V) + sen(inc)*cos(V)

Questa funzione è stata ottenuta ipotizzando una traiettoria del satellite coincidente con la direttrice N-S, ma può essere facilmente adattata alla traiettoria reale effettuando semplicemente una traslazione dei valori di esposizione coerentemente con l'angolo che essa forma con il nord. Quindi, indicando con H l'angolo che la traiettoria forma con il nord (negativo per ascendenti e positivo per discendenti) otteniamo:

cos(A) = cos(inc)*sen(esp-H)*sen(V) + sen(inc)*cos(V)

Le considerazioni svolte in riferimento alla Figura 7c portano ad ottenere valori positivi di cos(A), ovvero A minore di 90°, per inclinazioni con componente verticale verso lo zenit. Nel caso di movimenti franosi, dove la componente verticale è generalmente verso il nadir, si usa esprimere il coseno dell'angolo supplementare rispetto all'angolo A definito in Figura 10. Indicando tale angolo come C (=180-A) otteniamo:

cos(C) = -cos(inc)*sen(esp-H)*sen(V) - sen(inc)*cos(V)

In Figura 11 viene riportata la percentuale del valore di velocità reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente dei satelliti ERS e SENTINEL-1 per alcuni valori d'inclinazione del vettore (Vreale) in funzione della sua esposizione, tenendo conto della traiettoria reale dei satelliti (+/- 10°N). In generale possiamo osservare che le percentuali di stima più alte si ottengono per elevati angoli d'inclinazione, visto che entrambi i satelliti hanno un angolo di off-nadir inferiore ai 45° (23° per ERS e 38° per SENTINEL-1). La minore inclinazione della LOS di SENTINEL-1 permette peraltro di risolvere meglio di ERS i moti suborizzontali, anche se la percentuale di stima rimane comunque relativamente bassa. Quando l'inclinazione del vettore (Vreale) è uguale a quella della LOS (67° per ERS e 52° per SENTINEL-1), la percentuale di stima raggiunge il 100% per valori di esposizione pari a 80° (90°-10°) in modalità discendente, ovvero quando il vettore (Vreale) risulta

parallelo alla LOS. Quanto, infine, l'inclinazione del vettore (Vreale) è uguale a 90°, la percentuale di stima rimane ovviamente costante indipendentemente dall'esposizione, risultando pari al 92% per il satellite ERS e al 79% per il satellite SENTINEL-1.



Figura 11 – percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente (satelliti ERS e SENTINEL-1) per alcuni angoli di inclinazione in funzione dell'esposizione

4.3. Ricostruzione del vettore velocità media nel piano EWUD

Se consideriamo il valore del vettore velocità media annua registrato lungo la LOS, come mostrato in figura 11b per la geometria di acquisizione ascendente (Va), è possibile determinare le sue due componenti cartesiane nel sistema di riferimento EST-WEST-UP-DOWN (EWUD), ovvero nel piano verticale contenente la direzione EW, nel seguente modo:

xa = componente lungo asse EW = -Va*Sin (ONa)*Cos (Aa) ya = componente lungo asse UD = Va*Cos (ONa)

Dove ONa = Off-Nadir (°) ascendente, Aa = Azimut (°) ascendente e Va = velocità media registrata lungo la LOS ascendente.



Figura 11b - Ricostruzione del vettore velocità media nel sistema geografico EW-NS-UD

Con riferimento alla figura 12, se determiniamo le coordinate nel piano EWUD sia per il vettore Va-ewud (xa, ya) in geometria ascendente che per il vettore Vd-ewud (xd, yd) in geometria discendente, possiamo ottenere le coordinate del vettore risultante V-ewud (E, U), ovvero le sue componenti cartesiane nel piano EWUD, tramite l'intersezione delle due rette passanti per gli estremi dei vettori Va-ewud e Vd-ewud e ad essi perpendicolari:

Retta perpendicolare a Va-ewud: U = -xa/ya*E + xa2/ya + yaRetta perpendicolare a Vd-ewud: U = -xd/yd*E + xd2/yd + yd

Troviamo le coordinate del punto d'intersezione V-ewud (E;U): -xa/ya*E + xa2/ya + ya = -xd/yd*E + xd2/yd + yd

Quindi:

```
E = (xd2/yd + yd - xa2/ya - ya) / (xd/yd - xa/ya)
U = -xa/ya* (xd2/yd + yd - xa2/ya - ya) / (xd/yd - xa/ya) + xa2/ya + ya
```

Dove: xa = -Va*sin (ONa) *cos (A) ya = Va*cos (ONa) xd = -Vd*sin (ONd) *cos (Ad) yd = Vd*cos (ONd)

coordinata E del vettore Va-ewud coordinata U del vettore Va-ewud coordinata E del vettore Vd-ewud coordinata U del vettore Vd-ewud

Pag. 78 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

Ovviamente, nel caso Va = 0 (xa = 0, ya = 0) le componenti E-U corrisponderanno ai soli valori xd e yd, mentre nel caso risulti Vd = 0 (xd = 0, yd = 0) le componenti E-U corrisponderanno ai soli valori xa e ya.



Figura 12 – Ricostruzione del vettore velocità media nel piano EWUD

Il modulo del vettore risultante (V-ewud), ottenuto dalla combinazione dei dati ascendenti e discendenti nel piano EWUD, può essere determinato tramite le sue componenti cartesiane:

 $|V-ewud| = sqr(E^2+U^2)$

Per quanto riguarda il verso del vettore V-ewud, risulta molto agevole esprimerlo come l'angolo (α) che esso forma con la direzione positiva dell'asse UD, variabile tra 0° e 360°. In questo modo se il vettore è orientato nel primo quadrante (U-E) l'angolo α risulterà variabile tra 0° e 90°, nel secondo quadrante (E-D) tra 90° e 180°, nel terzo quadrante (D-W) tra 180° e 270° e nel quarto quadrante (W-U) tra 270° e 360°. Per effettuare questa operazione è innanzi tutto necessario calcolare l'angolo γ = arctan (U/E) e quindi determinare l'angolo α sopra definito nel seguente modo:

se E > 0; α = 90°- γ se E < 0; α = 270°- γ

La procedura fino a qui illustrata per la ricostruzione del vettore velocità media nel piano EWUD (V-ewud) può essere applicata direttamente ai vettori spostamento registrati ad ogni data di acquisizione, in modo poi da rideterminare la velocità media utilizzando l'intera serie storica degli spostamenti, come accennato al paragrafo 4.1.

Come possiamo osservare in Figura 13, nel caso di un moto puramente orizzontale risulterà che i vettori ascendente e discendente proiettati nel piano EWUD, denominati rispettivamente Va-ewud e Vd-ewud, presenteranno lo stesso modulo ma segno opposto, mentre nel caso di moto puramente verticale avranno sia lo stesso modulo che lo stesso segno, ovvero risulteranno entrambi negativi nel caso di sprofondamenti, oppure entrambi positivi nel caso di sollevamenti.

In generale, se l'angolo α sarà compreso tra 45° e 135° oppure tra 225° e 315°, stiamo osservando un fenomeno caratterizzato da una principale componente orizzontale, rispettivamente verso est o verso ovest, come nel caso di movimenti franosi. Nei restanti intervalli angolari siamo invece in presenza di fenomeni con principale

componente verticale, riconducibili in particolare a fenomeni di sollevamento, se l'angolo varia tra 0° e 45° oppure tra 315° e 360°, o a fenomeni di subsidenza, se l'angolo è compreso tra 135° e 225°.

Visto che difficilmente i singoli PS avranno la stessa posizione nelle due geometrie ascendente e discendente, per ricostruire il vettore spostamento nel piano EWUD dobbiamo prima effettuare una generalizzazione dei valori registrati in modo da rendere i dati dei due dataset tra loro confrontabili. A tal fine è utile considerare una griglia di ricampionamento con maglia quadrata e dimensioni adeguate alla distribuzione spaziale dei valori di velocità, per poi assegnare al centro di ogni cella il valore medio di velocità di tutti i PS che vi ricadono all'interno. Utilizzando la stessa griglia sia per il dataset ascendente che per quello discendente sarà poi possibile confrontare tra loro i risultati ottenuti per uno stesso punto ed effettuare le operazioni necessarie alla ricostruzione del vettore risultante nel piano EWUD.

Non sempre risulta possibile ricostruire il vettore EWUD, perché non è detto che le aree osservate vengano adeguatamente risolte nelle due geometrie di acquisizione, ma dove è possibile è sempre bene procedere a questa ricombinazione in modo da evitare una errata interpretazione del fenomeno osservato. Nel caso mostrato in Figura 12, ad esempio, se avessimo esaminato solamente il dato ascendente avremmo rilevato un fenomeno di abbassamento del terreno, mentre l'analisi congiunta delle due geometrie evidenzia chiaramente un moto prevalentemente orizzontale con componente verticale in sollevamento.



Figura 13 – Ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD nel caso di moto puramente orizzontale (a sinistra) e puramente verticale (a destra)

In ogni caso, come abbiamo visto al paragrafo 4.2, se non abbiamo informazioni a priori sulla reale geometria del movimento registrato dal satellite, le componenti cartesiane ottenute tramite la procedura sopra descritta possono risultare fortemente sottostimate, specialmente nel caso di movimenti con importante componente NS. Tale procedura consente comunque una valutazione qualitativa del fenomeno osservato, in modo da capire se si tratta di un moto prevalentemente verticale, come nel caso di un fenomeno di subsidenza del terreno, oppure se è presente anche un'importante componente orizzontale, come si verifica generalmente nell'analisi di un fenomeno franoso. Inoltre, nel caso di dissesti gravitativi di versante, l'esame congiunto dei valori di velocità rilevati nelle due geometrie ci permette di verificare la coerenza del movimento osservato con l'esposizione del versante, in modo da comprendere meglio la natura del fenomeno che stiamo analizzando.

4.4. Confronto tra velocità acquisite in periodi temporali diversi

In generale, i dati acquisiti con diversi sensori satellitari non possono essere integrati tra loro a causa delle diverse caratteristiche di acquisizione (polarizzazione, banda utilizzata, orientamento della LOS). Può comunque risultare

Pag. 80 di 118 Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024 utile effettuare dei confronti puramente qualitativi tra i trend di deformazione registrati da differenti satelliti su una stessa area, in modo da ottenere indicazioni di massima sullo stato di attività di un fenomeno in periodi temporali diversi.

