



*UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA*

*Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali*

*COMO*

Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali

XXVIII Ciclo

**Valutazione probabilistica della pericolosità da  
fagliazione superficiale:  
analisi del metodo per un'applicazione nel processo  
di localizzazione del Deposito Nazionale dei rifiuti  
radioattivi**

Dott.ssa LICIA RIPAMONTI

Relatore: Prof. ALESSANDRO MARIA MICHETTI

Maggio 2016



*A noi*



## Indice

<b>Indice .....</b>	<b>5</b>
<b>Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Deposito Nazionale .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Il progetto Deposito Nazionale – Parco Tecnologico .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Il processo di localizzazione del DN .....</b>	<b>11</b>
1.2.1 La Guida Tecnica 29 e la Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (CNAPI).....	13
1.2.2 Il percorso verso la caratterizzazione del sito finale .....	16
<b>2 La pericolosità da fagliazione superficiale.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 La valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale.....</b>	<b>18</b>
2.1.1 La valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale in Italia.....	22
2.1.2 Individuazione della metodologia adatta per la valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale per la realizzazione del DN.....	24
<b>3 L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Caratterizzazione della sorgente sismogenica.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Definizione delle equazioni di attenuazione .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 La trattazione delle incertezze .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4 I risultati della PFDHA.....</b>	<b>36</b>
<b>4 Linee guida per l'applicazione della PFDHA.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Indicazioni generali .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Individuazione e raccolta dei dati di input .....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Valutazione della presenza di potenziale fagliazione superficiale .....	43
4.2.2 Caratterizzazione dell'area di studio.....	45
4.2.3 Caratterizzazione dei parametri di faglia .....	48
<b>4.3 Definizione e applicazione dei modelli di calcolo .....</b>	<b>54</b>
4.3.1 Caratterizzazione delle sorgenti sismogeniche .....	54
4.3.2 Caratterizzazione della fagliazione superficiale .....	59
<b>4.4 Rappresentazione delle incertezze .....</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Rappresentazione dei risultati .....</b>	<b>82</b>

4.6	Definizione della pericolosità da fagliazione superficiale al sito .....	87
<b>5</b>	<b><i>Caso studio: la faglia di Paganica .....</i></b>	<b>91</b>
5.1	La Faglia di Paganica .....	92
5.2	Caratterizzazione della fagliazione superficiale.....	93
5.2.1	Fagliazione secondaria .....	95
5.3	Discussione e conclusioni.....	102
<b>6</b>	<b><i>Discussione .....</i></b>	<b>103</b>
6.1	Potenzialità del metodo .....	104
6.2	Limiti del metodo .....	105
6.3	Punti di attenzione in fase di utilizzo .....	106
6.4	L'applicazione per la localizzazione del Deposito Nazionale .....	107
6.5	Sviluppi futuri .....	109
<b>7</b>	<b><i>Conclusioni.....</i></b>	<b>110</b>
	<b><i>Bibliografia.....</i></b>	<b>113</b>
	<b><i>Sitografia.....</i></b>	<b>118</b>

## **Introduzione**

L'analisi della fagliazione superficiale, definita come la dislocazione in corrispondenza o in prossimità della superficie topografica derivante per via diretta o indiretta da movimenti tettonici lungo una faglia accompagnati o meno da forti rilasci di energia sismica, costituisce una parte importante del processo per la caratterizzazione sismica di un sito selezionato per la realizzazione di un impianto. Tuttavia, la definizione di procedure per la quantificazione della pericolosità da fagliazione ai fini della progettazione ingegneristica e in parte per la pianificazione del territorio non risulta, ad oggi, regolamentata con precisione in Italia. Per questo motivo la ricerca si è concentrata sull'analisi della normativa nazionale ed internazionale e delle metodologie esistenti per la valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale.

Dopo un'iniziale analisi approfondita delle normative italiane che forniscono indicazioni sulla valutazione della pericolosità da fagliazione per la pianificazione del territorio e delle tendenze scientifiche e normative internazionali, l'attività di ricerca si è focalizzata sull'analisi delle metodologie di valutazione della pericolosità su basi probabilistiche, ad oggi la metodologia che sembra richiamare un grande interesse e che ha avuto le sue applicazioni e sviluppi più rilevanti, seppure ancora molto limitati, nella progettazione di infrastrutture critiche convenzionali (ad es. dighe, oleodotti, gasdotti, etc.) e nell'ambito del nucleare.

Il presente progetto mira quindi alla definizione di una proposta di linee guida per la valutazione della pericolosità totale derivante da fagliazione superficiale basata su calcoli probabilistici, ponendo particolare attenzione ai limiti associati a tale metodologia.

Sulla base della normativa nazionale ed internazionale e in riferimento ad esempi esteri e allo stato dell'arte delle metodologie in questo campo di studio, è stata sviluppata una proposta di analisi *ad hoc* per la caratterizzazione del fenomeno della fagliazione superficiale con particolare attenzione alla necessità di ottenere valori utili all'applicazione ingegneristica.

In seguito all'inizio della mia attività lavorativa presso Sogin S.p.A. (Società Gestione Impianti Nucleari), avvenuto durante questo Dottorato di ricerca, alla collaborazione tra il Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia (DISAT) dell'Università degli Studi dell'Insubria e la stessa Sogin S.p.A., e all'avvio del processo di localizzazione del Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi, avvenuto in seguito alla pubblicazione da parte di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) della Guida Tecnica 29 (GT29), la ricerca si è concentrata

sulle applicazioni in ambito nucleare, in fase di progettazione definitiva e, soprattutto, alla parametrizzazione dei modelli necessari durante il processo di analisi di sicurezza<sup>1</sup>, in particolare sulla pericolosità derivante dalle strutture che costituiscono il fenomeno della fagliazione secondaria, ossia le rotture che si verificano durante un evento sismico su altre faglie o fratture localizzate ad una certa distanza dalla traccia della fagliazione superficiale primaria, ossia le rotture superficiali cosismiche in corrispondenza della sorgente sismogenica. Il maggior interesse per la componente secondaria della pericolosità da fagliazione deriva dal fatto che uno dei criteri di localizzazione enunciati dalla GT29 determina l'esclusione delle aree del territorio italiano interessate dalla presenza di faglie potenzialmente in grado di provocare fagliazione superficiale, ossia strutture sismogenetiche lineari (*sensu* Caputo, 2005), sulla base di indagini di dettaglio specifiche che non necessitano di una valutazione probabilistica.

La valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale assume un significato particolare nell'ambito del nucleare, dove è considerata una parte fondamentale dell'intero processo di localizzazione e caratterizzazione di un sito idoneo ad ospitare un impianto. Il principale riferimento in ambito nucleare a livello internazionale è la Guida SSG-9 "*Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*" pubblicata da IAEA (*International Atomic Energy Agency*) (IAEA, 2010), che fornisce le indicazioni di massima per una corretta valutazione della pericolosità derivante dai fattori legati a processi di origine sismica in un'area che ospita o che è destinata ad ospitare un impianto nucleare. In particolare, il capitolo 8 della SSG-9, "*Potential for fault displacement*", fornisce le linee guida, i principi e le raccomandazioni per una completa valutazione del potenziale di fagliazione, dai criteri per il riconoscimento delle strutture da considerare come "faglie capaci" (cfr. § 1.3) alle metodologie da adottare per l'analisi della pericolosità associata.

La valutazione per l'utilizzo di tale metodologia ai fini del progetto Deposito Nazionale ha comunque portato indirettamente anche alla formulazione di alcune considerazioni della sua applicabilità all'interno del territorio italiano; infatti, a causa di alcuni rinvii e ritardi rispetto

---

<sup>1</sup> L'Analisi di Sicurezza, o *Safety Assessment*, è una procedura di analisi numerica che, tenendo conto di tutte le componenti del sistema di deposito (inventario dei rifiuti, strutture del deposito, geologia del sito) consente di valutare l'impatto che l'infrastruttura può avere sull'uomo e sull'ambiente, nel breve e nel lungo periodo, in tutti gli scenari possibili.



alle tempistiche dettate dalla legge (cfr § 1.2), il periodo in cui si è svolto il lavoro di ricerca e la stesura della presente tesi, si sono inseriti in una fase ancora iniziale del processo di localizzazione, in cui le analisi e la definizione delle attività future devono prevedere l'applicazione su scala regionale, quindi su porzioni di territorio ancora estese e potenzialmente distribuite in tutto il territorio nazionale.

La tesi risulta strutturata come segue. Nel primo capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche del progetto Deposito Nazionale, l'intero *iter* per la sua localizzazione e per le successive fasi di caratterizzazione del sito definitivo. Il secondo capitolo presenta le principali caratteristiche del processo di fagliazione superficiale e delle metodologie per la valutazione della pericolosità associata, lo stato dell'arte in Italia e le considerazioni che hanno portato alla definizione degli obiettivi della presente ricerca. Nel terzo capitolo viene presentata brevemente la teoria alla base delle equazioni di calcolo necessarie per la valutazione probabilistica. Nel quarto capitolo viene presentata la proposta di metodologia *ad hoc* attraverso delle linee guida. Nel quinto capitolo vengono presentati alcuni confronti tra i modelli presenti in letteratura e un caso studio non legato alla localizzazione del DN (le aree realmente interessate sono dati classificati e quindi informazioni riservate, non diffondibili), relativo alla faglia di Paganica (AQ) che, grazie alla mole di rilievi eseguiti in seguito all'evento sismico del 6 aprile 2009, risulta essere, in Italia, la struttura meglio caratterizzata, per quanto riguarda la fagliazione superficiale. Nel sesto capitolo vengono illustrati i vantaggi e i limiti della metodologia, viene valutata la sua applicabilità e vengono illustrati le auspicabili attività future utili al suo possibile perfezionamento sia per l'applicazione nei processi di localizzazione di impianti legati al ciclo del nucleare, ma anche a impianti considerati a rischio rilevante, a edifici critici o di interesse strategico, a infrastrutture di servizio (acquedotti, strade, gasdotti,...) fino alla pianificazione ordinaria del territorio.

## **1. Deposito Nazionale**

Nel giugno 2014 ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha pubblicato la Guida Tecnica 29 *“Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività”* (GT29) in cui vengono riportati i criteri utili per l’individuazione, sul territorio nazionale italiano, di aree potenzialmente idonee ad ospitare il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi e l’annesso Parco Tecnologico (DNPT). Contestualmente all’uscita della GT29, Sogin S.p.A., la società di Stato responsabile della gestione e dello smantellamento degli impianti nucleari italiani e della gestione dei rifiuti radioattivi, in qualità di soggetto incaricato per la localizzazione, la realizzazione e la gestione del Deposito Nazionale, ha dato il via a tutte le attività necessarie per lo svolgimento delle varie fasi del processo di localizzazione, così come previsto dal D. Lgs. 31/2010 e ss.mm.ii. *“Disciplina dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché benefici economici, a norma dell’articolo 25 della legge 23 luglio 2009, n.99”*.

### **1.1 Il progetto Deposito Nazionale – Parco Tecnologico**

Il Deposito Nazionale e Parco Tecnologico (DNPT) sarà una struttura ambientale di superficie, inserita all’interno di un Parco Tecnologico nel quale saranno avviate attività di ricerca di alto profilo sulle nuove metodologie di gestione dei rifiuti radioattivi e su tecnologie di interesse per il territorio che ospiterà tale struttura. Le strutture che ospiteranno il vero e proprio Deposito Nazionale saranno destinate alla sistemazione definitiva dei rifiuti radioattivi a breve vita e bassa e media attività, per un volume pari a 75.000 m<sup>3</sup>, e allo stoccaggio temporaneo di lungo periodo (50 anni) dei rifiuti radioattivi ad alta attività (circa 15.000 m<sup>3</sup>), fino al loro conferimento finale in un deposito geologico di profondità<sup>2</sup>, idoneo alla loro sistemazione definitiva.