Un esempio di questa tipologia di analisi è riportato in Figura 14, dove sono confrontati i valori assoluti di velocità media annua registrati dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 con quelli registrati dai satelliti RADARSAT-1 nel periodo 2003-2006, ENVISAT nel periodo 2003-2010 e SENTINEL-1 a partire dal 2014. Tale confronto ci permette di costruire una matrice di attività dove è possibile discriminare tra lo stato inattivo stabilizzato, se risultano velocità inferiori ai 2 mm/anno per tutti i satelliti considerati, e lo stato attivo, dove invece almeno uno dei satelliti considerati mostra evidenti segni di movimento. In particolare, lo stato attivo può a sua volta essere ulteriormente suddiviso in "continuo", se tutti i satelliti registrano velocità superiori ai 2 mm/anno, "sospeso", dove soltanto i dati ERS mostrano velocità superiori ai 2 mm/anno e "riattivato", dove invece i dati ERS risultano stabili ma uno o più degli altri satelliti individuano aree con velocità superiori ai 2 mm/anno.



Figura 14 – Matrice dello stato di attività ottenuta dal confronto tra velocità dei PS registrate in diversi periodi temporali

Anche in questo caso sarà molto difficile che i singoli PS rilevati da satelliti diversi occupino la stessa posizione nello spazio, quindi per confrontarli tra loro sarà necessario effettuare un ricampionamento (media dei valori) su griglia comune, come già visto al paragrafo 4.3 per la ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD. Utilizzando la stessa griglia per tutti i satelliti considerati sarà quindi possibile confrontare tra loro i risultati ottenuti per uno stesso punto ed applicare le considerazioni sullo stato di attività di Figura 14. In funzione della disponibilità dei dati sull'area in esame, il confronto potrà essere fatto sui singoli dataset ascendente e/o discendente dei diversi satelliti considerati oppure, ove possibile, direttamente sul vettore risultante nel piano EWUD.

Come detto precedentemente, questa informazione ha carattere puramente qualitativo ma può risultare particolarmente utile come supporto alla definizione dello stato di attività dei dissesti gravitativi di versante o per verificare eventuali variazioni di trend a grande scala nell'analisi dei fenomeni di subsidenza del terreno.

Peraltro, come abbiamo visto nel paragrafo 4.3 e come più volte sottolineato nei successivi paragrafi, la definizione delle aree stabili appare molto problematica e necessita di ulteriori valutazioni oltre il puro esame dei valori di velocità rilevati dai PS, che potrebbero essere fortemente sottostimati in seguito alla posizione relativa del vettore spostamento reale rispetto alla LOS.



Figura 15 – Esempio di classificazione dello stato di attività per confronto tra elaborazioni ENVISAT (2003-2010) e SENTINEL-1 (2015-2019)

In Figura 15 è riportato un esempio di classificazione dello stato di attività in un'area della pianura Firenze-Prato-Pistoia utilizzando i criteri della matrice di Figura 14. In questo esempio, in particolare, sono stati confrontati i valori di velocità ottenuti dalla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD per il satellite ENVISAT relativamente al periodo 2003-2010 con quelli ottenuti per il satellite SENTINEL-1 relativamente al periodo 2015-2019.

4.5. Definizione delle aree ad alta densità di PS (HDPSA)

Spesso risulta molto difficile, se non tramite indagini di dettaglio e verifiche di campagna, capire se lo stato di deformazione dei PS evidenziato dall'analisi satellitare sia da mettere in relazione alla natura dell'elemento riflettente o ad un fenomeno di movimento generalizzato del terreno su cui tale elemento insiste. L'analisi della distribuzione delle velocità di spostamento dei PS permette peraltro di discriminare le aree dove i movimenti risultano omogeneamente distribuiti nello spazio, e quindi più facilmente riconducibili a deformazioni generalizzate del terreno, da quelle dove invece non è possibile individuare una tendenza prevalente della deformazione, con presenza di nuvole di PS a diverso comportamento. In quest'ultimo caso risulta più probabile che i valori anomali di deformazione siano da mettere in relazione alla natura dei bersagli radar (problemi strutturali, fenomeni di assestamento, etc.), piuttosto che alla presenza di deformazioni generalizzate del terreno (dissesti gravitativi, aree in subsidenza, etc.).



Figura 16 – Schema della procedura per l'individuazione delle aree ad alta densità di PS

Un possibile approccio per discriminare questo diverso comportamento nella distribuzione delle deformazioni e, in particolare, per delimitare le aree più probabilmente interessate da dissesti gravitativi, è riportato in Brugioni et al. (2011). In questo lavoro il dato PS è stato ricampionato tramite un criterio di densità spaziale che tiene conto sia della concentrazione che dello stato di attività dei bersagli radar considerati (Figura 16).

Inizialmente tutti i PS sono stati classificati come attivi o stabili a seconda che, rispettivamente, presentassero velocità medie annue superiori o inferiori all'errore strumentale (+/- 2 mm/anno). Per ognuno di essi è stato

quindi considerato l'intorno circolare con raggio di 50 m ed è stato determinato il numero di PS attivi e stabili che vi ricadevano all'interno. I buffers ottenuti sono stati quindi classificati come aree ad alta densità di PS (HDPSA) "attive" o "stabili" a seconda che presentassero una delle seguenti caratteristiche:

• punto centrale del buffer attivo e presenza di una percentuale di PS attivi superiore al 75% e comunque non inferiore a tre (HDPSA attive).

• punto centrale del buffer stabile e presenza di una percentuale di PS stabili superiore al 75% e comunque non inferiore a tre (HDPSA stabili).

I buffers così classificati sono stati estratti, rimodellati geometricamente per meglio approssimare la distribuzione dei PS, ed infine inseriti in un unico file imponendo la sovrimposizione dei buffers attivi su quelli stabili. Tale operazione è stata effettuata sia per il dataset ascendente che per quello discendente, per poi unire le due informazioni in un unico file e classificare i poligoni risultanti come riportato in Tabella 2.

TIPOLOGIA	DESCRIZIONE	
AREE ATTIVE	Poligoni per cui almeno un dataset (asc o desc) individua HDPSA attive	
AREE STABILI	Poligoni dove entrambi i dataset (asc e desc) individuano HDPSA stabili	
	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili e l'altro	
AREE STABILI/INCERTE	dataset (desc o asc), sebbene non individui HDPSA, presenta comunque	
con evidenze di	PS, all'interno del poligono, con velocità medie superiori all'errore	
instabilità	strumentale (+/- 2 mm/anno)	
	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili e anche	
AREE STABILI/INCERTE	l'altro dataset (desc o asc), sebbene non individui HDPSA, presenta	
con evidenze di stabilità	comunque PS, all'interno del poligono, con velocità medie inferiori	
	all'errore strumentale (+/- 2 mm/anno)	
	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili, mentre	
AREE STABILI/INCERTE	l'altro dataset (desc o asc) non presenta alcun PS al suo interno	
Tabella 2 – Schema per la classificazione delle aree ad alta densità di PS		

Tramite questa procedura è quindi possibile individuare facilmente le aree soggette a movimenti generalizzati del terreno e associare a tali aree una geometria di tipo poligonale partendo da un dato di natura puntuale. Questo ci permette anche di discriminare, all'interno di aree in dissesto attive, la presenza di settori a diverso grado di stabilità in modo da definire meglio la geometria del dissesto e la sua pericolosità.

Ovviamente questo tipo d'informazione ha natura puramente qualitativa e deve necessariamente essere supportata da ulteriori analisi, mirate, in particolare, a definire le caratteristiche geologiche e morfologiche di dettaglio dell'area di studio.

La variazione spaziale dei valori di velocità registrati dai PS potrebbe infatti essere determinata, a parità di modulo del vettore reale, da variazioni locali nella direzione del movimento, oppure, in seguito alle considerazioni fatte ai paragrafi 4.2 e 5.1, a variazioni locali di pendenza ed esposizione del versante che portano a registrare una diversa componente del movimento lungo la LOS. In ogni caso dobbiamo tenere presente che il movimento rilevato lungo la LOS risulta sempre sottostimato, a meno che la direzione del movimento reale risulti parallela alla LOS stessa. Pertanto, il criterio di definizione delle HDPSA attive risulta comunque valido, avendo una natura puramente qualitativa, mentre le HDPSA stabili risultano affette da una forte incertezza. Per superare questo inconveniente è bene quindi verificare che l'area interessata da HDPSA stabili sia caratterizzata da valori di esposizione e inclinazione del versante tali da permettere di rilevare una significativa componente del movimento lungo la LOS.

4.6. Analisi delle serie storiche degli spostamenti

Le serie storiche dei valori di deformazione registrate dai satelliti ad ogni data di acquisizione delle immagini possono essere molto utili per valutare eventuali cambiamenti di trend nell'evoluzione del movimento analizzato e metterli in relazione con le possibili cause scatenanti.



Figura 17 – Esempio di variazione del coefficiente di correlazione lineare tra coppie di PS con la distanza

Come abbiamo visto al paragrafo 4.1, una prima individuazione dei PS che presentano trend deformativi chiaramente non lineari può essere effettuata tramite la definizione del coefficiente di correlazione lineare degli spostamenti nel tempo. Valori molto inferiori a 1 di tale coefficiente permettono di individuare agevolmente le situazioni più probabilmente interessate da cambiamenti di trend, che necessiteranno comunque di essere successivamente valutate nel dettaglio.

Dobbiamo peraltro tenere presente che il trend deformativo di un singolo PS generalmente non può essere considerato rappresentativo dell'andamento generale della deformazione in una certa area, visto che ogni bersaglio radar può rispondere diversamente alla stessa sollecitazione in funzione delle sue caratteristiche fisico-meccaniche.

E' possibile però realizzare un processo di aggregazione di PS vicini, che presentano simile trend deformativo, in modo da ricostruire una serie storica mediata statisticamente rappresentativa di una determinata area. Il problema principale è quello di definire la geometria dell'intorno su cui effettuare il ricampionamento e a tal fine risulta molto utile verificare come il coefficiente di correlazione lineare tra coppie di PS in una determinata area varia con la distanza.

Un esempio di tale analisi è visualizzato nei grafici di Figura 17, dove sono riportati i valori dei coefficienti di correlazione lineare tra coppie di PS in un'area campione in funzione della loro distanza. In particolare, i singoli valori di tutte le coppie di PS considerate (Figura 17 A) sono stati successivamente aggregati in intervalli di

Pag. 85 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

distanze, in modo da attribuire ad ogni intervallo la media dei coefficienti di correlazioni corrispondenti, supponendo quindi una variazione isotropa di tale parametro nello spazio (Figura 17 B).



Figura 18 – Esempio di generalizzazione di una serie storica mediando dati puntuali vicini con simile trend deformativo

Da questo grafico di esempio è possibile verificare che se per effettuare l'aggregazione delle serie storiche di PS vicini utilizziamo un intorno circolare con raggio di 50 m, il coefficiente di correlazione lineare risulta mediamente superiore a 0.7, validando l'affidabilità di tale scelta. Ovviamente, una volta definita la geometria dell'intorno di aggregazione dei PS, sarà comunque necessario scartare gli eventuali PS che presentano comportamento incoerente rispetto alla media. Questo può essere effettuato sempre tramite il confronto tra i coefficienti di correlazione lineare dei PS che ricadono in quel determinato intorno di ricampionamento.

Un esempio di ricampionamento di una serie storica di PS a simile comportamento deformativo, selezionati tramite la procedura sopra esposta, è riportato nel grafico di Figura 18.

Questa procedura risulta peraltro molto laboriosa e si presta male all'analisi dei fenomeni franosi, caratterizzati da una distribuzione piuttosto eterogenea delle deformazioni nello spazio. Nel caso di fenomeni di subsidenza, come vedremo in seguito, può invece risultare molto utile effettuare un'aggregazione di PS vicini a simile comportamento deformativo, specialmente per evidenziare una eventuale correlazione tra andamento della deformazione nel tempo e prelievi idrici su determinati pozzi di riferimento.

5. Utilizzo dei dati interferometrici PSInSAR per l'analisi di fenomeni gravitativi di versante

Come abbiamo visto al paragrafo 2.2.2, il fenomeno dell'equivocazione di fase che si verifica quando tra due successive acquisizioni si registra uno sfasamento pari ad una lunghezza d'onda o un suo multiplo, fa sì che con questa tecnica possano essere analizzati solo movimenti relativamente lenti. In particolare, quando la componente dello spostamento lungo la LOS tra due successive acquisizioni risulta maggiore o uguale a 1/4 della lunghezza d'onda utilizzata (circa 1.4 cm per i satelliti ERS ed ENVISAT), si verifica l'impossibilità di registrare lo spostamento reale e il valore di velocità misurato risulta fortemente sottostimato. In base a queste considerazioni, in Figura 19 viene riportato uno schema con l'individuazione delle tipologie di frana che, in linea generale, possono essere analizzate efficacemente con questa tecnologia.

Tipologia	Materiale	Monitoraggio tecnica PSI
Crollo	Roccia/detrito/terra	NO
Ribaltamento	Roccia/detrito/terra	NO
Scivolamento	Roccia	SI
	Detrito/terra	SI
	Roccia	SI
Colata	Terra	Parzialmente
	Detrito	NO
Espansione	Roccia/detrito/terra	Parzialmente

Figura 19 (da MINAMB, 2009) – Tipologia di frane analizzabili con tecnica PS

Inoltre, dobbiamo tenere presente che nell'analisi dei dissesti gravitativi, operando in ambienti collinari e montani, è più probabile che le immagini satellitari siano affette dai fenomeni di foreshortening, layover e shadowing visti al paragrafo 1, rendendo più difficile l'individuazione di bersagli radar stabili nel tempo. Anche per questo motivo i fenomeni di crollo, che generalmente interessano pareti sub-verticali, non sono monitorabili con tecnica PS.

Infine, sempre per le considerazioni svolte al paragrafo 1, in geometria scendente non potranno essere analizzati in modo soddisfacente i fenomeni franosi che interessano versanti esposti verso ovest, mentre in geometria discendente verranno risolti male i versanti esposti verso est. I versanti esposti a nord e a sud risultano invece visibili in entrambe le geometrie, ma i movimenti tendono ad essere fortemente sottostimati, specialmente se, come nel caso di movimenti franosi, è presente una importante componente orizzontale, come spiegato meglio nel paragrafo successivo.

5.1. Valutazione sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come visto al paragrafo 4.2, i valori di spostamento e velocità media dei PS sono misurati lungo la linea di vista del satellite (LOS) e quindi ciò che viene osservato non è lo spostamento reale del bersaglio radar ma solo la sua componente lungo tale direzione. Il valore registrato sarà tanto minore quanto più la direzione del vettore spostamento reale si discosterà dalla direzione di puntamento del sensore, fino al caso limite di moto perpendicolare alla LOS in cui lo spostamento misurato risulterà nullo.

La LOS risulta generalmente abbastanza inclinata rispetto al Piano Orizzontale (PO), pertanto i valori di velocità e spostamento registrati nel caso di movimenti con forte componente orizzontale, come nel caso di movimenti franosi, possono risultare molto sottostimati. Quindi, se i PS rilevano degli spostamenti generalizzati su una determinata area, è molto probabile che essa sia effettivamente interessata da un movimento. D'altra parte, se una certa area è caratterizzata dalla presenza diffusa di PS stabili, non è assolutamente detto che tale area sia stabile, in quanto potrebbe comunque essere interessata da spostamenti, anche importanti, le cui componenti sulle LOS ascendenti e/o discendenti risultano però molto piccole.

Nei grafici di Figura 20 (ERS) e 21 (SENTINEL-1) vengono riportati, in funzione dell'orientamento del vettore velocità reale (Vreale) come definito al paragrafo 4.2, i valori percentuali di stima registrati lungo le LOS ascendente e discendente tenendo conto della direzione di spostamento reale dei satelliti (circa +/- 10°N). In particolare, trattando di moti a carattere prevalentemente orizzontale con componente nadirale (movimenti franosi), vengono considerati solamente alcuni valori d'inclinazione variabili tra 0° e -40°.

Pag. 87 di 118

Nel caso del satellite ERS, l'elevata inclinazione sul PO della LOS (circa 67°) determina una importante sottostima del moto orizzontale, che ovviamente diminuisce all'aumentare dell'inclinazione del vettore (Vreale). Nel caso di moto puramente orizzontale (inclinazione = 0°) il valore registrato varia tra 0, quanto l'esposizione coincide con la proiezione orizzontale della LOS, al 39% del valore reale, quando l'esposizione risulta ruotata di 90° rispetto al caso precedente.

Il satellite SENTINEL-1 riesce invece a risolvere meglio questo tipo di moto in seguito alla minore inclinazione sul PO della LOS (circa 52°), permettendo, sempre nel caso di moto puramente orizzontale, di rilevare fino al 62% del valore reale.

I grafici di Figura 20 e 21 ci aiutano a capire come, nell'analisi di movimenti franosi, i valori registrati dal satellite possono risultare fortemente sottostimati rispetto ai valori reali. Inoltre, se è noto il valore del vettore (Vreale) in base ad altre tipologie di dati (inclinometrici, topografici, etc.), questo tipo di analisi ci permette di applicare i necessari coefficienti correttivi ai valori registrati dai satelliti per verificare la coerenza dei risultati ottenuti.

Inoltre, se ipotizziamo che il movimento del versante avvenga lungo la linea di massima pendenza, ovvero che il vettore spostamento presenti un valore di esposizione e inclinazione uguali a quelli del versante stesso, possiamo calcolare, per ogni possibile combinazione dei due parametri ottenuta dall'analisi di un modello digitale del terreno, la distribuzione spaziale della percentuale di stima della velocità reale effettivamente rilevata lungo le LOS ascendente e discendente.



Figura 20 – Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite ERS

Pag. 88 di 118 Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024



Figura 21 – Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite SENTINEL-1

In Figura 22 è mostrato un esempio di questa analisi per un'area ubicata in prossimità dell'abitato di Tosi nel Comune di Reggello (FI) relativamente al satellite SENTINEL-1. Come possiamo osservare, in alcune aree le velocità rilevate dal satellite risultano fortemente sottostimate rispetto alle caratteristiche del movimento ipotizzate, mentre in altre aree riusciamo ad ottenere dei valori molto prossimi a quelli reali. Dall'immagine appare peraltro evidente che le aree fortemente sottostimate in geometria ascendente (Figura 22 A) risultano risolte relativamente bene in geometria discendente (Figura 22 B) e viceversa, confermando l'importanza dell'esame congiunto dei due dataset e la loro complementarità.



Figura 22 – Esempio di andamento spaziale della percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente (A) e discendente (B) ipotizzando un movimento lungo la linea di massima pendenza ottenuta da DEM

Quindi, quando analizziamo i dati PS che interessano un movimento gravitativo di versante, risulta di fondamentale importanza confrontare il dato ottenuto dalle elaborazioni interferometriche delle immagini satellitari con la percentuale di movimento effettivamente rilevata lungo la LOS da quello specifico satellite, ipotizzando un movimento del versante lungo la linea di massima pendenza. In caso contrario, si potrebbe erroneamente attribuire uno stato "stabile" ad un movimento franoso solo perché le velocità registrate lungo la LOS rientrano nell'intervallo di sensibilità della tecnica di elaborazione (+/- 2 mm/anno), senza quindi tenere conto che la direzione di osservazione del satellite può non essere adatta a risolvere adeguatamente il moto analizzato. Tale considerazione diventa ancora più importante se l'area di analisi risulta coperta da una sola geometria di acquisizione (ascendente o discendente), per cui non è neanche possibile effettuare un'analisi congiunta dei due dataset.

A titolo di esempio, in figura 23 viene riportato il confronto tra le velocità di movimento registrate lungo le LOS ascendente e discendente del satellite SENTINEL-1 presso l'abitato di Chitignano (AR) e le corrispondenti percentuali di movimento reale che verrebbero effettivamente registrate lungo le due linee di vista nell'ipotesi

che il movimento principale avvenga lungo la linea di massima pendenza del versante. Come possiamo osservare, il dataset ascendente evidenzia velocità dei PS relativamente basse con una media uguale a 1.7 mm/anno e valori massimi, in avvicinamento, pari a 3.6 mm/anno. Il dataset discendente, al contrario, mostra evidenti spostamenti generalizzati su tutta l'area con una media pari a -6.1 mm/anno e valori massimi, in allontanamento, uguali a -8.9 mm/anno. L'esame congiunto dei due dataset mostra un movimento prevalente verso i quadranti occidentali, coerentemente con le caratteristiche morfologiche del versante analizzato. Peraltro, se osserviamo la distribuzione spaziale della percentuale di movimento rilevata lungo le LOS, possiamo vedere che mentre in geometria ascendente le caratteristiche di esposizione e pendenza del versante portano ad una forte sottostima delle velocità rilevate da satellite, con un errore medio del 70%, in geometria discendente la stima delle velocità risulta molto più affidabile, con un errore medio che si riduce a circa il 40%.