I rifiuti a breve vita e bassa e media attività sono quei rifiuti che nell’arco di 300 anni raggiungeranno un livello di radioattività tale da non rappresentare più un rischio per l’uomo e per l’ambiente. Essi comprendono circa 44.000 m<sup>3</sup> di materiali di scarto derivanti

---

<sup>2</sup> Con deposito geologico di profondità si vuole indicare una struttura per la sistemazione definitiva dei rifiuti radioattivi ad alta attività, realizzata nel sottosuolo a notevole profondità (di solito diverse centinaia di metri), in una formazione geologica considerata stabile (in particolare argille, graniti, salgemma), tale da garantire l’isolamento dei radionuclidi dall’ambiente per periodi molto lunghi (fino a centinaia di migliaia di anni), necessari al decadimento della radioattività.

dall'esercizio e dallo smantellamento degli impianti nucleari per la produzione di energia elettrica, 12.000 m<sup>3</sup> dagli impianti nucleari di ricerca e 19.000 m<sup>3</sup> dai settori della medicina nucleare e dell'industria. I rifiuti ad alta attività sono invece costituiti dai materiali derivanti dallo smantellamento delle installazioni nucleari italiane e, per un volume di circa 1.000 m<sup>3</sup>, da combustibile non riprocessabile, materie nucleari non cedibili a terzi e residui del riprocessamento del combustibile (separazione di materiale riutilizzabile dal rifiuto) effettuato all'estero ([www.depositonazionale.it](http://www.depositonazionale.it)).

Il DN sarà una struttura composta da una serie di barriere ingegneristiche e barriere naturali che avranno lo scopo di garantire l'isolamento dei rifiuti rispetto alla biosfera. Esso sarà costituito da 90 strutture in calcestruzzo armato realizzate a livello del terreno, dette celle, all'interno delle quali verranno collocati grandi contenitori in calcestruzzo speciale, i moduli, che racchiuderanno a loro volta i contenitori metallici con i rifiuti radioattivi già condizionati, detti manufatti, e che, una volta completato il riempimento, saranno ricoperte da una collina artificiale di materiali inerti e impermeabili (Fig. 1.1).



**Figura 1.1.** Configurazione delle barriere previste per la realizzazione del DN ([www.depositonazionale.it](http://www.depositonazionale.it))

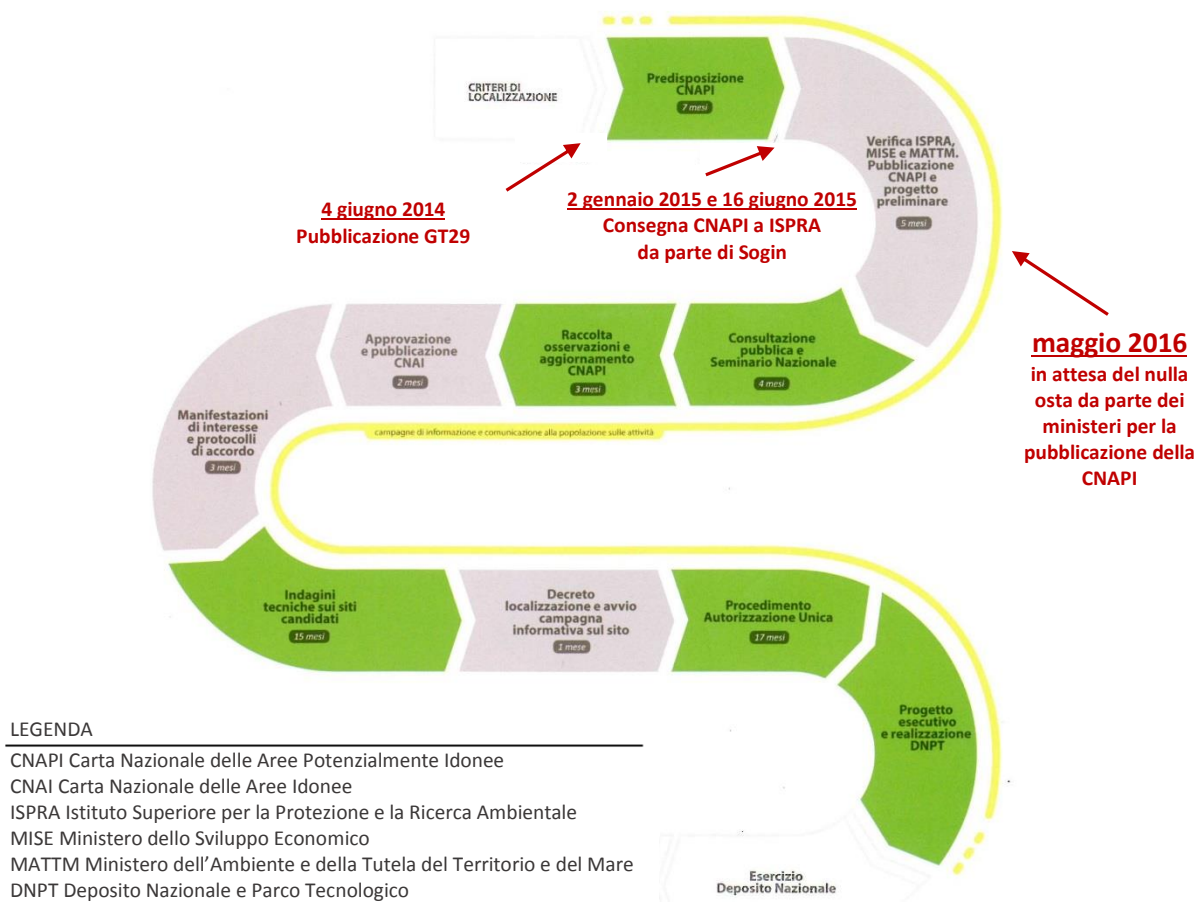
In un'apposita area del DN sarà inoltre realizzato un complesso di edifici idoneo allo stoccaggio temporaneo di lunga durata dei rifiuti ad alta attività denominato CSA (Complesso Stoccaggio Alta Attività). I rifiuti saranno stoccati in contenitori altamente schermanti adatti al trasporto e allo stoccaggio in sicurezza.

### 1.2 Il processo di localizzazione del DN

Il D. Lgs. 31/2010 e ss.mm.ii., secondo l'Art.1 disciplina:

- “a) la localizzazione del Deposito nazionale, incluso in un Parco Tecnologico comprensivo di un Centro di studi e sperimentazione, destinato ad accogliere i rifiuti radioattivi provenienti da attività pregresse di impianti nucleari e similari, nel territorio nazionale;
- b) le procedure autorizzative per la costruzione e l'esercizio del Deposito nazionale e del Parco Tecnologico;
- c) i benefici economici relativi alle attività di esercizio del Deposito nazionale, da corrispondere in favore delle persone residenti, delle imprese operanti nel territorio circostante il sito e degli enti locali interessati.”

La Figura 1.2 fornisce una rappresentazione schematica dell'iter definito dal D. Lgs. 31/2010, a partire dalla definizione dei criteri alla base del processo di localizzazione, fino all'entrata in esercizio del Deposito Nazionale, con l'indicazione dei quelli che dovrebbero essere le tempistiche definite dalla legge.



**Figura 1.2.** Fasi del processo di individuazione, qualificazione e autorizzazione del sito del Deposito Nazionale, secondo il D.Lgs. 31/2010; in verde i riquadri con le attività di competenza Sogin S.p.A. (Sogin, 2015)

### **1.2.1 La Guida Tecnica 29 e la Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (CNAPI)**

Il 4 giugno 2014 ISPRA ha pubblicato la GT29 in cui sono riportati una serie di criteri per l'individuazione, all'interno del territorio italiano, di aree che per le loro caratteristiche fisiche, naturali, antropiche possono essere considerate potenzialmente idonee ad ospitare il Deposito Nazionale e, insieme alle sue componenti ingegneristiche, contribuiscano a garantire l'isolamento dei radionuclidi dalla biosfera. I criteri si suddividono in "Criteri di esclusione" e "Criteri di approfondimento". In particolare (GT29):

#### Criteri di esclusione

Sono da escludere le aree:

- CE1 – vulcaniche attive o quiescenti
- CE2 – contrassegnate da sismicità elevata
- CE3 – interessate da fenomeni di fagliazione
- CE4 – caratterizzate da rischio e/o pericolosità geomorfologica e/o idraulica di qualsiasi grado e le fasce fluviali
- CE5 – contraddistinte dalla presenza di depositi alluvionali di età olocenica
- CE6 – ubicate ad altitudine maggiore di 700 m s.l.m.
- CE7 – caratterizzate da versanti con pendenza media maggiore del 10%
- CE8 – sino alla distanza di 5 km dalla linea di costa attuale oppure ubicate a distanza maggiore ma ad altitudine minore di 20 m s.l.m.
- CE9 – interessate dal processo morfogenetico carsico o con presenza di sprofondamenti catastrofici improvvisi (*sinkholes*)
- CE10 – caratterizzate da livelli piezometrici affioranti o che, comunque possano interferire con le strutture di fondazione del deposito
- CE11 – naturali protette identificate ai sensi della normativa vigente
- CE12 – che non siano ad adeguata distanza dai centri abitati
- CE13 – che siano a distanza inferiore a 1 km da autostrade e strade extraurbane principali e da linee ferroviarie fondamentali e complementari
- CE14 – caratterizzate dalla presenza nota di importanti risorse del sottosuolo
- CE15 – caratterizzate dalla presenza di attività industriali a rischio di incidente rilevante, dighe e sbarramenti idraulici artificiali, aeroporti o poligoni di tiro militari operativi

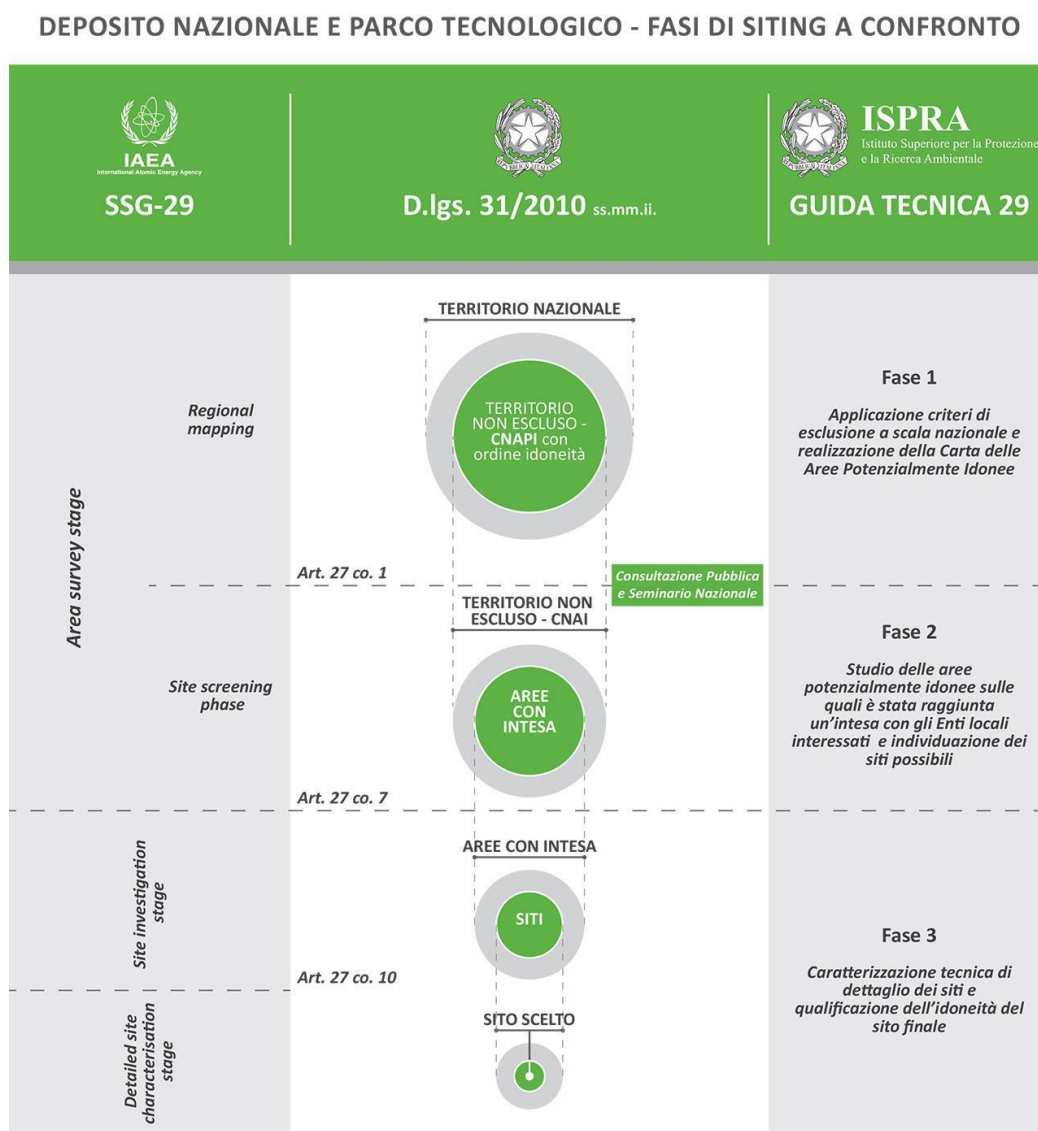
Criteria di approfondimento

In ognuna delle fasi costituenti il processo di localizzazione devono essere valutati i seguenti aspetti:

- CA1 – presenza di manifestazioni vulcaniche secondarie
- CA2 – presenza di movimenti verticali significativi del suolo in conseguenza di fenomeni di subsidenza e di sollevamento (tettonico e/o isostatico)
- CA3 – assetto geologico – morfostrutturale e presenza di litotipi con eteropia verticale e laterale
- CA4 – presenza di bacini imbriferi di tipo endoreico
- CA5 – presenza di fenomeni di erosione accelerata
- CA6 – condizioni meteo-climatiche
- CA7 – parametri fisico-meccanici dei terreni
- CA8 – parametri idrogeologici
- CA9 – parametri chimici del terreno e delle acque di falda
- CA10 – presenza di habitat e specie animali e vegetali di rilievo conservazionistico, nonché di geositi
- CA11 – produzioni agricole di particolare qualità e tipicità e luoghi di interesse archeologico e storico
- CA12 – disponibilità di vie di comunicazione primarie e infrastrutture di trasporto
- CA13 – presenza di infrastrutture critiche rilevanti o strategiche

Sulla base delle indicazioni contenute nei criteri di esclusione, e tramite la loro applicazione all'intero territorio italiano, Sogin ha realizzato la Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (CNAPI), consegnata inizialmente ad ISPRA il 2 gennaio 2015 e, in seguito al recepimento di alcune indicazioni e richieste di modifiche, il 13 marzo 2015 in versione definitiva. Secondo quanto riporta la GT29, questa prima fase di localizzazione *“consiste in una selezione di aree su scala nazionale effettuata tenendo conto di criteri connessi alle caratteristiche fisiche, chimiche, naturalistiche e antropiche del territorio che rendono compatibile un'area con la realizzazione di un deposito di smaltimento di rifiuti radioattivi a bassa e media attività. A tali fini è utilizzato un insieme di dati immediatamente disponibili ed utilizzabili, che potranno essere non esaustivi, ma già esistenti e raccolti in modo sistematico per il territorio nazionale, nonché una serie di indagini preliminari.”*

Infatti, il processo di localizzazione, così come inteso sia all'interno del D. Lgs. 31/2010 che della GT29, si compone di diverse fasi di analisi caratterizzate da un grado di approfondimento crescente, derivanti direttamente dalle indicazioni internazionali di riferimento, in particolare la guida SSG-29 (IAEA, 2014) (Fig. 1.3).



**Figura 1.3.** Corrispondenza delle fasi di localizzazione individuate nel D.Lgs. 31/2010, dalla IAEA (SSG-29) e dall'ISPRA (GT29)

Successivamente alla prima fase, esauritasi con la realizzazione della CNAPI, la GT29 riporta indicazioni di massima sullo svolgimento delle fasi successive:

*“La seconda fase è finalizzata ad individuare, nelle aree potenzialmente idonee, i siti da sottoporre ad indagini di dettaglio. La selezione viene effettuata sulla base di valutazioni con*

*dati a scala regionale, di eventuali verifiche in campo e tenendo conto di fattori socioeconomici.*

*La terza fase è finalizzata alla caratterizzazione tecnica di dettaglio di uno o più siti, in particolare per quanto riguarda il relativo comportamento nel lungo termine, per pervenire alla scelta del sito ove realizzare il deposito.”*

La GT29 deve, quindi, essere considerato il documento di riferimento del processo di localizzazione e caratterizzazione del sito ai fini della sua qualificazione (fase 3 ISPRA in Fig. 1.3); le successive due fasi del processo di localizzazione devono di conseguenza basarsi inizialmente sulla verifica completa dei criteri in essa contenuti, per poi procedere ad indagini di dettaglio finalizzate alla modellazione del sito a supporto delle verifiche di sicurezza, progettazione definitiva, Studio di Impatto Ambientale e avvio del programma di monitoraggio.

### **1.2.2 Il percorso verso la caratterizzazione del sito finale**

La procedura delineata dal D. Lgs. 31/2010 riportata in Fig 1.2 stabilisce che le ultime fasi del processo di localizzazione e caratterizzazione del sito definitivo debbano essere applicate nelle aree che saranno “oggetto d’intesa”, ossia le aree, tra quelle proposte nella CNAI (Carta Nazionale delle Aree Idonee), individuate a valle di un percorso costituito da confronti istituzionali, momenti di partecipazione pubblica e trattative con gli enti territoriali interessati. In ognuna delle aree “oggetto di intesa”, Sogin effettuerà indagini tecniche di dettaglio in seguito alle quali formulerà al Ministero per lo Sviluppo Economico una proposta di localizzazione del sito definitivo per la realizzazione del DN.

In accordo con le indicazioni IAEA contenute nel documento SSR-5 (*Specific Safety Requirement*) *Disposal of Radioactive Waste* (IAEA, 2011) - “*Requirement 15: site characterization for a disposal facility*”, il sito individuato per la realizzazione del deposito dovrà essere caratterizzato con un livello di dettaglio tale da condurre ad una generale comprensione delle sue caratteristiche e della sua evoluzione futura; gli studi di caratterizzazione dovranno riferirsi alle condizioni attuali del sito, alla sua probabile evoluzione naturale, ai possibili eventi naturali o attività umane nelle vicinanze che potrebbero interferire con il deposito nel tempo. Inoltre, come già anticipato, all’interno del sito che ospiterà il Deposito Nazionale, oltre alle strutture adibite allo smaltimento di rifiuti a bassa e media attività verrà inserito il deposito per lo stoccaggio temporaneo di lunga durata



dei rifiuti ad alta attività che richiedono, per loro natura, un maggiore grado di sicurezza e controllo; il grado di dettaglio che deve essere raggiunto dalle indagini per la qualificazione del sito e del suo intorno significativo dovrà quindi essere esaustivo al fine della garanzia di sicurezza per entrambe le strutture del Deposito Nazionale, sulla base del *Safety Approach* definito da IAEA nella guida SF-1 (IAEA, 2006).

Il presente progetto di ricerca si colloca nella fase di definizione delle procedure per la caratterizzazione ai fini della qualificazione per l’Autorizzazione Unica per la costruzione e l’esercizio del Deposito Nazionale e per la sua progettazione definitiva, per quanto riguarda la pericolosità derivante dalla fagliazione superficiale e fa quindi riferimento al criterio CE3 della GT29.

## **2 La pericolosità da fagliazione superficiale**

La pericolosità sismica comprende tutti i fenomeni naturali generati da un terremoto, che possono causare danni anche molto ingenti sull'ambiente fisico naturale e antropico. In generale, nella pratica ingegneristica, con pericolosità sismica ci si riferisce specificatamente alle componenti che caratterizzano lo scuotimento del suolo che potrebbero interessare le strutture in occasione di un terremoto. In alcuni casi tuttavia non si può prescindere dalla considerazione e dalla valutazione di altre componenti della pericolosità derivante dal verificarsi di un evento sismico, come ad esempio il fenomeno della liquefazione del terreno e la fagliazione superficiale, considerata in questo progetto di ricerca.

La fagliazione superficiale è definita come la dislocazione in corrispondenza, ovvero in prossimità, della superficie topografica che deriva, per via diretta o indiretta, da movimenti tettonici lungo una faglia, detta "faglia capace" (*sensu* IAEA, 2010), tipicamente durante forti rilasci di energia sismica. Sulla base di questa definizione è possibile equiparare le faglie capaci alle *strutture sismogenetiche lineari* definite da Caputo (2005), ossia strutture generate da un evento sismico in grado di originare o modificare istantaneamente e permanentemente la superficie terrestre, *terremoto morfogenico* (Caputo, 1993), che presentano una geometria ed una conformazione lineare, come ad esempio scarpate formatesi in seguito alla propagazione di una rottura cosismica fino alla superficie.

Il territorio italiano è interessato da un gran numero di faglie capaci che hanno già prodotto numerosi eventi di fagliazione superficiale in tempi storici e recenti (ad esempio Fucino 1915,  $M_w = 7$ ; Irpinia 1980,  $M_w = 6.5$ ; L'Aquila 2009,  $M_w = 6.3$ ; ...). Il potenziale di rottura tettonica superficiale costituisce quindi un rischio specifico che ricopre una grande importanza nel nostro Paese ed è un fattore fortemente limitante l'idoneità di un'area rispetto ad un requisito di sicurezza per la realizzazione di un'opera ingegneristica, e, nel caso specifico del DN, sia nel periodo di operatività, ossia il suo caricamento (circa 50 anni), che nei secoli successivi di controllo istituzionale del sito (circa 300 anni), per il mantenimento delle caratteristiche di isolamento dei rifiuti rispetto all'ambiente.

### **2.1 La valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale**

In generale, la valutazione del potenziale rischio da fagliazione superficiale presente in un dato sito è un processo complesso, soprattutto a causa della grande eterogeneità che caratterizza l'ambiente naturale. Infatti, molte faglie attive sono complesse, costituite da numerose

rottture e molte volte le prove per identificarle e per riconoscerle come attive e capaci risultano alterate o cancellate dagli agenti che modellano la superficie della Terra. Per cercare di ottenere un certo grado di omogeneità, l'individuazione delle strutture su cui effettuare l'analisi del rischio si basa principalmente su due concetti:

- nonostante la magnitudo, e la natura della rottura possano variare per faglie differenti o anche lungo diversi tratti della stessa faglia, le future rottture sono attese lungo faglie pre-esistenti (Bonilla, 1970) e lo sviluppo di una nuova faglia o la riattivazione di una faglia inattiva da molto tempo (nessuna riattivazione nel Quaternario) è relativamente raro e generalmente non è necessario considerarlo nello sviluppo di un sito;
- più un faglia è recente, più grande è la probabilità di rottture future (Allen, 1975). Tuttavia, non deve essere dimenticato che mentre alcune faglie hanno un'attività ricorrente misurata in centinaia di anni altre possono essere inattive per migliaia di anni prima della loro riattivazione e altre ancora possono essere caratterizzate da *creep* asismico che può essere più o meno continuo.