Nel caso in esame quindi, se avessimo analizzato solo il dataset ascendente, avremmo individuato un'area prevalentemente stabile con elementi di instabilità relativamente circoscritti e caratterizzati da valori di spostamento prossimi ai limiti di sensibilità della tecnica di analisi. L'esame congiunto dei due dataset e, in particolare, l'analisi della stima dell'errore associato alle LOS nel caso di movimento lungo la linea di massima pendenza, ci ha invece permesso di evidenziare un'area piuttosto estesa caratterizzata da movimenti generalizzati. Ovviamente, le ipotesi di base sulla tipologia di movimento in atto, la scelta del modello digitale del terreno da cui derivare esposizione e pendenza dei versanti e le caratteristiche geometriche di acquisizione del satellite utilizzato per l'analisi, risultano fondamentali per la corretta definizione dell'errore associato alle velocità dei PS lungo le LOS.



Figura 23 – Confronto tra valori di velocità registrati lungo le LOS ascendente (A) e discendente (B) nei pressi dell'abitato di Chitignano (AR) e le corrispondenti percentuali di movimento reale registrato ipotizzando un movimento lungo la linea di massima pendenza (Satellite SENTINEL-1)

5.2. Confronto tra dataset ascendente e discendente

L'importante componente orizzontale generalmente presente nei movimenti franosi, fa sì che i dataset ascendente e discendente di una stessa area presentino valore assoluto del modulo molto simile tra loro, ma verso (segno) opposto. Il satellite che si trova posizionato alle spalle del fenomeno osservato registrerà infatti un allontanamento (segno negativo) dei PS, mentre il satellite che si trova di fronte ne registrerà un avvicinamento (segno positivo). Inoltre, il valore assoluto di velocità media in allontanamento sarà sensibilmente più alto di quello in avvicinamento, così che il vettore risultante, oltre a risultare in uscita dal versante, presenterà anche la componente verticale verso il basso.



Figura 24 – Esempio di distribuzione statistica dei valori di velocità registrati in modalità ascendente e discendente per un'area in frana con esposizione prevalente verso est (Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile)

Nel grafico di Figura 24 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei valori di velocità registrati nelle due geometrie di acquisizione per un'area interessata da deformazioni gravitative di versante. La direzione del movimento è circa verso est, coerentemente con l'esposizione del versante, il dataset ascendente presenta valori negativi con una media pari a -4,6 mm/anno, mentre il dataset discendente presenta valori positivi con media pari a 3,5 mm/anno. Possiamo inoltre osservare che in geometria scendente i valori di velocità rilevati dal satellite risultano maggiormente distribuiti che in geometria discendente. Infatti, per le considerazioni fatte al paragrafo 1 sull'effetto di foreshortening, il versante in esame, essendo esposto prevalentemente verso est, verrà risolto meglio in geometria ascendente.

Per avere un'idea più precisa dell'informazione ottenuta dall'esame congiunto dei due dataset nelle diverse zone del versante, è possibile inoltre procedere alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD, come descritto al paragrafo 4.3. Questo ci permette, oltre alla verifica del verso di spostamento prevalente, di ottenere anche informazioni di massima sulla geometria del dissesto esaminato, come meglio specificato al paragrafo 5.5.

5.3. Individuazione delle HDPSA

Nel paragrafo 4.5 è riportato un possibile criterio per la trasformazione dell'informazione puntuale offerta dai PS in una informazione a geometria poligonale più facilmente utilizzabile nell'analisi di movimenti franosi spazialmente ben definiti. Trattandosi di analisi su dissesti gravitativi di versante, dobbiamo comunque tenere presente che le variazioni spaziali di velocità registrate dai PS potrebbero essere imputabili anche a variazioni locali della direzione del vettore spostamento reale o delle caratteristiche geometriche del versante (pendenza ed esposizione), come meglio specificato nei paragrafi 4.2 e 5.1. Per tale motivo la metodologia proposta non ha lo scopo di effettuare analisi quantitative sulle variazioni di velocità all'interno del corpo di frana, ma fornire unicamente un criterio per discriminare in maniera qualitativa i settori a diverso grado di stabilità coerentemente con le caratteristiche geologiche e morfologiche delle aree indagate.

Una applicazione di questa metodologia è riportata in Figura 25, dove sono mostrati i risultati ottenuti utilizzando i dataset ascendente e discendente del satellite ENVISAT relativamente al periodo 2003-2010.



Figura 25 – Esempio di individuazione e classificazione delle aree ad alta densità di PS

Come possiamo osservare, l'individuazione delle HDPSA permette di identificare, all'interno delle aree in dissesto, le zone con forti evidenze di movimento da quelle dove invece le elaborazioni svolte indicano la presenza di un sostanziale stato di stabilità. In questo modo è possibile individuare, all'interno di uno stesso fenomeno, le aree a maggior rischio per le strutture antropiche e la popolazione residente, offrendo un utile supporto nella definizione delle priorità d'intervento per la messa in sicurezza del territorio.

In questo esempio inoltre possiamo vedere che in alcuni casi vi è una sostanziale coerenza tra stato di attività attribuito sulla base di dati bibliografici e analisi di campagna e quello evidenziato dai dati satellitari, mentre in altre situazioni è necessario procedere ad una revisione della geometria dei dissesti o ad approfondimenti conoscitivi per l'identificazione di nuove aree non individuate nel censimento.

In Figura 26 sono riportati i risultati di un lavoro svolto dall'Autorità di Bacino dell'Arno nel 2011 finalizzato a testare l'utilizzo delle HDPSA come integrazione al censimento delle aree in dissesto di tipo tradizionale. I grafici a torta rappresentano, per ognuno dei tre stati di attività considerati nel censimento, la presenza settori a diverso grado di attività individuati con procedura HDPSA applicata ai dati derivati dai satelliti ERS, RADARSAT-1 ed ENVISAT. Come possiamo vedere, nel caso delle frane attive, l'informazione HDPSA ha permesso di discriminare settori attivi da settori stabili, con possibilità di individuare le aree a rischio idrogeologico più elevato. Per quanto riguarda invece le frane quiescenti, questa analisi ha evidenziato che circa il 30% delle aree presenta forti evidenze di instabilità, sottolineando la necessità di procedere ad una parziale revisione della geometria per la delimitazione dei settori attivi, eventualmente effettuando un confronto tra informazioni acquisite in periodi temporali distinti. Per quanto riguarda infine le frane stabilizzate, sebbene rappresentate solo dal 16% di tutti i dissesti con informazione HDPSA, circa il 40% hanno messo in risalto la presenza di aree attive, con necessità di

rivederne lo stato di attività complessivo o, eventualmente, individuare al loro interno aree potenzialmente instabili.



Figura 26 – Analisi dei settori a diverso stato di attività nelle aree in frana (2011)

Ovviamente, considerato il criterio di densità spaziale dei PS alla base della definizione delle HDPSA, la loro individuazione sarà possibile solamente in zone con rilevante presenza di strutture antropiche ad elevato potere riflettente nei confronti della radiazione radar emessa dal satellite. A titolo di esempio, sempre in riferimento al lavoro del 2011 sopra citato, il grafico di Figura 27 mostra come la percentuale di frane con informazione HDPSA sia strettamente dipendente dal numero di edifici presenti al loro interno.





Come possiamo osservare, mentre le HDPSA possono fornire informazioni utili alla caratterizzazione dei dissesti per circa il 60% delle aree in frana con almeno tre edifici al loro interno, la stessa informazione può invece essere utilizzata per circa il 93% delle frane con almeno 15 edifici, fino a interessare tutte le aree in dissesto con almeno 23 edifici.

5.4. Valutazioni sullo stato di attività

Il confronto tra valori di velocità media acquisiti per una stessa area in periodi temporali distinti, ovvero da diversi satelliti, può permettere di effettuare importanti valutazioni circa lo stato di attività del fenomeno osservato. Questo risulta particolarmente vero nel caso di fenomeni franosi, dove lo stato di attività viene generalmente utilizzato per definire la pericolosità del fenomeno e il conseguente stato di rischio per gli elementi antropici interessati.

Come visto al paragrafo 4.4, per effettuare questo confronto è innanzi tutto necessario procedere al ricampionamento su griglia comune dei dataset ascendente e/o discendente dei diversi satelliti considerati, in modo da rendere i valori di velocità media tra loro confrontabili. In Figura 28 è riportato un esempio di questa tipologia di analisi effettuata presso l'abitato di Bivigliano (FI) per confronto tra le velocità medie misurate dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 e quelle misurate dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010. In particolare, tale confronto è stato effettuato utilizzando solo il dataset discendente, visto che l'area indagata non risulta coperta dal satellite ERS in geometria ascendente (vedi Figura 11). In Figura 28 A la griglia di ricampionamento utilizzata (maglia 100 m) è stata classificata in accordo con la matrice dello stato di attività di figura 14 considerando i due satelliti di riferimento. Come possiamo osservare, le celle della matrice ci permettono di discriminare settori a diverso stato di attività e, conseguentemente, assegnare alle frane interessate da questa informazione un valore di riferimento per successivi approfondimenti d'indagine.



Figura 28 – Esempio di definizione dello stato di attività per confronto tra valori registrati in periodi temporali distinti (satelliti EER ed ENVISAT). Per spiegazione vedi testo

In Figura 28 B la stessa griglia di ricampionamento utilizzata per l'analisi viene confrontata con la mappa di distribuzione della percentuale di movimento rilevata lungo la LOS discendente, ipotizzando che lo spostamento avvenga lungo la linea di massima pendenza locale del versante (vedi paragrafo 5.1). Come abbiamo visto, considerato che il movimento rilevato lungo la LOS risulta comunque sottostimato, l'informazione qualitativa sullo stato di attività assegnata alle celle attive o quiescenti può essere considerata sufficientemente affidabile, mentre la definizione delle aree stabili necessita di verificare nel dettaglio le condizioni di pendenza ed esposizione locali. Nel caso in esame possiamo vedere che la gran parte delle celle stabili ricade in zone dove la percentuale di movimento rilevato dal satellite risulta superiore 50-60% del movimento reale e quindi l'informazione può essere considerata sufficientemente attendibile. Peraltro, alcune celle classificate come aree stabili ricadono in zone dove il movimento rilevato lungo la LOS risulta fortemente sottostimato, rendendo impossibile la conferma della loro stabilità.

5.5. Valutazioni sulla geometria del fenomeno osservato

Come abbiamo visto nel paragrafo 4.3, la ricostruzione del vettore spostamento ottenuta dall'analisi congiunta delle due geometrie di acquisizione porta ad individuare, nel caso di moti a prevalente componente orizzontale, angoli del vettore spostamento nel piano EWUD variabili tra 45° e 135° (moto verso est) oppure tra 225° e 315° (moto verso ovest). Nel caso di fenomeni franosi dobbiamo comunque tenere presente che il movimento avviene lungo una superficie di scivolamento complessa, la cui geometria si riflette sulle caratteristiche degli spostamenti registrati in superficie. Pertanto, sebbene nel suo insieme il movimento presenti una importante componente orizzontale, nelle varie zone del versante potranno verificarsi situazioni molto diverse tra loro.