Un'altra considerazione importante è che gran parte della fagliazione superficiale è di solito confinata in una fascia relativamente stretta, da qualche metro a decine di metri, a cavallo della traccia della faglia capace così come definibile prima dell'evento sismico; la valutazione dell'ampiezza di questa fascia (indicata con il termine di *setback*) e il divieto di costruire all'interno di essa risulta il metodo di mitigazione più appropriato. Indicazioni relative alle dimensioni di queste zone sono state definite per la prima volta in California con l'*Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act* fin dal 1972 (Bryant and Hart, 2007). Le zone definite sono di due tipi: *Earthquake Fault Zone* (EFZ), ossia la distanza (~ 150 m per faglie ben definite e 60-90 m per faglie minori) entro cui devono essere effettuate approfondite indagini sul rischio di fagliazione prima della costruzione di edifici destinati all'occupazione umana, e *Setback*, ossia la distanza minima (~ 15 m) entro cui è assolutamente vietata la costruzione di impianti critici e di edifici destinati all'occupazione umana. In seguito a studi condotti in Utah, lungo la faglia Wasatch, è stato proposto un nuovo approccio per il calcolo del *setback* (Batatian, 2002) che prevede (Fig. 2.1):

per il calcolo del *Setback* sul tetto:

$$S = U (2D + F/\tan\theta)$$

per il calcolo del *Setback* sul tetto:

$$S = U \times 2D$$

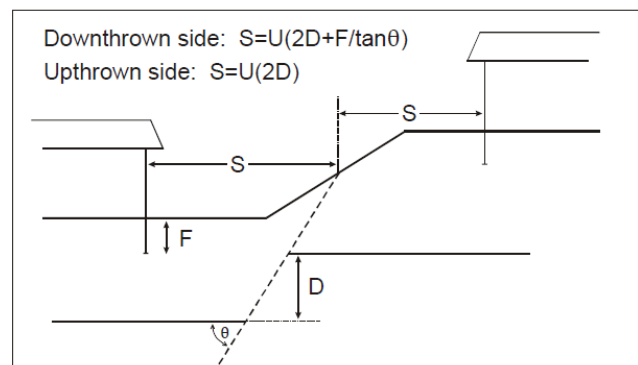
dove:

U = fattore di criticità definito da valori tabellati a seconda del futuro utilizzo della struttura

D = dislocazione per evento atteso

F = massima profondità delle fondamenta dell'edificio

$\theta$  = Dip della faglia



**Figura 2.1.** Illustrazione dei parametri utilizzati nel calcolo del setback (McCalpin, 2009)

In alcuni casi però la fagliazione può essere distribuita attraverso fasce larghe anche centinaia di metri o manifestarsi come ampie deformazioni, suggerendo che rafforzamenti ingegneristici o la progettazione possono essere valori mitigativi aggiuntivi importanti soprattutto nel caso in cui una struttura non possa essere realizzata evitando totalmente strutture capaci e in cui le soluzioni progettuali siano sensibili alla quantità di dislocazione. Inoltre impianti esistenti potrebbero dover essere analizzati per la presenza di pericolosità da fagliazione superficiale, a causa dei nuovi regolamenti più restrittivi o la scoperta di nuovi rischi al sito (ad esempio Chapman et al., 2014; Baize, 2015).

In generale, il calcolo di valori utili alla progettazione di elementi ingegneristici per la mitigazione del rischio derivante da fagliazione possono seguire un approccio deterministico o un approccio probabilistico.

In origine i metodi deterministici e probabilistici sono stati sviluppati per il calcolo dei valori di accelerazione al suolo attesi al sito all'interno della valutazione del rischio sismico.

In generale, in un'analisi deterministica il rischio sismico al sito è valutato come lo scenario peggiore, indipendente dal tempo di probabile occorrenza, o dal tempo di esposizione o dalla vita progettata dell'impianto. Il rischio viene calcolato applicando i parametri della sorgente (ubicazione, magnitudo) alle condizioni del sito, attraverso algoritmi che rappresentano i

processi fisici. In pratica, una valutazione deterministica assume che un grosso terremoto si verificherà abbastanza vicino al sito perché esso ne risenta, e stabilisce come determinarne gli effetti.

Nell'analisi probabilistica del rischio sismico, il rischio al sito è specificato come i peggiori effetti che potrebbero avvenire, con una data probabilità di eccedenza, all'interno di un periodo di tempo (tempo di esposizione) collegato alla vita progettata per l'impianto, o con una data probabilità annuale. I rischi sono calcolati applicando i parametri della sorgente sismica (posizione, magnitudo, tasso) per definire e localizzare le condizioni attraverso una serie di algoritmi che legano la frequenza di magnitudo di tutte le possibili sorgenti sismiche alla distanza dal sito e alle sue caratteristiche.

Le valutazioni del rischio di tipo deterministico sono state le più usate negli anni '60 -'70, andando però lentamente a essere integrate o rimpiazzate dai metodi probabilistici. Tuttavia, sono ben lontane dalla risoluzione le controversie su quale metodo possa predire rischi futuri nel modo più accurato. L'analisi di tipo deterministico è stata criticata per essere troppo conservativa per la progettazione, poiché il suo rischio da "scenario peggiore" richiede enormi sforzi progettuali e costi, pur potendo presentare probabilità molto piccole di occorrenza. Gli ingegneri hanno stabilito che la progettazione delle strutture con una vita di progetto breve, nel caso di scenari di rischio con probabilità molto bassa diventi estremamente costosa, soprattutto se la struttura comporta piccoli rischi per la vita o la sicurezza. Anche l'analisi di tipo probabilistico è stata criticata, ma per ragioni differenti (es. Musson et al., 2005). Alcune critiche si basano sul fatto che gli algoritmi usati nella valutazione probabilistica non riflettono propriamente i processi fisici che controllano l'accadimento dei terremoti e che i risultati portino a sottostimare la pericolosità.

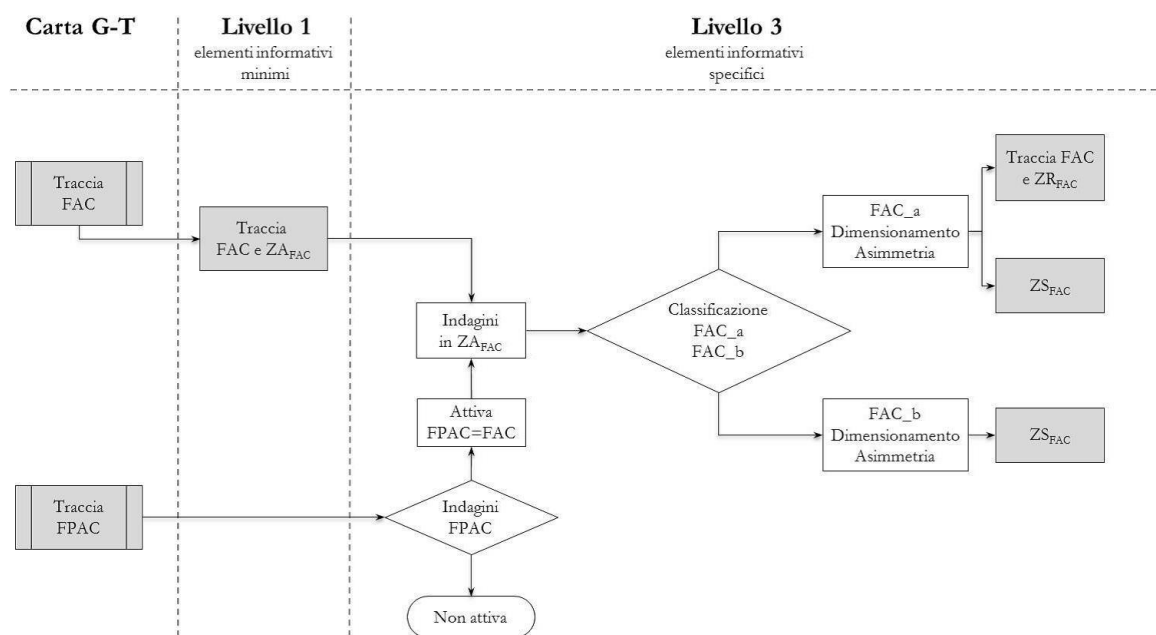
Negli ultimi anni sono stati sviluppati anche metodi ibridi che combinano approcci deterministici e probabilistici, come ad esempio quello proposto dall'Organizzazione per la gestione dei rifiuti nucleari del Giappone (NUMO) (Goto et al., 2008). In questo metodo, le sorgenti sismiche all'interno dell'area intorno al sito entro il raggio regolamentato (tipicamente 160 o 320 km) sono analizzate usando un'analisi deterministica per calcolare lo scenario peggiore di accelerazione al suolo al sito. Quelle faglie che hanno uno scenario predetto con valori di accelerazione al suolo inferiori ad un valore dato (in questo caso  $pga < 0,05g$ ) sono considerate insignificanti e vengono eliminate dalle valutazioni future. Le

rimanenti vengono invece incluse in un’analisi probabilistica. L’uso di metodi ibridi potrebbe eliminare parte delle criticità di entrambi i metodi.

In tempi relativamente recenti sono state sviluppate metodologie sia deterministiche che probabilistiche, derivate direttamente da quelle per il calcolo dell’accelerazione al suolo attesa al sito, per l’analisi del rischio di fagliazione (cfr § 3).

**2.1.1 La valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale in Italia**

In Italia, ai fini della pianificazione del territorio, il problema è trattato nelle linee guida e nei criteri per la microzonazione sismica (Gruppo di Lavoro MS, 2008) e in particolare nelle recenti *“Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci”* (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015). Le linee guida per la microzonazione sismica definiscono le microzone omogenee specifiche ( $Z_{A_{FAC}}$  – Zona di attenzione;  $Z_{S_{FAC}}$  – Zona di suscettibilità;  $Z_{R_{FAC}}$  – Zona di rispetto) come quelle zone di instabilità intorno a faglie attive all’interno delle quali prevedere studi con diversi livelli di approfondimento (Fig. 2.2).



**Figura 2.2.** Procedure di dimensionamento delle zone di faglia nei differenti livelli di approfondimento degli studi di Microzonazione Sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015)

In letteratura si possono ritrovare due esempi, applicati al territorio italiano, di definizione di particolari zone in prossimità della traccia in superficie della faglia. Galli et al. (2005) sulla base

di indagini effettuate in corrispondenza della faglia di Norcia suggerisce l'uso di zone centrate sulle tracce di faglia, con un *setback* di 15 m per tracce di faglia conosciute e 75 m per tracce di faglie incerte. Boncio et al. (2012) invece, propone, in seguito ad un confronto tra dati raccolti a livello mondiale e i dati derivanti dallo studio della fagliazione superficiale provocata dal terremoto del 2009 de L'Aquila, un valore per il *setback* pari a 40 m per il tetto e 15 m per il letto e una EFZ (*Earthquake Fault Zones*) per tetto e letto rispettivamente di 150 m e 30 m, valori che gli Autori definiscono potenzialmente applicabili anche ad altri siti caratterizzati da fagliazione normale. Altri valori di *setback* per l'Italia si riferiscono alla particolare situazione tettonica dell'area intorno all'Etna per cui è stato definito un valore di *setback* pari a 50 m a cavallo delle strutture e in cui viene esplicitamente considerato anche il fenomeno del *creep* asismico. Ulteriori proposte relative a valori di *setback*, differenziati in base alla tipologia di faglia, sono state delineate da Guerrieri et al., (2014) per l'applicazione di una metodologia per la valutazione preliminare della pericolosità da fagliazione superficiale in aree urbane partendo dai dati di fagliazione superficiale contenuti in ITHACA (*ITaly HAZard from Capable faults*) (Fig. 2.3).

Fault Class (with $M_{max}$ ranges)	Normal faults		Examples
	Maximum expected offset (vertical)	Hazard zone width	
<b>1</b> ( $5.5 < M_{max} < 6.0$ )		HW: 50 m FW: 30 m	
<b>2</b> ( $6.0 < M_{max} < 6.3$ )		HW: 150 m FW: 30 m	
<b>3</b> ( $6.3 < M_{max} < 6.6$ )		HW: 200 m FW: 40 m	
<b>4</b> ( $6.7 < M_{max} < 7.0$ )		HW: 250 m FW: 50 m	
<b>5</b> $M_{max} > 7.0$		HW: 300 m FW: 100 m	

Fault Class (with $M_{max}$ ranges)	Reverse faults		Strike-slip faults	
	Maximum expected offset (vertical)	Hazard zone width	Maximum expected offset (horizontal)	Hazard zone width
<b>1</b> ( $5.5 < M_{max} < 6.0$ )				
<b>2</b> ( $6.0 < M_{max} < 6.3$ )				
<b>3</b> ( $6.3 < M_{max} < 6.6$ )				
<b>4</b> ( $6.7 < M_{max} < 7.0$ )				

Figura 2.3. Classificazione delle faglie contenute in ITHACA (Guerrieri et al., 2014)

### 2.1.2 Individuazione della metodologia adatta per la valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale per la realizzazione del DN

Oltre a quanto indicato nei paragrafi precedenti, nel caso del DN è necessario fare riferimento alla normativa specifica nell'ambito del nucleare. In particolare, per quanto riguarda la localizzazione di nuovi impianti nucleari, la guida SSG-9 (IAEA, 2010) fornisce la seguente indicazione "Where reliable evidence shows that there may be a capable fault with the potential to affect the safety of a plant at a site, the feasibility of design, construction and safe operation of a plant at this site should be re-evaluated and, if necessary, an alternative site should be considered.", derivante dalle grandi incertezze associate alla valutazione della pericolosità associata dalle difficoltà nella mitigazione degli effetti sulle strutture causati da dislocazioni permanenti del suolo (ANSI/ANS - 2.30, 2015).

Tale principio è rappresentato nel criterio CE3 della GT29, il quale stabilisce che le porzioni di territorio interessate da fenomeni di fagliazione superficiale devono essere considerate non idonee ad ospitare il DN. Nella formulazione del criterio viene specificato che le fonti dei dati per la sua applicazione devono essere il database ITHACA<sup>3</sup> e il database DISS<sup>4</sup> (Database of

<sup>3</sup> <http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page>

<sup>4</sup> <http://diss.rm.ingv.it/diss/>



*Individual Seismogenic Sources*). Sulla base di considerazioni derivanti dalle pubblicazioni relative alla realizzazione dei due database (ad es. DISS Working Group, 2010), dalla normativa italiana e internazionale e dalle indicazioni fornite da IAEA (in particolare SSG-9 e SSG-29), nella prima fase di localizzazione che ha portato alla realizzazione della CNAPI, è stato applicato un *buffer* ad ogni traccia in superficie delle strutture presenti all'interno di DISS e ITHACA, e le aree ricadenti all'interno di queste fasce sono state escluse. Tale *buffer* rappresenta quindi una sorta di *setback* per il DN che, a causa della rilevanza di tale infrastruttura, in termini di vita nominale di progetto, livello di sicurezza e prestazioni attese, ha dimensioni molto maggiori rispetto a quelle indicate negli esempi italiani riportati nel paragrafo precedente.

Tuttavia i due cataloghi non possono essere considerati completi, poiché continuamente migliorati e arricchiti con informazioni e dati derivanti da nuovi studi e dall'utilizzo di tecnologie più avanzate. Nel caso di un'ipotetica applicazione al processo di localizzazione del DN, perché le aree rimanenti possano essere considerate idonee rispetto al criterio CE3 sarebbe quindi necessario che nelle fasi successive riconducibili alla caratterizzazione del sito, che richiede un maggior dettaglio, si proceda con una metodologia di valutazione della presenza di fagliazione superficiale differente (Roncoroni et al., 2015). Nelle fasi di caratterizzazione sarà quindi necessario effettuare indagini mirate sulle aree "oggetto d'intesa" che prevedano l'acquisizione di un insieme di dati geologici e geofisici completo e coerente con un grado di approfondimento sempre crescente per il riconoscimento delle faglie potenzialmente capaci che potrebbero interessare il sito definitivo (Roncoroni, 2016).

In seguito alle indagini di caratterizzazione, nonostante l'alto grado di dettaglio, potrebbe essere presente una certa quantità di pericolosità da fagliazione superficiale residua riconducibile principalmente a due differenti origini:

- l'analisi attraverso le indagini dirette per la caratterizzazione dei parametri di faglia per una valutazione deterministica della pericolosità potrebbero non essere sufficienti per stabilire con un sufficiente grado di affidabilità se una faglia debba essere considerata capace oppure no;
- in seguito a eventi sismici potrebbero verificarsi dislocazioni su strutture secondarie che possono trovarsi anche a diversi chilometri di distanza dalla faglia sismogenica, e che risultano più difficili da riconoscere nelle indagini di sito.

Come riportato nella SSG-9 (IAEA, 2010), qualora non si riuscisse ad ottenere dati sufficienti per considerare una faglia non capace, nella valutazione della pericolosità si dovrà introdurre una componente probabilistica che, sulla base di tutti i dati disponibili, porti alla stima della probabilità annuale di eccedenza di diverse quantità di dislocazione, in superficie o vicino ad essa, di significato ingegneristico.

Per quanto riguarda le rotture secondarie, che nel presente lavoro sono intese come le rotture che si verificano su altre faglie o fratture al di fuori della traccia della faglia primaria sismogenica in seguito alla sua riattivazione, esse risultano per natura discontinue e possono essere ritrovate fino a molte decine di metri o addirittura a diversi chilometri di distanza dalla rottura principale (ad es. Youngs et al., 2003).

Sebbene le rotture superficiali causate da queste strutture siano normalmente molto inferiori a quelle generate in corrispondenza della faglia sismogenica, non solo possono danneggiare le strutture proprie del DN e le infrastrutture di servizio ad esso associato (strade, tubazioni,...) che possono compromettere l'operatività dell'impianto, ma potrebbero modificare le geometrie dell'ambiente geologico, idrogeologico e idrologico dell'ambiente circostante e modificare le condizioni di isolamento e gli eventuali *pattern* di diffusione dei radionuclidi (ad es. Bense et al., 2013).

Inoltre, i recenti sviluppi nelle tecniche di telerilevamento (LiDAR, InSAR, ...) hanno dimostrato che, in occasione di un evento sismico, si possono verificare rotture superficiali non solo lungo scarpate di faglia pre-esistenti ma anche lungo numerose strutture tettoniche al di fuori della zona di principale rottura (Toda, 2015) confermando che un'analisi di tipo probabilistico può rappresentare la metodologia di valutazione più adatta.

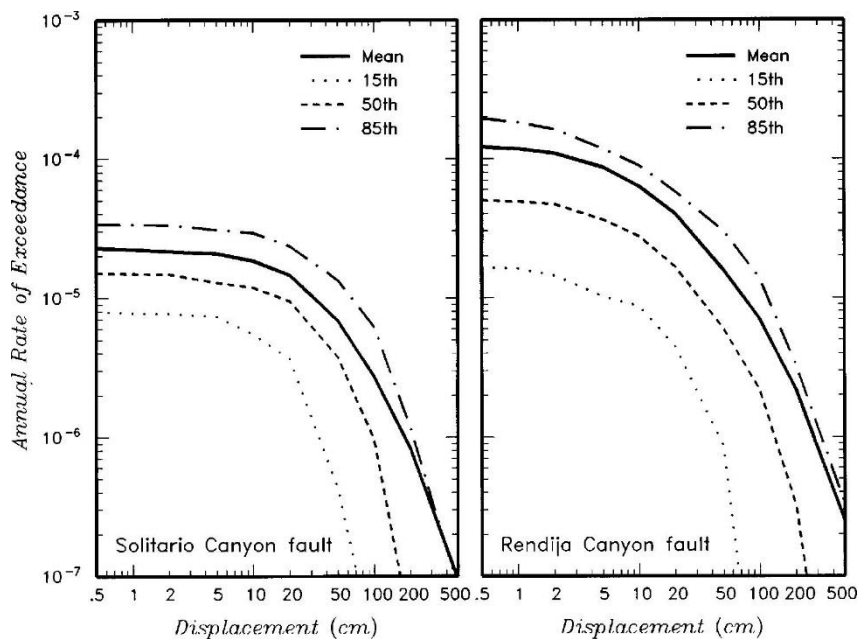
In generale, la valutazione probabilistica dà infatti la possibilità di considerare gli effetti di tutti gli eventi possibili, e verosimili, che possono interessare le strutture considerate e con che probabilità possano verificarsi nel corso della vita programmata di un'opera; questo punto risulta di fondamentale importanza se si considera la durata della vita programmata di un deposito per lo smaltimento definitivo di rifiuti radioattivi, che è nell'ordine dei secoli. Inoltre, effettuare le valutazioni su base probabilistica potrebbe potenzialmente permettere comparazioni tra il rischio sismico e altri rischi derivanti da altri fonti di pericolo, sia di origine naturale che umana (ad es. Todorovska et al., 2007).

### ***La pericolosità da fagliazione superficiale***

Per i motivi sopra riportati, la ricerca è stata quindi focalizzata sulle metodologie probabilistiche, che, anche in virtù delle finalità ingegneristiche e di modellazione previste nel processo di caratterizzazione per la qualificazione del sito definito in cui realizzare il DNPT, potranno essere utilizzate a valle della caratterizzazione sismotettonica effettuata tramite analisi dirette.

### 3 L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale

L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale (PFDHA – *Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis*) deriva direttamente dalle metodologie sviluppate per la valutazione probabilistica del movimento al suolo (PSHA – *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*), che viene modificata tramite la sostituzione della funzione di attenuazione dei movimenti al suolo con funzioni di attenuazione della dislocazione e dà, normalmente, come risultato una curva di pericolosità che mette in relazione un valore di dislocazione e la probabilità annuale che un evento di dislocazione superi tale valore stabilito (Fig.3.1).



**Figura 3.1.** Esempio di curva di pericolosità risultante da una valutazione probabilistica. Yucca Mountain (Youngs et al., 2003)

Inizialmente la PFDHA è stata sviluppata per l'integrazione della valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale all'interno dell'analisi del rischio sismico per la realizzazione di un deposito profondo per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi negli Stati Uniti, in corrispondenza del sito di Yucca Mountain (Nevada) (CRWMS M&O, 1998; Stepp et al., 2001). Youngs et al., (2003) presenta due differenti metodologie, l' "approccio terremoto" (*earthquake approach*) e l' "approccio dislocazione" (*displacement approach*).

#### "Approccio terremoto"

Tale approccio deriva direttamente dalla PSHA, e relaziona esplicitamente il verificarsi di una dislocazione su una faglia sulla superficie o vicino ad essa, in corrispondenza del sito di interesse, con il verificarsi di terremoti (movimento della faglia in profondità). Il risultato viene

espresso come il tasso  $\nu_k(d)$  al quale la dislocazione ( $D$ ) su una struttura supera una specificata quantità ( $d$ ), ed è dato da (Youngs et al., 2003):

$$\nu_k(d) = \sum_n \alpha_n(m^0) \int_{m^0}^{m^u} f_n(m) \left[ \int_0^\infty f_{kn}(r|m) \cdot P_{kn}(D > d|m, r) \cdot dr \right] \cdot dm$$

dove:

- $\alpha_n(m^0)$  è il tasso di occorrenza di tutti i terremoti sulla sorgente  $n$  che registrino una magnitudo superiore a un dato valore  $m^0$ ;
- $f_n(m)$  è la densità di probabilità che descrive il verificarsi di un terremoto di dimensioni comprese tra  $m^0$  e il massimo terremoto che la sorgente  $n$  può produrre (Fig. 3.2 punto 2, grafico di sinistra);
- $f_{kn}(r|m)$  è la funzione di densità della probabilità condizionale per la distanza  $r$  da un sito  $k$  rispetto a un terremoto di magnitudo  $m$  sulla struttura  $n$  (Fig. 3.2 punto 2, grafico di destra);
- $P_{kn}(D > d|m, r)$  è la funzione di attenuazione della dislocazione in corrispondenza della superficie o vicino ad essa. Tale funzione è composta dai seguenti termini (Fig. 3.2 punto 3):

$$P_{kn}^*(D > d|m, r) = P_{kn}(Slip|m; r) \cdot P_{kn}(D > d|m, r, Slip)$$

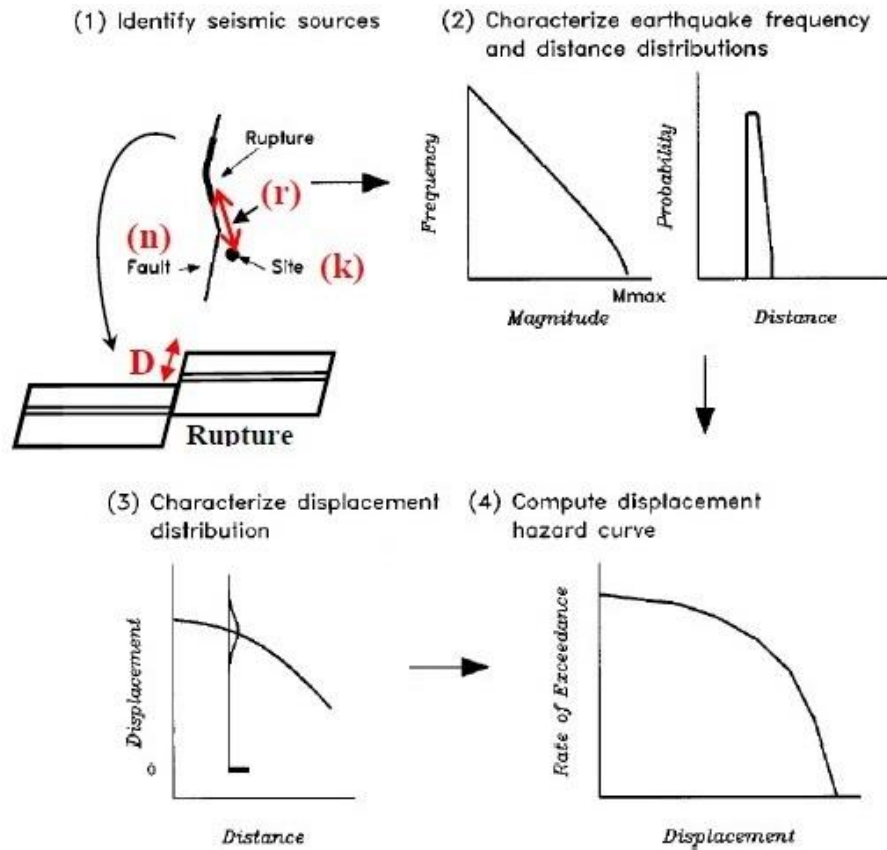
dove:

- $P_{kn}(Slip|m; r)$  è la probabilità condizionale che una certa quantità di dislocazione si verifichi al sito  $k$  come risultato di un terremoto (movimento della faglia in profondità) di magnitudo  $m$  sulla sorgente  $n$  con rottura a una distanza  $r$  dal sito;
- $P_{kn}(D > d|m, r, Slip)$  definisce la distribuzione condizionale della quantità di dislocazione che si verifica in seguito a quel movimento.

L' "approccio terremoto" viene diviso in due tipologie, a seconda del tipo di fenomeno di fagliazione analizzato (Fig. 3.3):

- fagliazione primaria, che indica le rotture conseguenti al movimento lungo il/i piano/i principali di debolezza crostale responsabili del rilascio di energia sismica durante un

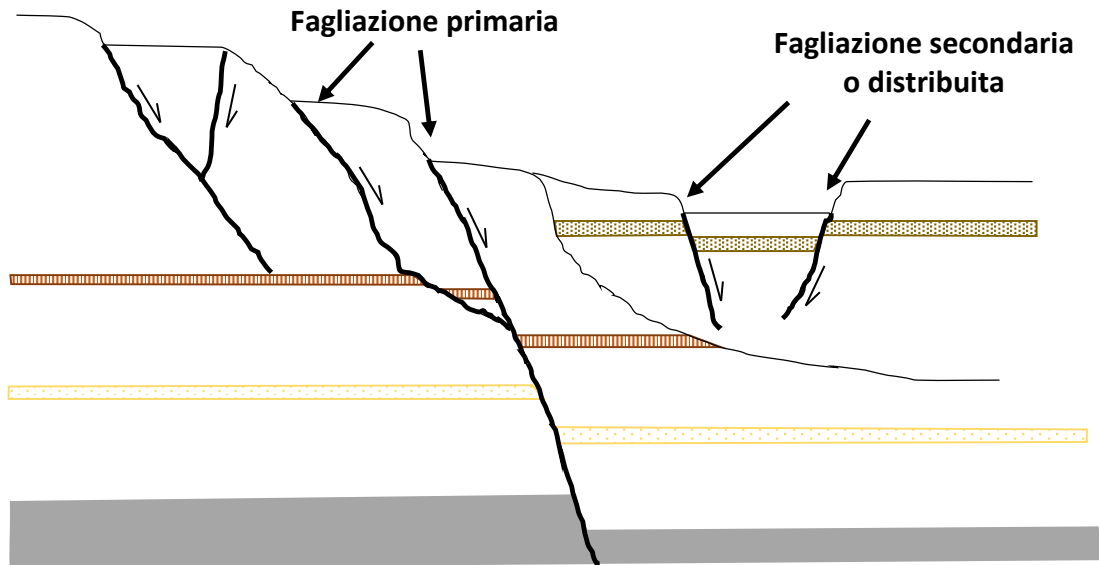
## L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale



**Figura 3.2.** Rappresentazione schematica dei parametri e delle componenti principali di una valutazione probabilistica (modificato da Youngs et al., 2003)

terremoto. Dove la rottura principale raggiunge la superficie, essa può essere rappresentata da una dislocazione lungo una singola traccia sottile o lungo una zona che può variare tra pochi fino a molti metri. Le faglie interessate sono quelle che possono produrre terremoti (ossia direttamente correlate alla sorgente primaria del rilascio di energia);

- fagliazione secondaria (o distribuita), che indica le rotture che tipicamente risultano associate a movimenti indotti lungo piani di scorrimento pre-esistenti (IAEA, 2010), ad esempio faglie o fratture situate nelle vicinanze della faglia sismogenica (non è necessario che la rottura sulla faglia primaria raggiunga la superficie). La fagliazione distribuita è discontinua in natura e normalmente avviene su un'area che può estendersi da diverse decine di metri fino a diversi chilometri dalla rottura principale. Una faglia che può produrre una rottura principale può anche innescare fagliazione distribuita.



**Figura 3.3.** Rappresentazione schematica della fagliazione primaria e secondaria

#### "Approccio dislocazione"

Tale approccio utilizza le caratteristiche della dislocazione della faglia osservate al sito di interesse per quantificare il rischio derivante. La relazione di eccedenza di uno specifico livello di dislocazione può essere scritta nella forma semplificata (Youngs et al., 2003):

$$v(d) = \lambda_{DE} \cdot P(D > d | Slip)$$

dove:

- $\lambda_{DE}$  è il tasso degli eventi di dislocazione;
- $P(D > d | Slip)$  è la probabilità condizionale che la dislocazione in un singolo evento ecceda il valore  $d$ , a patto che si verifichi un movimento (*Slip*) sulla struttura.

Il tasso di eventi di dislocazione sulla struttura è specificato direttamente senza identificare il meccanismo causativo di questi eventi. Poiché la sorgente non viene trattata esplicitamente, diversamente da quanto detto nell'"approccio terremoto", la distinzione tra fagliazione principale e fagliazione distribuita non è necessaria e la funzione di probabilità condizionale  $P(Slip | event)$  risulta compresa nella specificazione di  $\lambda_{DE}$ . Idealmente il tasso  $\lambda_{DE}$  dovrebbe essere stimato dalle età definite per le rotture di una faglia e la probabilità  $P(D > d | Slip)$  dovrebbe essere stimata dalla distribuzione di *slip* misurati per queste rotture. Questi dati tuttavia spesso non sono disponibili e sono quindi necessari altri approcci per la loro valutazione (Youngs et al., 2003).

Per il raggiungimento degli obiettivi della presente ricerca, si è scelto di considerare unicamente l' "approccio terremoto"; la scelta si è basata principalmente sulla potenziale maggiore disponibilità di dati e probabilmente minore difficoltà nell'ottenere di nuovi, sulla diretta derivazione del metodo da quello per la PSHA (che dovrà essere anch'esso sviluppato per l'applicazione alla localizzazione del DN) con il quale, come illustrato in seguito, mantiene alcune parti in comune, sulla maggiore diffusione di implementazioni, sviluppi e applicazioni a livello internazionale (ad es. NRC, 2012, Takao et al., 2013), ma soprattutto perché risulta la metodologia più adatta per la valutazione della pericolosità derivante dalla fagliazione secondaria, la componente potenzialmente più interessante per il DN.

Di seguito verrà illustrata la metodologia e le assunzioni alla base della PFDHA; l'illustrazione dettagliata delle caratteristiche proprie delle equazioni necessarie in questo approccio e le metodologie per la valutazione e la definizione dei parametri necessari al calcolo saranno invece riportate nel capitolo successivo all'interno della proposta di linee guida. Le metodologie riportate sono quelle selezionate in funzione degli obiettivi del presente lavoro, saranno inserite nella procedura proposta e dovranno quindi fornire un ventaglio di possibilità adeguato al contesto italiano per una eventuale applicazione al processo di localizzazione del DN e caratterizzazione del sito definitivo.

### **3.1 Caratterizzazione della sorgente sismogenica**

La caratterizzazione della sorgente sismogenica è una delle componenti fondamentali dell'analisi ed è rappresentata dai primi tre elementi del modello sopra riportato, che risultano essere in comune con i modelli di valutazione della pericolosità sismica derivante da scuotimento al suolo (PSHA) (ad es. Cornell 1968). In generale, per il calcolo di questi primi 3 fattori si fa quindi riferimento alla nutrita letteratura relativa alla PSHA. In caso di analisi effettuate per la localizzazione di impianti a rischio di incidente rilevante, al fine di ridurre il più possibile le incertezze associate, risulta necessario effettuare studi sito-specifici per definire al meglio i metodi di calcolo più adatti, l'ubicazione, la geometria e le caratteristiche della sorgente, sia su terremoti storici osservati sia su evidenze paleosismiche, con particolare attenzione alla definizione della finestra temporale di riferimento di interesse.

#### **$\alpha_n(m^0)$**

Questo parametro viene definito in funzione della magnitudo e può essere il tasso riferito ad una singola rottura o una funzione di terremoti cumulativi oltre una magnitudo minima di



significato ingegneristico  $m_0$ . Per la definizione di questo parametro sono disponibili diverse metodologie, che utilizzano ad esempio lo *slip-rate* di faglia, il momento sismico o la sismicità storica.

Lo *slip-rate* di faglia rappresenta il tasso al quale due lati opposti di una faglia si muovono l'uno rispetto all'altro. Spesso viene calcolato come un tasso medio e viene determinato dividendo la dislocazione accumulata per il periodo di tempo all'interno del quale si è verificato il movimento che ha portato a quei valori di rigetto, nonostante esso possa essere stato causato sia da un movimento continuo sia dalla somma di uno o più movimenti causati da terremoti (NRC, 2012). Lo *slip-rate* di faglia è un parametro fondamentale della caratterizzazione della sorgente sismogenica perché rappresenta il tasso secondo il quale si verifica l'accumulo e il rilascio di energia; di conseguenza, determina anche la quantità di energia sismica (momento sismico) che una faglia è in grado di rilasciare in occasione di terremoti nel tempo ed è quindi necessario porre grande attenzione nella sua determinazione, come ad esempio, nel caso in cui non si hanno a disposizione dati specifici sulla faglia studiata e il valore di *slip-rate* deve essere derivato da quello regionale. Il calcolo del tasso  $\alpha_n(m^0)$  sulla base dei valori di *slip-rate* è basata sull'equilibrio tra l'accumulo del momento sismico, ossia il parametro quantitativo che mette in relazione l'energia rilasciata in occasione di un particolare terremoto con i parametri chiave utilizzati per determinare la magnitudo di quell'evento, e il suo rilascio su lungo periodo attraverso terremoti.

### **$f_n(m)$**

Questo parametro definisce la distribuzione dell'occorrenza dei terremoti la cui magnitudo ricada all'interno dell'intervallo compreso tra  $m_0$  e la magnitudo massima che la sorgente considerata può essere verosimilmente in grado di produrre. Tipicamente, nelle analisi di pericolosità, si assume che una faglia possa sperimentare comportamenti differenti:

- rompere ripetutamente provocando terremoti di magnitudo simile (modello del terremoto caratteristico);
- rompere con una sequenza di terremoti (modello di distribuzione esponenziale troncata) (Gutenberg and Richter, 1954).