Figura 29 – Andamento del vettore spostamento lungo la superficie di scorrimento nel caso di frana di scivolamento di tipo rotazionale (A) e di tipo traslazionale (B). In (C) è riportato un metodo grafico per ricostruire una superficie di scivolamento da misure di deformazione rilevate in superficie (Carter & Bentley, 1985; Cruden, 1986)

Come mostrato in Figura 29, ad esempio, uno scivolamento rotazionale sarà caratterizzato da spostamenti prossimi alla verticale nella zona di testa del corpo di frana e quasi orizzontali in corrispondenza del piede, mentre uno scivolamento traslazionale sarà caratterizzato da spostamenti circa paralleli tra loro nelle varie zone del versante. L'andamento del vettore EWUD lungo la sezione di un versante interessato da un dissesto gravitativo può quindi fornirci utili indicazioni per comprendere meglio la geometria del fenomeno analizzato.

Ovviamente dobbiamo sempre tenere presente che non necessariamente il bersaglio radar registrerà uno spostamento coerente con quello che si verifica sulla superficie di scivolamento, ma nel caso di movimenti franosi molto estesi e ad alta densità di PS è comunque possibile effettuare analisi statistiche sulla distribuzione delle direzioni di spostamento nelle diverse zone del versante che possono fornirci importanti informazioni sulla geometria del dissesto, specialmente se supportate da altre tipologie di dati.

5.6. Un esempio applicativo – DGPV nell'area di Momigno (PT)

Il versante dell'Appennino pistoiese dove è ubicato l'abitato di Momigno si trova nel Comune di Marliana (PT) ed è caratterizzato dall'affioramento della formazione del Macigno che, in quest'area, si presenta molto disturbata con forti spessori di coltri detritiche ed evidenti segni di mobilitazione. In particolare, l'area è interessata da un esteso fenomeno gravitativo, riconducibile ad una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) classificabile come scorrimento in blocco (Figura 30).



Figura 30 - Inquadramento geomorfologico dell'area interessata da DGPV nei pressi dell'abitato di Momigno (PT)

Le DGPV si prestano generalmente molto bene all'analisi tramite tecnica PSInSAR, in quanto caratterizzate da velocità medie annue molto basse. Nel caso in esame, il versante nel suo insieme presenta una esposizione verso E-SE, con una importante componente del movimento verso E, rendendo così possibile l'analisi degli spostamenti attraverso la linea di vista dei satelliti.



Figura 31 – Processo di ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD per l'area di Momigno (PT). Per spiegazione vedi testo.

In Figura 31 sono mostrati i risultati ottenuti dall'analisi delle velocità medie rilevate dal satellite RADARSAT-1 nel periodo 2003-2007 con ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD.

Il dataset ascendente registra movimenti diffusi con velocità negative (in allontanamento) variabili tra 2 e più di 20 mm/anno (Figura 31 A), mentre il dataset discendente è caratterizzato da valori positivi (in avvicinamento) variabili tra 2 e 5 mm/anno (Figura 31 C). Entrambi i dataset indicano quindi uno spostamento dell'area esaminata verso est, coerentemente con l'esposizione media del versante. La minore variabilità dei valori di velocità registrati in modalità discendente è probabilmente dovuta alla peggiore risoluzione delle immagini determinata dall'effetto di foreshortening.

Ovviamente dobbiamo sempre tenere presente che, in ogni caso, tali valori di velocità rappresentano solo la componente rilevabile lungo la LOS che, come visto al paragrafo 5.1, può risultare molto inferiore rispetto al valore reale.

Dopo questa prima analisi dei valori di velocità media annua registrati nelle due geometrie di acquisizione si è provveduto alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD secondo i criteri illustrati al paragrafo 4.3. In Figura 31 B e 31 D è riportata la griglia di ricampionamento comune con maglia di 100 m utilizzata e i risultati

Pag. 100 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

ottenuti dal processo di generalizzazione rispettivamente per il dataset ascendente e discendente, mentre in Figura 31 E e 31 F sono visualizzati i vettori risultanti nel piano EWUD.

Il processo di ricostruzione del vettore EWUD indica, per tutte le celle considerate, uno spostamento del versante verso est con valori del modulo compresi tra 2 e 20 mm/anno (media 11 mm/anno) e inclinazioni rispetto allo zenit variabili tra 90° e 125° (media 105°).

In Figura 16F sono riportati alcune sezioni verticali del versante interessato dallo studio, tracciate lungo la linea di vista del satellite (vedi Figura 31 E), su cui sono riportati i vettori velocità ricostruiti. Come possiamo osservare, le direzioni dei vettori risultano mediamente parallele tra loro, indipendentemente dalla posizione che occupano lungo il versante, facendo pensare ad un movimento a prevalente carattere traslazionale.

Supponendo quindi che si tratti di un dissesto gravitativo con componente prevalente dello spostamento parallela alla linea di massima pendenza del versante, possiamo valutare la percentuale di movimento registrato lungo le LOS ascendente e discendente secondo le considerazioni svolte ai paragrafi 4.2 e 5.1. Ipotizzando quindi una esposizione media del versante pari a 120° ed ina inclinazione di circa -20°, possiamo stimare, per il satellite RADARSAT-1 utilizzato in questa analisi, una percentuale di movimento rilevato lungo la LOS ascendente pari al 23%. Questo spiega il fatto che il valore assoluto della velocità media rilevata lungo la LOS ascendente, pari a 9.27 mm/anno, risulti superiore a quello registrato lungo la LOS discendente, pari a 9.27 mm/anno, risulti applicato il coefficiente correttivo necessario alle due velocità medie per riportarsi al 100% della stima, dovremmo ottenere due valori molto simili tra loro se le ipotesi di base sono corrette. Nel nostro caso, aumentando la velocità ascendente del 34% e la discendente del 67%, otteniamo rispettivamente un valore pari a 9.27 mm/anno e 9.87 mm/anno, con uno scarto di circa il 6% che giustifica le ipotesi sull'orientamento medio del vettore velocità.

Al fine di individuare eventuali settori a diverso grado di stabilità nell'area interessata dalla DGPV sono state delimitate le HDPSA secondo la procedura esposta al paragrafo 4.5. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 32 A, dove è possibile vedere che, sempre in riferimento ai dataset ascendente e discendente del satellite RADARSAT-1 (2003-2007), tutte le aree individuate evidenziano HDPSA attive. L'unica eccezione riguarda una piccola zona posta ad est dell'abitato di Momigno, dove i PS registrati nelle due geometrie di acquisizione presentano velocità inferiori all'errore strumentale.



Figura 32 – Individuazione delle aree ad alta densità di PS (A) e attribuzione dello stato di attività (B) per l'area interessata da DGPV presso Momigno (PT)

Si è provveduto inoltre a valutare lo stato di attività del fenomeno secondo la procedura esposta al paragrafo 4.4, confrontando in particolare i PS ottenuti dall'elaborazione dei dati RADARSAT-1 nel periodo 2003-2007 con quelli derivati dall'elaborazione dei dati ENVISAT per il periodo 2014-2018. In questo caso il confronto non è stato effettuato sui singoli dataset ascendente e/o discendente, ma direttamente sui vettori velocità risultanti nel piano EWUD visti sopra. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 32 B, dove è possibile verificare che per entrambi i satelliti i corrispondenti vettori EWUD risultano attivi, evidenziando uno strato attivo continuo su tutto il periodo di analisi.

L'analisi del coefficiente di correlazione lineare (CCL) tra coppie di PS all'interno dell'area interessata dalla DGPV ha mostrato un'ottima correlazione per tutte le coppie riguardanti il dataset ascendente (CCL medio = 0.86),

mentre per il dataset discendente i CCL sono risultati molto bassi (CCL medio = 0.47), probabilmente in relazione all'effetto di foreshortening visto precedentemente. In Figura 33 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei CCL per i due dataset ascendente e discendente.



Figura 33 – Confronto tra le distribuzioni di frequenza dei coefficienti di correlazione lineare per i dataset ascendente (sinistra) e discendente (destra) nell'area interessata dalla DGPV

Come possiamo osservare, mentre per il dataset ascendente solo il 6% delle coppie di PS presenta un CCL minore di 0.7, per il dataset discendente il CCL inferiore a 0.7 riguarda l'86% delle possibili coppie.

Considerata l'ottima correlazione delle coppie di PS in geometria ascendente, si è provato a ricostruire una serie storica dell'andamento medio della deformazione sull'intera area interessata dalla DGPV per questa geometria di acquisizione (Figura 34).



Figura 34 – Ricostruzione della serie storica degli spostamenti per l'area interessata da DGPV utilizzando il dataset ascendente

Si conferma un trend lineare degli spostamenti nel tempo con un coefficiente di correlazione molto prossimo a 1, con locali cambiamenti di trend che non sembrano essere riconducibili a variazioni nel regime pluviometrico.

6.Utilizzo dei dati interferometrici PSInSAR per l'analisi di fenomeni di subsidenza

Le considerazioni sulle velocità di deformazione fatte al paragrafo 2 rendono questa tecnica d'indagine molto utile all'analisi di fenomeni di subsidenza del terreno, caratterizzati generalmente da basse velocità di deformazione estese su lunghi periodi di tempo. Le zone soggette a subsidenza del terreno risultano inoltre generalmente localizzate in aree di pianura che, oltre ad essere esenti da fenomeni di foreshortening, layover e shadowing visti al paragrafo 1, risultano anche densamente coperte da elementi antropici capaci di riflettere stabilmente nel tempo la radiazione radar emessa dal satellite, con conseguente elevata densità spaziale di PS.

Inoltre, i fenomeni di subsidenza presentano un andamento delle deformazioni nel tempo con tendenza generalmente più lineare rispetto ai fenomeni gravitativi di versante e, di conseguenza, anche la stima della velocità media associata ai PS che, come accennato al paragrafo 4.1 corrisponde al coefficiente angolare della retta di regressione lineare degli spostamenti su tutto il periodo di analisi, risulta generalmente più affidabile. Analizzando i dati ENVISAT 2003-2010 nella pianura Firenze-Prato-Pistoia risulta infatti che, considerando i soli PS con velocità superiori all'errore strumentale, sia per il dataset ascendente che per quello discendente circa l'85% delle serie storiche degli spostamenti presenta un coefficiente di correlazione lineare superiore a 0.7.

6.1. Valutazione sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come abbiamo visto, la LOS risulta abbastanza inclinata rispetto al Piano Orizzontale, permettendo così di rilevare meglio i movimenti con prevalente componente verticale, come nei casi di rigonfiamento o subsidenza del terreno. Ovviamente anche in questi casi il movimento reale risulta sottostimato dal satellite, ma in misura minore rispetto al caso di moto orizzontale.