Singole faglie spesso rilasciano la maggior parte dello stress accumulato attraverso terremoti di uguali dimensioni (caratteristici) con valori di magnitudo compresi in piccolo intervallo vicino al valore massimo potenziale (Schwartz e Coppersmith, 1984). I modelli del terremoto caratteristico assumono una distribuzione uniforme dei terremoti entro un intervallo nell'intorno della magnitudo caratteristica (che spesso corrisponde con quella massima) non prendendo quindi in considerazione i terremoti con magnitudo piccola o moderata (NRC, 2012). Per una rappresentazione più verosimile delle distribuzioni dei terremoti sulla faglia si suggerisce l'utilizzo di modelli compositi che combinano una distribuzione esponenziale troncata per i terremoti con magnitudo più piccole e una distribuzione uniforme intorno alla magnitudo caratteristica per terremoti di maggiore entità (Youngs and Coppersmith, 1985).

### ***$f_{kn}(r|m)$***

Tale parametro definisce la probabilità condizionata per cui avvenga un terremoto di magnitudo  $m$ , alla distanza  $r$  dal sito  $k$ , sulla struttura  $n$ . Tale distribuzione normalmente viene caratterizzata assumendo che il terremoto possa avvenire in qualsiasi punto con uguale probabilità su tutta la lunghezza della faglia, ubicando in modo casuale una rottura, con dimensione appropriata per il valore di magnitudo  $m$  definito (sulla base di relazioni empiriche come ad esempio Wells e Coppersmith, 1994), e calcolando le distanze della rottura dal sito; questo perché le faglie non sempre sperimentano la rottura su tutta la lunghezza mappata.

## **3.2 Definizione delle equazioni di attenuazione**

Ai fini della valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale, la componente più caratteristica del modello che deve essere definita con maggiore attenzione è:

$$P_{kn}(D > d|m, r) = P_{kn}(Slip|m) \cdot P_{kn}(D > d|m, r, Slip)$$

ossia la funzione di attenuazione che descrive il comportamento nello spazio della dislocazione originata dall'evento sismico, ossia la variazione della quantità di dislocazione con la magnitudo e la distanza.

La definizione dei due termini che costituiscono la funzione di attenuazione è un processo centrale nella PFDHA. Secondo la procedura definita da Youngs et al. (2003), entrambi i termini possono essere ugualmente utilizzati per la valutazione della pericolosità associata sia a rotture sulla faglia principale sia a dislocazioni su rotture secondarie. Parte fondamentale della

definizione delle funzioni di attenuazione sono la raccolta, la compilazione e l'analisi dei dati relativi alle distribuzioni delle rotture lungo le faglie primarie e l'analisi delle distribuzioni di fagliazione secondaria mappate in occasione di eventi sismici; queste informazioni costituiscono la base su cui poter ricostruire i modelli di comportamento del fenomeno. Il metodo originariamente sviluppato per il sito di Yucca Mountain e descritto in Youngs et al. (2003), è stato realizzato per l'applicazione in un ambiente caratterizzato da fagliazione normale ma può essere applicato a tutti i tipi di ambiente tettonico. Ciò che è necessario per applicare una PFDHA su strutture a cinematica trascorrente o inversa sono relazioni di attenuazione della dislocazione appositamente definite per queste due tipologie di fagliazione. Ad esempio, in scenari che presentano cinematica principalmente normale o inversa, la componente del movimento dominante è quella verticale che disloca il tetto e il letto e, sulla base di rilievi effettuati in occasione di terremoti caratterizzati da tali cinematiche, i danni maggiori dovuti alla deformazione del terreno (in particolare rotture in superficie) sono stati registrati sul blocco che costituisce il tetto della faglia (ad es. Chi Chi 1999 – Taiwan,  $M_w$  7.6; Bonilla, 1970). Al contrario, gli scenari caratterizzati da cinematica trascorrente la componente dominante del movimento è quella laterale e i danni risultano distribuiti in modo tendenzialmente simmetrico rispetto alla traccia della faglia sismogenica (ad es. Petersen et al., 2011).

In letteratura sono presenti relazioni di attenuazione utilizzabili nei casi in cui la cinematica sia normale (es. Youngs et al., 2003), inversa (es. Moss and Ross, 2011) e trascorrente (es. Petersen et al., 2011), che verranno descritti in modo dettagliato nella proposta di linee guida

### **3.3 La trattazione delle incertezze**

La struttura generale di una PFDHA prevede la quantificazione della probabilità di eccedenza di un dato valore di dislocazione data l'incertezza associata ai parametri fisici di *input* indipendenti e l'incertezza associata agli approcci e ai modelli individuati ed utilizzati per la valutazione di ognuno di questi parametri (ANSI 2.30, 2015). Ognuno degli elementi descritti all'interno di questo lavoro e costituenti la metodologia di valutazione probabilistica della pericolosità associata alla fagliazione superficiale introduce infatti un certo grado di incertezza che può arrivare ad influenzare anche sensibilmente i risultati.

L'origine delle incertezze può essere ricondotta a due componenti, quella aleatoria e quella epistemica, che devono essere esplicitate in modo chiaro e completo all'interno di ogni passaggio del processo di analisi e che possono essere così definite (es. Budnitz et al., 1997):

- *incertezza aleatoria*: è la componente dell'incertezza totale che deriva direttamente dall'alto grado di anisotropia che caratterizza l'ambiente fisico naturale e i processi che lo interessano, come ad esempio la variabilità di localizzazione e caratteristiche geometriche delle rotture in eventi sismici successivi o la localizzazione di eventi sismici futuri e la loro magnitudo. Normalmente la trattazione dell'incertezza aleatoria viene incorporata nelle equazioni utilizzate nell'analisi, principalmente tramite le definizioni delle distribuzioni di probabilità e le deviazioni standard;
- *incertezza epistemica*: è la componente dell'incertezza direttamente associata alle metodologie utilizzate per la rappresentazione dei processi naturali e dall'incompletezza delle basi di dati necessarie per la costruzione di modelli descrittivi. La trattazione dell'incertezza epistemica avviene invece soprattutto tramite la costruzione di alberi logici, una metodologia che permette di scegliere, in ogni *step* dell'analisi, il valore numerico, il parametro o il modello migliore, scegliendo tra una serie di alternative possibili e soprattutto verosimili.

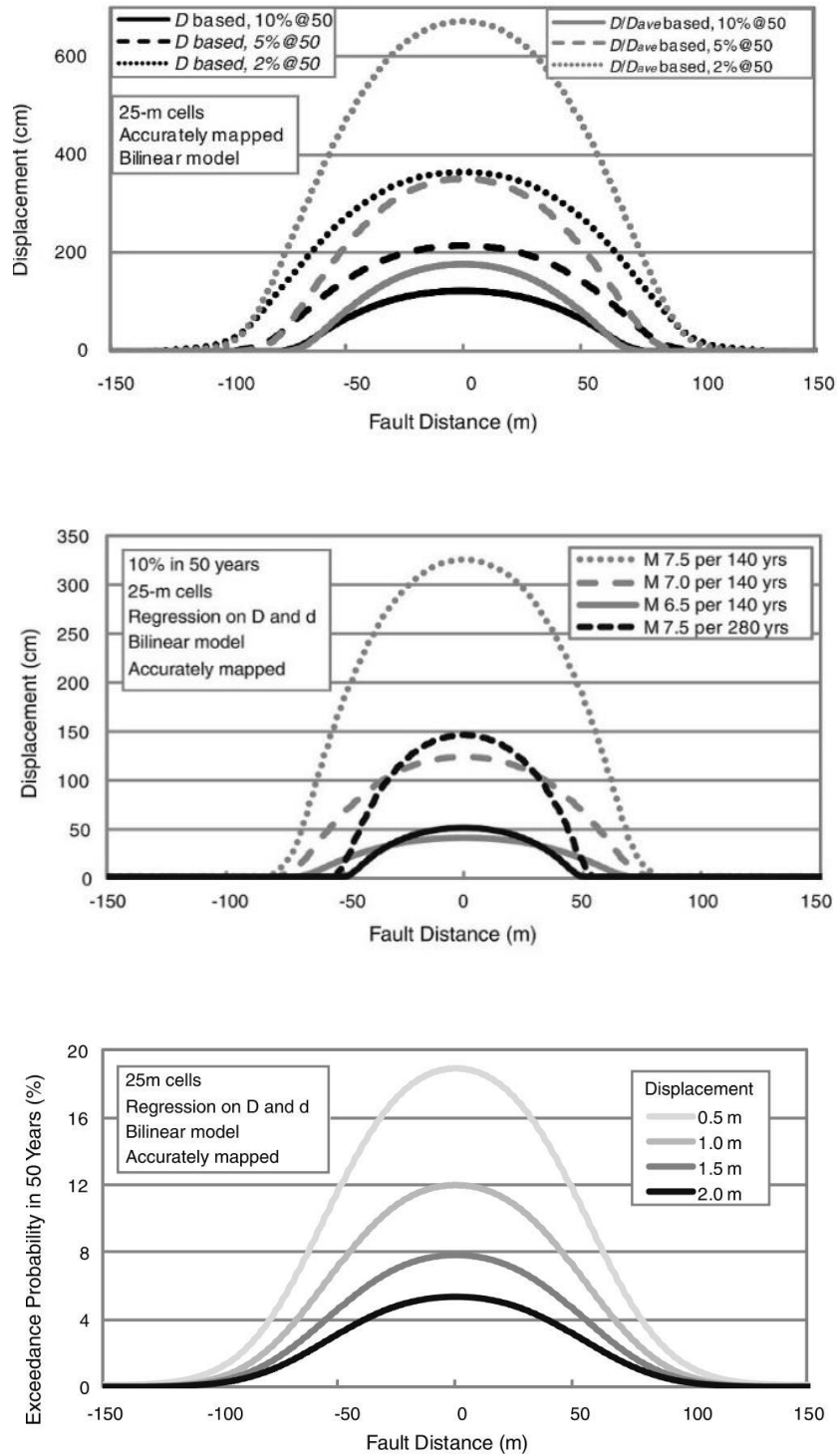
Indicazioni per la trattazione e l'analisi dell'incertezza sono riportate nel § 4.4.

### **3.4 I risultati della PFDHA**

Il processo di valutazione probabilistica della pericolosità associata alla fagliazione superficiale porta a risultati che normalmente vengono rappresentati come curve di pericolosità nelle quali vengono messi in relazione la probabilità di eccedenza annuale di un dato valore di dislocazione, il valore di dislocazione stesso o anche la distanza delle rotture dal sito analizzato (ad es. Fig. 3.1 e Fig. 3.4).

Una descrizione più dettagliata delle differenti possibilità di rappresentazione dei risultati è riportata nel capitolo 4.5.

*L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale*



**Figura 3.4.** Esempi di curve di pericolosità (modificata da Petersen et al. 2011)

## 4 Linee guida per l'applicazione della PFDHA

Nei paragrafi successivi si riporta una proposta di linee guida per l'applicazione di una PFDHA, applicabile per la valutazione della pericolosità derivante da fagliazione superficiale, primaria e secondaria, ai fini della realizzazione di infrastrutture considerate critiche o potenzialmente pericolose, come, in questo caso, il Deposito Nazionale.

### 4.1 Indicazioni generali

La formulazione generale per la valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale attraverso metodi probabilistici (*PFDHA – Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis*) è normalmente riconducibile a:

$$v(d) = \sum_n \alpha(m^0) \int_{m^0}^{m^u} f(m) \left[ \int_0^\infty f(r|m) \cdot P(D > d|m, r) \cdot dr \right] \cdot dm$$

che, attraverso la combinazione di diverse distribuzioni di probabilità, fornisce un risultato definibile come il tasso  $v(d)$  al quale la dislocazione  $D$  che potrebbe verificarsi su una struttura presente al sito indagato, possa potenzialmente superare un valore  $d$  stabilito, ad esempio su basi ingegneristiche, in seguito a terremoti di diverse magnitudo generati dalla faglia di interesse o da altre faglie in prossimità di essa.

In generale, all'interno di una PFDHA sono previste le seguenti fasi:

- 1) valutazione preliminare della presenza del potenziale di fagliazione superficiale;
- 2) la definizione dell'ubicazione e delle caratteristiche geometriche di tutte le potenziali sorgenti sismiche di interesse;
- 3) la stima delle proprietà che caratterizzano la sismicità dell'area di studio;
- 4) la definizione della variabilità delle caratteristiche della dislocazione rispetto al variare di altri parametri, sia per la fagliazione primaria che secondaria;
- 5) lo sviluppo delle curve di pericolosità;
- 6) l'analisi e la rappresentazione di tutte le incertezze associate ad ogni elemento dell'analisi.