Figura 35 - Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite ERS



Figura 36 - Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite SENTINEL-1

Nei grafici di Figura 35 (ERS) e 36 (SENTINEL-1) vengono riportati, in funzione dell'orientamento del vettore velocità reale (Vreale) come definito al paragrafo 4.2, i valori percentuali di stima registrati lungo le LOS ascendente e discendente tenendo conto della direzione di spostamento reale dei satelliti (circa +/- 10°N). In particolare, trattando di moti a carattere prevalentemente verticale nadirale (fenomeni di subsidenza), vengono considerati solamente alcuni valori d'inclinazione variabili tra -50° e -90°. Ovviamente, trattandosi di moti che avvengono in aree pianeggianti, in valore di "esposizione" riportato nei grafici deve essere considerato unicamente ai fini dell'orientamento del vettore spostamento relativamente al piano orizzontale.

Nel caso del satellite ERS, l'elevata inclinazione sul PO della LOS (circa 67°) permette una buona risoluzione dei moti a prevalente carattere verticale, che ovviamente diminuisce al diminuire dell'inclinazione del vettore (Vreale). Nel caso di moto puramente verticale (inclinazione = -90°) il valore registrato non dipende più dall'esposizione e risulta uguale al 92% del valore reale, mentre il valore del 100% si raggiunge quando il vettore (Vreale) si trova parallelo alla LOS ascendente o discendente. In ogni caso la percentuale di stima risulta sempre relativamente alta.

Il satellite SENTINEL-1 invece risolve peggio questo tipo di moto in seguito alla minore inclinazione sul PO della LOS (circa 52°). Nel caso di moto puramente verticale il valore registrato risulta uguale al 79% del valore reale, mentre il valore del 100% si raggiunge quando il vettore (Vreale) si trova parallelo alla LOS ascendente o

discendente. Rispetto al satellite ERS, la distribuzione dei valori di stima del vettore (Vreale) risulta però più dilatata, permettendo di ottenere valori notevolmente più bassi in funzione dell'esposizione.

I grafici di Figura 35 e 36 ci aiutano a capire come, nell'analisi dei fenomeni di subsidenza, i valori registrati dal satellite possono avvicinarsi notevolmente ai valori reali.

6.2. Confronto tra dataset ascendente e discendente

L'importante componente verticale presente nei fenomeni di subsidenza o rigonfiamento del terreno, fa sì che i dataset ascendente e discendente di una stessa area presentino valori di velocità molto simili tra loro, sia come valore assoluto del modulo che, come verso, (segno). Infatti, sia che il satellite si trovi in geometria scendente o in geometria discendente, registrerà sempre un allontanamento dei singoli PS (velocità negative) nel caso di fenomeni di subsidenza, oppure un avvicinamento (velocità positive) nel caso di fenomeni di rigonfiamento.

Come abbiamo visto nel paragrafo 4.3, la ricostruzione del vettore spostamento ottenuta dall'analisi congiunta delle due geometrie di acquisizione porta ad individuare, nel caso di moti a prevalente componente verticale, angoli del vettore spostamento nel piano EWUD variabili tra 0° e 45° o tra 315° e 360°, nel caso di movimento verso lo zenit (fenomeni di rigonfiamento), oppure tra 135° e 225°, nel caso di movimento verso il nadir (fenomeni di subsidenza). Anche nel caso di moto verticale dobbiamo infatti tenere presente che i bersagli radar in superficie risponderanno in modo diverso alla deformazione, anche se è ragionevole supporre che la componente principale sia comunque verticale.

Nel grafico di Figura 37 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei valori di velocità registrati nelle due geometrie di acquisizione per un'area soggetta a fenomeni di subsidenza del terreno. La direzione del movimento è prevalentemente verso il nadir, coerentemente con la natura del fenomeno osservato, il dataset ascendente presenta valori negativi con una media pari a -3,9 mm/anno e il dataset discendente presenta valori sempre negativi con simili parametri statistici. Questo esempio si riferisce ad un'area molto estesa, facente parte della pianura Firenze-Prato-Pistoia, per cui risulta una forte variabilità dei valori di velocità registrati.

Per avere un'idea più precisa dell'informazione ottenuta dall'esame congiunto dei due dataset nelle diverse zone della pianura, è possibile inoltre procedere alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EWUD, come descritto al paragrafo 4.3. In questo caso l'informazione ottenuta non ci permette peraltro di effettuare ulteriori valutazioni qualitative sulla natura del fenomeno, come invece accade nel caso di fenomeni franosi.



Figura 37 - Esempio di distribuzione statistica dei valori di velocità registrati in modalità ascendente e discendente per un'area interessata da fenomeni di subsidenza del terreno nella pianura Firenze-Prato-Pistoia (Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile) In Figura 38 è mostrato l'orientamento del vettore EWUD nella pianura Firenze-Prato-Pistoia ottenuto utilizzando i dati ENVISAT relativi al periodo 2003-2010. In particolare, sono state considerate le celle di ricampionamento con maglia di 100 m contenenti PS con velocità media al di fuori dall'errore strumentale (+/- 2 mm/anno). Come possiamo vedere, la maggior parte dei valori ottenuti (93.7%) individuano movimenti verticali con componente nadirale (fenomeni di subsidenza, in rosso) e, subordinatamente (5.8%) movimenti sempre verticali ma con componente zenitale (fenomeni di rigonfiamento, in blu). Solamente lo 0.5% è invece riconducibile a movimenti a prevalente componente orizzontale verso est (in arancio) o verso ovest (in verde).

Le aree in subsidenza riguardano in particolare la pianura pistoiese, oggetto di numerosi prelievi di acque sotterranee sia per scopi agricoli che idropotabili, e alcune aree industriali della pianura fiorentina. Nell'area di Prato sono invece osservabili diffusi fenomeni di rigonfiamento del terreno che, seppur con velocità molto basse (circa 2.6 mm/anno), sembrano essere collegati alla risalita della falda nel periodo considerato conseguente la crisi dell'industria pratese a partire dai primi anni 2000 (Montini et al.,2012).



Figura 38 – Distribuzione spaziale delle classi di orientamento del vettore EWUD nella pianura Firenze-Prato-Pistoia relativamente ai dai ENVISAT (2003-2010)

6.3. Valutazioni sullo stato di attività

Come abbiamo visto al paragrafo 4.4 per i dissesti gravitativi di versante, il confronto tra velocità rilevate in periodi temporali diversi può risultare un utile elemento di supporto alla definizione dello stato di attività del fenomeno e quindi della sua pericolosità. Nel caso di fenomeni di subsidenza del terreno tale confronto può risultare molto utile anche per verificare l'evoluzione del fenomeno in seguito a variazioni dello stato dei prelievi idrici sotterranei dall'acquifero superficiale che generalmente costituiscono la principale causa scatenante.

In Figura 39 è mostrato, per l'acquifero alluvionale della pianura di Prato, il confronto tra i valori di velocità registrati in modalità discendente dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 (Figura 39 a) e quelli registrati, sempre in modalità discendente, dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 (Figura 39 b). Il confronto tra i due set di dati (Figura 39 c) ha permesso di discriminare le aree dove la subsidenza risulta continua su entrambi i periodi di analisi, le aree dove si è verificato un arresto della subsidenza e quelle dove invece si è avuta una inversione di tendenza, con passaggio da fenomeni di abbassamento del terreno a evidenze di sollevamento.



Figura 39 – Confronto tra valori di velocità registrati in modalità discendente dal satellite ERS (1992-2000) e dal satellite ENVISAT (2003-2010) per la pianura di Prato (PO)


Figura 40 – confronto tra differenze di velocità e differenze di prelievi idrici nell'area di Prato (PO). Per spiegazione vedi testo

Questa analisi ha permesso di confrontare l'andamento spaziale e temporale delle deformazioni con quello dei prelievi idrici, in modo da verificare una eventuale relazione di causa-effetto tra i due fenomeni.

In Figura 40 viene effettuato un confronto, lungo la sezione DD' di Figura 22c, tra le differenze di velocità media annua registrate nei periodi 2003-2010 e 1992-2000 e le differenze piezometriche registrate sulla stessa area tra dicembre 2010 e dicembre 2006. Come possiamo osservare, dove si sono verificati innalzamenti più o meno consistenti del livello piezometrico (differenze piezometriche negative), si ha una evidente diminuzione delle velocità di subsidenza (differenze di velocità positive), mentre dove si è registrato un ulteriore abbassamento della falda nel tempo (differenze piezometriche positive), le velocità di subsidenza tendono ad aumentare (differenze di velocità negative) a sottolineare l'accelerazione del movimento.

6.4. Analisi delle serie storiche degli spostamenti

Nel caso di fenomeni di subsidenza, le serie storiche degli spostamenti dei PS risultano generalmente più correlate tra loro sulla media distanza in quanto rappresentano per lo più movimenti spazialmente continui dove i valori di velocità variano gradualmente nelle diverse direzioni. La ricostruzione di serie storiche mediate degli spostamenti rilevati lungo le LOS tramite griglie di ricampionamento, vista al paragrafo 4.6, risulta pertanto molto più affidabile rispetto al caso di movimenti franosi, dove invece le velocità rilevate dai PS sono fortemente condizionate dalle variazioni topografiche locali.

L'analisi delle serie storiche degli spostamenti in aree subsidenti può risultare molto utile, specialmente se condotta sulla superficie di acquiferi porosi di origine alluvionale recente, per valutare l'impatto del regime dei prelievi sulla compattazione indotta dei sedimenti, oppure per verificare l'efficacia di politiche di controllo dei prelievi messe in atto per contrastare i fenomeni di subsidenza stessi. In tal senso, può essere utile verificare l'andamento degli spostamenti registrati dai PS nell'intorno di un determinato pozzo, o campo pozzi, di cui conosciamo l'andamento dei prelievi nel tempo.

Nel grafico di figura 41 sono riportati i risultati di un'analisi di questo tipo che si riferisce, in particolare, al confronto tra l'andamento degli spostamenti registrati dai PS nei pressi di un piezometro di monitoraggio, denominato "Badie", ubicato in un campo pozzi ad uso acquedottistico nel Comune di Prato (Montini et al., 2012). Questo piezometro presenta una serie storica di misura del livello piezometrico estesa a tutto il periodo 1992-2010, rendendo così possibile il confronto delle variazioni piezometriche con le serie storiche degli spostamenti del terreno registrati prima dal satellite ERS (1992-2000) e poi dal satellite ENVISAT (2003-2010) con cadenza circa mensile. In particolare, i dati PS sono stati selezionati sia in funzione della distanza dal piezometro esaminato (raggio 100 m) sia in base alla coerenza tra andamento degli spostamenti nelle corrispondenti serie di deformazione. In questo modo è stato possibile ricostruire una serie storica mediata del comportamento deformativo del terreno nei pressi del piezometro di riferimento.



Figura 41 – confronto tra andamento del livello piezometrico (in blu), velocità di deformazione registrata dal satellite ERS (in rosso) e velocità di deformazione registrata dal satellite ENVISAT (in nero) per il pozzo "BADIE" nel periodo 1992-2010

Come possiamo osservare, l'andamento della superficie piezometrica mostra una evidente inversione di tendenza a partire dai primi anni 2000, passando da una situazione di graduale e continuo abbassamento ad una situazione di risalita o stabilizzazione.

Tale inversione di tendenza ha determinato un forte rallentamento delle velocità di subsidenza del terreno registrate dai satelliti nei pressi dei pozzi esaminati, portandosi da valori di circa -5/-10 mm/anno (LOS discendente) per il periodo 1992-2000 a valori rientranti nell'ambito dell'errore sperimentale (+/- 2 mm/anno) per il periodo 2003-2010.

Il trend di risalita della falda è probabilmente da imputare alla forte diminuzione dei prelievi di acque sotterranee a scopo industriale dovuta essenzialmente alla crisi dell'industria pratese verificatasi a partire dagli anni 2000, ma anche alle azioni di governance delle risorse idriche messe in atto (miglioramento dei processi industriali, politiche di disincentivazione all'utilizzo delle acque di falda ed incentivazione all'utilizzo delle acque di recupero per uso industriale, ecc.).

In figura 42 è invece mostrato un altro esempio di utilizzo dei valori di spostamento riportati nelle serie storiche dei PS per il confronto tra densità di prelievo e tasso di abbassamento del terreno nel tempo.



Figura 42 – Confronto tra andamento degli abbassamenti del terreno nell'area industriale di Capalle (FI) per il periodo 2003-2007 (dati RADARSAT-1) e densità di prelievo

In questo esempio, che si riferisce ad un'area industriale ubicata presso l'abitato di Capalle (FI), sono stati utilizzati i PS ottenuti dall'elaborazione interferometrica delle immagini RADARSAT-1 acquisite tra gennaio 2003 e gennaio 2007. Tale area risulta interessata da un forte sfruttamento idrico connesso all'attività industriale ed alla presenza di campi pozzi per uso acquedottistico, che hanno innescato fenomeni di abbassamento del terreno con conseguente insorgere di lesioni sui fabbricati esistenti.

In questo caso è stato deciso di considerare un solo valore annuale di abbassamento del terreno per ogni PS presente nell'area in esame, per poi procedere alla loro spazializzazione ed elaborare un modello digitale della subsidenza per alcune date di riferimento.

Nel grafico di figura 42 viene riportato il confronto, lungo la sezione AB, tra gli abbassamenti annuali del terreno e la densità di prelievo ricavata elaborando i dati fornitici dal gestore del Servizio Idrico per quanto riguarda l'uso acquedottistico e dalla Provincia di Firenze per l'uso industriale. Da tale analisi risulta un graduale abbassamento del terreno nel tempo, che però evidenzia una inversione di tendenza durante il 2006 probabilmente da mettere in relazione agli effetti di riduzione dei prelievi Come possiamo osservare risulta una forte corrispondenza tra densità di prelievo e tasso di abbassamento del terreno innescato dalla compattazione della matrice argillosolimosa presente nei livelli acquiferi sfruttati.

6.5. Un esempio applicativo a scala regionale - Analisi dell'impatto della subsidenza sugli acquiferi alluvionali del bacino del fiume Arno

Lo scopo del lavoro è quello di mettere in relazione la distribuzione a scala regionale delle deformazioni superficiali ottenute da analisi interferometrica differenziale di immagini radar satellitari con lo stato di sfruttamento delle risorse idriche sotterranee in acquiferi di tipo alluvionale. Sono stati utilizzati i dati puntuali di deformazione (PS) ottenuti dalle immagini radar acquisite dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 ed elaborati nell'Ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del Ministero dell'Ambiente.

Pag. 111 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

Il lavoro è stato strutturato effettuando un'analisi preliminare della distribuzione e tipologia delle deformazioni rilevate da satellite alla scala dell'intero bacino del fiume Arno, in modo da individuare le diverse tipologie di dissesti presenti sul territorio e stimarne i campi di velocità. Successivamente, le attività sono state focalizzate all'analisi dei fenomeni di subsidenza che interessano gli acquiferi superficiali ospitati nei sedimenti alluvionali e recenti (olocene) del fiume Arno e dei suoi principali affluenti. In particolare, sono stati considerati i 17 corpi idrici sotterranei significativi individuati nel Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico e su di essi è stata effettuata un'analisi statistica dei valori di deformazione in funzione delle diverse categorie di uso del suolo, in modo da stimare in modo qualitativo l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul territorio e la loro eventuale associazione a particolari attività antropiche. In base ai risultati ottenuti sono stati definiti tre indicatori capaci di fornire, a livello di ogni singolo acquifero, un quadro sintetico dell'estensione dei fenomeni di subsidenza osservati, del loro impatto sulle attività antropiche e dell'incidenza delle attività produttive sulla loro evoluzione.

Questa analisi ha permesso di individuare alcune criticità nel bacino del fiume Arno localizzabili in particolare nella pianura Firenze-Prato-Pistoia e nel Valdarno medio-inferiore, da mettere in relazione all'eccessivo prelievo di acque sotterranee in acquiferi con importante presenza di materiali limoso-argillosi ad elevata comprimibilità. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona corrispondenza con quanto osservato direttamente sul territorio, ponendo le basi per impostare dei criteri per la gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee alla scala regionale

6.5.1. Materiale utilizzato

L'analisi delle deformazioni superficiali è stata effettuata utilizzando PS ottenuti dall'analisi delle immagini radar acquisite dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 ed elaborate nell'ambito del PSTA (vedi paragrafo 3.1).

Il bacino del fiume Arno risulta coperto completamente, sia in geometria ascendente che discendente, dalle immagini acquisite dal satellite ENVISAT e la densità media dei PS su tutto il bacino risulta pari a circa 170 PS/kmq con valori fino a circa 1500 PS/kmq nelle aree maggiormente antropizzate.

L'analisi di dettaglio per la caratterizzazione dei fenomeni di subsidenza direttamente connessi allo sfruttamento di risorse idriche sotterranee, è stata effettuata prendendo come ambito geografico di riferimento i principali acquiferi di tipo alluvionale presenti nel bacino del fiume Arno e definiti nel dettaglio nel Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico. Si tratta di 17 corpi idrici sotterranei a carattere sostanzialmente superficiale, con presenza sia di falde libere che in pressione, situati nei sedimenti alluvionali recenti ed attuali del fiume Arno e dei suoi principali affluenti (Olocene). Tali acquiferi risultano interessati da un intenso sfruttamento specialmente in corrispondenza dei principali centri urbani del bacino (Firenze, Prato, Pistoia, Arezzo e Pisa).

L'analisi stratigrafica di massima dei litotipi acquiferi, finalizzata in particolare a verificare la presenza di materiali compressibili a carattere limoso-argilloso necessari all'innesco di fenomeni di subsidenza, è stata effettuata utilizzando la Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI) realizzata dalla Regione Toscana in collaborazione con il consorzio LAMMA e con il centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena. Si tratta della raccolta georeferenziata di una serie di dati riguardanti il sottosuolo e la risorsa idrica (pozzi e sondaggi) a cui possono essere associati dati stratigrafici, idrogeologici e risultati di prove in situ e in laboratorio. In particolare, questo database ha permesso di estrarre ed analizzare circa 4000 stratigrafie riguardanti gli acquiferi alluvionali oggetto di studio.

La stima qualitativa delle zone soggette a maggiore concentrazione di prelievi di acque sotterranee è stata effettuata utilizzando il layer "Densità di Prelievo" (DP) realizzato nell'ambito del Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico (AdBArno, 2008). Si tratta di uno strato informativo di tipo raster dove ad ogni cella, con lato di 50 m, è associato il volume di acque sotterranee prelevato in un intorno di 500 m.

Per quanto riguarda infine l'uso del suolo, utilizzato come maschera di analisi per le elaborazioni statistiche sulle deformazioni alla scala del singolo acquifero, è stato utilizzato un layer vettoriale alla scala nominale 1:10000 realizzato dalla Regione Toscana sulla base di ortofoto AGEA del 2010 integrate con elementi vettoriali della carta tecnica regionale. Considerate le finalità dello studio e la natura dei PS esaminati, i possibili utilizzi del suolo sono stati raggruppati in cinque categorie principali, di cui tre (zone residenziali, aree industriali-commerciali e reti stradali e ferroviarie) strettamente legate all'urbanizzazione del territorio e quindi ricche di bersagli radar permanenti (mediamente 1000 PS/kmq), e le altre due (aree agricole e aree naturali) fortemente carenti di

Pag. 112 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

elementi riflettenti stabili nel tempo (qualche decina di PS/kmq) e pertanto di più difficile caratterizzazione per quanto riguarda lo stato deformativo rilevabile da satellite.

6.5.2. Metodologia di analisi

Questo lavoro è stato strutturato impostando un'analisi preliminare delle deformazioni alla scala regionale, finalizzata alla definizione dell'ambito geografico di riferimento per i fenomeni di subsidenza, ed una successiva analisi di dettaglio a livello di singolo acquifero, mirata alla valutazione dell'impatto di questi fenomeni sul territorio. In relazione alle due diverse tipologie di analisi sono stati selezionati due diversi criteri di esame ed elaborazione dei dati satellitari.

L'analisi alla scala regionale è stata realizzata elaborando i dati PS acquisiti nelle due geometrie ascendente e discendente in modo da ricostruire il vettore spostamento nel piano verticale EWUD, così come descritto al paragrafo 4.3. In particolare, le operazioni di ricostruzione del vettore spostamento sono state realizzate secondo celle quadrate con lato di 100 m, assegnandovi il valore di velocità media annua e l'angolo di orientamento nel piano EWUD risultanti.

Questa operazione ha permesso di classificare il tipo di movimento di ogni cella come a carattere prevalentemente orizzontale (est +/- 45° oppure ovest +/- 45°) oppure a carattere prevalentemente verticale (zenit +/- 45° oppure nadir +/- 45°).

Per quanto riguarda invece l'analisi statistica delle deformazioni alla scala del singolo acquifero, si è preferito utilizzare il maggior numero di dati possibile, senza effettuare processi di ricampionamento o altro tipo di generalizzazione. Per tale motivo le elaborazioni sono state effettuate solamente su una geometria di acquisizione dei dati satellitari e, in particolare, considerati gli aspetti qualitativi dei due dataset, sulla geometria discendente. La scelta di utilizzare una sola geometria è giustificata dal fatto che l'analisi riguarda unicamente moti di subsidenza del terreno, caratterizzati quindi da una distribuzione molto simile nelle due geometrie oltre che da valori di velocità negativi (Figura 44).

Per ognuno dei 17 corpi idrici sotterranei esaminati è stata effettuata un'analisi statistica descrittiva dei valori di velocità registrati all'interno delle cinque categorie di uso del suolo considerate, che ha permesso di comprendere meglio l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul territorio. Per ogni categoria di uso del suolo è stata inoltre definita la densità di PS, utile a valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti, la percentuale di PS attivi (velocità inferiore a -2 mm/anno) rispetto ai PS totali e le rispettive velocità medie, utilizzati poi per la definizione della pressione da subsidenza sugli acquiferi considerati. Quest'ultima in particolare è stata valutata attraverso l'analisi di tre indicatori, definiti alla scala del singolo acquifero e capaci di fornire un quadro sintetico dell'estensione dei fenomeni analizzati, del loro impatto sulle attività antropiche e dell'incidenza delle attività produttive sulla loro evoluzione:

1) Indicatore di subsidenza diffusa

È definito come la velocità media di deformazione sull'intero corpo idrico ed è finalizzato a valutare se un acquifero nel suo complesso è soggetto a fenomeni di subsidenza spazialmente diffusi su tutto il territorio. Difatti, essendo un parametro di tendenza centrale, tende a livellare i valori di deformazione anomali alla scala locale ed evidenziare invece la presenza di valori anomali spazialmente distribuiti.

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): Velocità media >= -2 mm/anno

Classe 2 (media): Velocità media < -2 mm/anno; >= -5 mm/anno

Classe 3 (elevata): Velocità media <= -5 mm/anno

2) Indicatore di impatto della subsidenza sulle attività antropiche

È posto uguale alla percentuale di PS attivi in aree antropizzate ed è mirato a quantificare l'impatto dei fenomeni di subsidenza sulle attività antropiche presenti sul territorio. Infatti, maggiore è la percentuale di PS attivi rispetto a tutti i PS presenti in corrispondenza di attività antropiche (zone urbanizzate, aree industriali-commerciali, rete stradale-ferroviaria) è maggiori saranno i possibili danni economici determinati dai fenomeni di subsidenza.

Pag. 113 di 118

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale - PAI « dissesti geomorfologici ». Relazione. Marzo 2024

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): <= 10%

Classe 2 (media): > 10%; <= 30%

Classe 3 (elevata): > 30%

3) Indicatore di associazione subsidenza - attività produttive

È definito come il rapporto tra la velocità media dei PS attivi in aree industriali-commerciali e la velocità media dei PS attivi su tutto l'acquifero. Questo indicatore è mirato a indicare quanto le attività produttive e, in particolare, gli ingenti prelievi idrici ad esse associati, influiscono sui fenomeni di subsidenza locali. Infatti, maggiore è la velocità media dei PS attivi sulle aree industriali-commerciali rispetto alla velocità media dei PS attivi su tutto l'acquifero e più facilmente i fenomeni estremi risulteranno collocati proprio in corrispondenza di tali aree, con probabile relazione di causa-effetto.

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): < 1.05

Classe 2 (media): >= 1.05; <= 1.15

Classe 3 (elevata): >= 1.15

Per quanto riguarda infine l'analisi dei fattori predisponenti (spessore di materiali sensibili a variazioni del contenuto d'acqua) e dei fattori scatenanti (depressione piezometrica innescata dai prelievi), si è cercato di verificare una loro eventuale relazione con le velocità di subsidenza dei terreni interessati. Per quanto riguarda i dati stratigrafici, i vari litotipi sono stati riclassificati in due categorie, ovvero materiali prevalentemente granulari (sabbie, ghiaie) e materiali prevalentemente coesivi (limi, argille), in modo poi da calcolare, per ogni sondaggio esaminato, il rapporto tra le due tipologie. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con la velocità di subsidenza e la densità di prelievo rilevate in un'intorno significativo (500 m) dei sondaggi esaminati.

6.5.3. Risultati ottenuti

L'analisi alla scala di bacino della distribuzione del vettore EWUD ha permesso di discriminare le aree con prevalente componente verticale (subsidenza) da quelle con prevalente componente orizzontale (dissesti gravitatiti di versante).

Dalla Figura 43 appare evidente che i moti verticali distribuiti in modo significativo nello spazio risultano collocati nelle aree di pianura e, in particolare, in corrispondenza dei sedimenti alluvionali attuali e recenti depositati dal fiume Arno e dai suoi principali affluenti. Questi sedimenti ospitano acquiferi superficiali anche molto importanti che risultano interessati da ingenti prelievi ad uso irriguo, industriale e acquedottistico.

Nel grafico di Figura 44 è riportato il confronto tra la distribuzione statistica dei valori di velocità superiori all'errore strumentale (+/-2 mm/anno) registrati in geometria ascendente e discendente all'interno degli acquiferi esaminati, unitamente a quella della loro ricombinazione nel vettore EWUD. Come possiamo osservare, i valori di velocità acquisiti nelle due geometrie presentano una distribuzione molto simile e risultano per la quasi totalità di segno negativo, ovvero in allontanamento dal satellite, individuando chiaramente la presenza di moti di subsidenza del terreno. Tale andamento è confermato dal valore medio della direzione del vettore EWUD che risulta pari a 184° rispetto allo zenit.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale dei valori di velocità del vettore EWUD (Figura 45), possiamo vedere che i dati più anomali riguardano principalmente le aree delle pianure di Pistoia, Empoli, Pisa e Padule di Bientina, dove possono essere raggiunte deformazioni medie superiori ai 3 cm/anno.



Figura 43 – Distribuzione spaziale del movimento prevalente nel piano EWUD (dati ENVISAT) nel bacino del fiume Arno



Figura 44 - Confronto tra la distribuzione statistica dei valori di velocità media annua dei PS ascendenti, discendenti e della loro ricombinazione nel vettore EWUD (dati ENVISAT). Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile



Figura 45 - Distribuzione spaziale delle classi di velocità media annua del vettore EWUD (dati ENVISAT) nel bacino del fiume Arno

L'analisi stratigrafica dei depositi interessati da queste deformazioni ha fatto emergere la costante presenza di materiali limoso-argillosi, sotto forma di lenti diffuse o come matrice dei litotipi acquiferi. Tali litotipi, considerata l'età relativamente recente e il contenuto in argilla, possono effettivamente rispondere anche in maniera significativa a variazioni del contenuto d'acqua, innescando fenomeni di compattazione del terreno in corrispondenza delle principali depressioni piezometriche o di arresto delle deformazioni in aree soggette a risalita della tavola d'acqua. Il confronto spaziale tra velocità medie di subsidenza, percentuale di materiali coesivi dei litotipi acquiferi e densità di prelievo di acque sotterranee, ha infatti messo in evidenza che le velocità di deformazione più elevate sono generalmente associate al sovrasfruttamento di acquiferi con importante presenza di materiali argilloso-limosi.

Per esaminare l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul tessuto antropico e valutare la loro eventuale associazione a particolari attività presenti sul territorio, per ogni acquifero esaminato è stata effettuata un'analisi statistica delle velocità di deformazione emerse dai dati satellitari in relazione all'uso del suolo. In Figura 46 sono riportati alcuni dati riguardanti questa analisi (acquifero della pianura di Firenze), dove è possibile osservare, per ognuna delle cinque categorie di uso del suolo considerate, la superficie totale, la densità di PS, la percentuale di PS attivi e il confronto tra velocità medie dei PS attivi e dei PS totali. In questo esempio possiamo vedere che le velocità medie dei PS totali e la percentuale dei PS attivi nelle diverse categorie di uso del suolo si mantengono relativamente basse, facendo ipotizzare una sostanziale stabilità dell'area. D'altra parte, le elevate velocità medie raggiunte dai PS attivi in aree industriali e commerciali, unitamente alla loro elevata densità spaziale, evidenzia la presenza di fenomeni di subsidenza alla scala locale probabilmente connessi alle attività produttive.



Figura 46 – Analisi statistica delle deformazioni in funzione dell'uso del suolo per l'acquifero alluvionale di Firenze. Per spiegazione vedi testo

In particolare, l'analisi dei tre indicatori visti precedentemente ha permesso di delineare un quadro sintetico dell'estensione ed impatto dei fenomeni di subsidenza osservati sul territorio. Nella Figura 47 sono riportati i valori assunti dai tre indicatori per ognuno degli acquiferi considerati, mentre in Figura 48 è possibile osservare la distribuzione spaziale delle rispettive classi definite al paragrafo precedente.

L'analisi ha consentito di verificare che gli acquiferi del Casentino, Valdarno superiore, Mugello, Pesa, Val di Nievole, Val d'Era e Lucca, non presentano particolari problemi di subsidenza. Questo non vuole dire che sono assenti deformazioni superiori all'errore strumentale, ma che tali deformazioni, se presenti, sono comunque di natura modesta e non comportano particolari problemi alle strutture antropiche presenti sul territorio.



Figura 47 – Valori assunti dagli indicatori di subsidenza negli acquiferi esaminati

Gli acquiferi della Val di Chiana, Arezzo, Firenze e Elsa, anche se non presentano fenomeni di subsidenza diffusamente distribuiti su tutto il territorio, risultano comunque interessati da fenomeni localizzati di entità variabile che, sebbene non interferiscano pesantemente sul tessuto antropico, sono da mettere probabilmente in relazione all'eccessivo utilizzo di acque sotterranee connesso alle attività produttive.



Figura 48 – Distribuzione dei valori assunti dalle tre classi degli indicatori di subsidenza considerati

Gli altri acquiferi (Prato, Pistoia, Empoli, Santa Croce, Bientina e Pianura di Pisa) sono invece chiaramente interessati da fenomeni di subsidenza diffusi su tutto il territorio che possono determinare importanti danni alle zone residenziali, commerciali, industriali e alle vie di comunicazioni, con particolare riferimento agli acquiferi della pianura di Pistoia e del Padule di Bientina. Su tutti questi acquiferi, risulta che i fenomeni di subsidenza più elevati sono collocati proprio in corrispondenza delle principali attività industriali-commerciali, facendo pensare ad un possibile collegamento con l'eccessivo prelievo di risorse idriche sotterranee ad uso industriale e acquedottistico.