La struttura delle linee guida qui proposte è stata sviluppata seguendo questa logica della suddivisione in fasi. Le linee guida sono state suddivise in due sezioni: la prima sezione è dedicata alla descrizione dei dati di *input* necessari e delle relative attività utili alla loro raccolta

o definizione, mentre la seconda vuole fornire le indicazioni e i modelli propri dei calcoli necessari per ottenere i tassi di eccedenza, le metodologie per la rappresentazione dei risultati e per la trattazione delle incertezze, parte fondamentale all'interno di una analisi probabilistica. Inoltre, viene proposto anche un modello logico che possa aiutare ad indirizzare il processo decisionale in fase di applicazione delle stime di pericolosità alla progettazione o alla localizzazione delle infrastrutture di interesse.

Per quanto riguarda l'applicazione della presente metodologia si fa principalmente riferimento alle indicazioni generali fornite per la valutazione della pericolosità sismica in ambito nucleare, in particolare la guida tecnica SSG-9 (IAEA, 2010), in parte perché sono state giudicate le più adatte e complete e in parte perché la PFDHA è stata sviluppata proprio ai fini della caratterizzazione di un deposito per rifiuti radioattivi (ad es. Stepp et al., 2001; Youngs et al., 2003). Sulla base delle indicazioni IAEA, soprattutto per quanto riguarda la predisposizione dell'intera analisi e la raccolta dei dati di *input*, si seguirà un approccio di analisi a dettaglio crescente che farà riferimento ad aree studio di diverse dimensioni e metodologie di indagine diversificate. Nel dettaglio (SSG-9 – IAEA, 2010):

- 1) scala *regional*: le indagini devono interessare un'area indicativamente compresa entro 300 km dal sito. In generale, l'obiettivo è quello di ottenere una conoscenza d'insieme del contesto geodinamico e valutare la presenza di elementi potenzialmente in grado di contribuire alla pericolosità da fagliazione superficiale al sito. La scala di riferimento per la cartografia è 1:500.000 e i dati dovrebbero essere ottenuti tramite ricerche bibliografiche approfondite, e sulla base di studi e carte esistenti, o eventualmente integrati con indagini geofisiche;
- 2) scala *near-regional*: le indagini devono interessare un'area indicativamente compresa entro 25 km dal sito. Nelle presenti linee guida questa fase verrà spesso associata alla scala regionale. In generale, l'obiettivo è quello di approfondire le conoscenze acquisite a scala *regional* integrandole con dati relativi alle condizioni locali (definizione dei parametri di ogni singola faglia sismogenica riconosciuta, prime analisi e misurazioni sulle dislocazioni presenti, etc.). Le eventuali indagini devono essere indirizzate principalmente alla completa comprensione del regime tettonico attuale dell'area, alla definizione della stratigrafia e ad un approfondimento della geologia strutturale. La scala di riferimento per la cartografia è 1:50.000;

- 3) scala *site-vicinity*: le indagini devono interessare un'area indicativamente compresa entro 5 km dal sito. Il dettaglio dei dati raccolti deve essere elevato. L'obiettivo principale è la caratterizzazione e la mappatura di dettaglio (almeno su basi cartografiche a scala 1:5.000) di tutte le faglie capaci (ossia in grado di provocare dislocazione in corrispondenza, ovvero in prossimità, della superficie topografica) e di tutti gli altri elementi potenzialmente in grado di sperimentare fagliazione secondaria, ossia dislocazioni causate da un evento sismico ma distanti dalla sorgente sismogenica. Le eventuali indagini devono prevedere studi paleosismologici, telerilevamento ad alta risoluzione, etc.;
- 4) scala *site area*: le indagini devono interessare l'area che verrà occupata dall'impianto o dall'infrastruttura di interesse. L'obiettivo è la caratterizzazione al massimo dettaglio possibile del potenziale di fagliazione al sito e delle caratteristiche fisiche dei terreni presenti.

Nel caso in cui nell'area individuata per le analisi a scala regionale venga riscontrata la possibile presenza di una faglia non mappata o altre evidenze interessanti (Fig. 4.1), allora sarà necessario effettuare indagini di maggior dettaglio, ad esempio secondo quanto necessario per una caratterizzazione a scala di *site-vicinity* (IAEA, 2015).

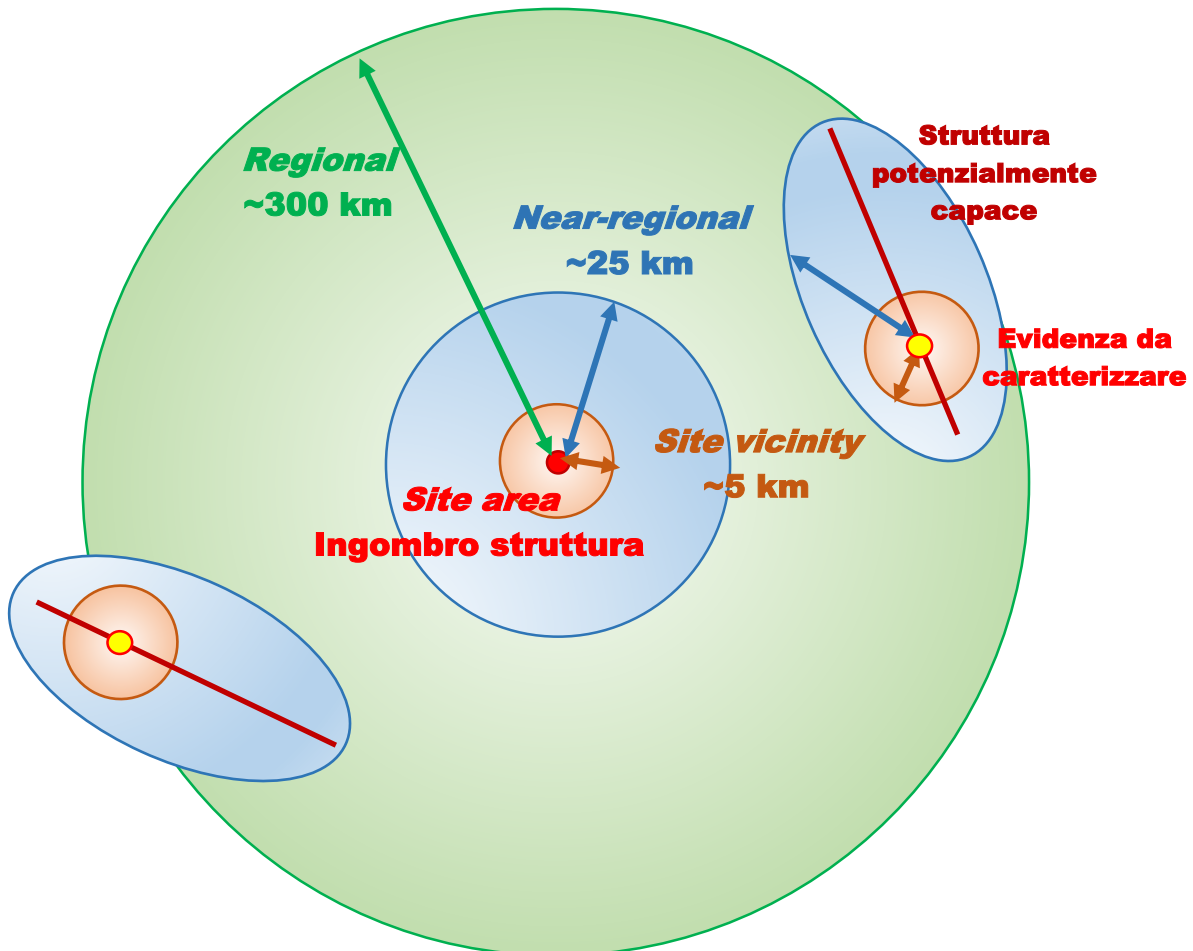
#### **4.2 Individuazione e raccolta dei dati di *input***

La presenza di un *database* il più adeguato possibile costituisce un punto di partenza fondamentale per il corretto svolgimento di una PFDHA. I dati di *input* devono essere selezionati con molta cura e devono essere il più rappresentativi possibile della realtà, soprattutto per quanto riguarda la sua variabilità intrinseca.

Infatti, in generale, ogni parametro all'interno della PFDHA può essere ottenuto tramite misure dirette nel contesto considerato, oppure ricavato con l'utilizzo di relazioni empiriche costruite sulla base di dati fisici misurati in corrispondenza di altri terremoti o faglie, ritrovato in documenti storici o derivato da studi paleosismologici. Ad esempio, la distribuzione delle magnitudo può essere determinata dall'analisi della sismicità storica, da considerazioni sulle caratteristiche fisiche della sorgente (lunghezza, area di possibile rottura, complessità della struttura, ...), da rotture storiche o dalla reologia, oppure la magnitudo massima può essere derivata dalle caratteristiche geometriche della faglia e così via (ad esempio Caputo et al.,



2008). Da questo ne consegue che uno dei fattori o molto probabilmente il fattore che può avere i maggiori effetti sul risultato dell'analisi è costituito proprio dai dati di partenza, rendendo indispensabile la presenza di un *database* su cui costruire tutto il processo che fornisca una adeguata e quanto più verosimile e completa rappresentazione della realtà.



**Figura 4.1.** Rappresentazione schematica delle aree di indagine indicate da IAEA (SSG-9 – IAEA, 2010; TECDOC-1767 – IAEA, 2015)

In generale, il *database* deve essere completato in modo da permettere sia la ricostruzione di un modello sismotettonico affidabile e quanto più completo possibile su cui basare tutte le assunzioni e le scelte necessarie all'interno di un processo di PFDHA, sia la definizione dei modelli di dettaglio necessari per la valutazione dei singoli elementi tettonici presenti nell'area di studio. Per questo motivo si consiglia di strutturare il *database* su più livelli, seguendo ad esempio le scale di dettaglio fornite nella SSG-9 (IAEA, 2010), differenziando i dati generali da quelli di dettaglio, i dati studio-specifici da quelli relativi a situazioni globali, etc.

Quindi, a titolo di esempio, i dati di base dovranno permettere una rappresentazione quanto più completa e affidabile di:

- geologia superficiale: litologie presenti, geometria degli strati superficiali, bruschi cambiamenti della litologia, etc.
- contesto geomorfologico: pendenza media, profondità della falda, elementi di discontinuità, evidenze di processi geomorfologici rapidi, elementi particolari, etc.
- parametri di faglia: lunghezza, *dip*, profondità, cinematica, *slip-rate*, età, posizione, dislocazione verticale o orizzontale o laterale misurabile, complessità delle rotture passate, etc.
- parametri dei terremoti: cataloghi sismici, magnitudo, profondità ipocentrali, meccanismo focale, contesto sismotettonico di riferimento, etc.

Ogni valore misurato o calcolato inserito all'interno del *database* deve obbligatoriamente essere accompagnato da un giudizio sull'affidabilità, dal dettaglio con cui il dato è stato misurato (ad esempio la risoluzione della cartografia) e dalla quantificazione dell'incertezza associata alla misurazione o alla derivazione o alle caratteristiche di variabilità naturale del parametro; i valori utilizzati per l'espressione di tale incertezza devono essere sempre tenuti in considerazione ed esplicitati nel corso di una PFDHA.

Un'altra caratteristica fondamentale che deve avere la struttura del database è garantire la possibilità di una sua continua implementazione, sia in occasione di nuovi eventi sismici utili, sia in seguito a nuovi studi o miglioramenti nelle metodologie e strumentazioni utilizzate nelle indagini.

Le attività necessarie per la definizione dei valori da inserire all'interno del *database* proposto sono state, per questioni pratiche legate alla loro illustrazione, suddivise in due ambiti: indagini per la caratterizzazione dell'area di studio e indagini per la caratterizzazione di dettaglio della singola struttura attiva e/o capace. I due ambiti di indagine non devono essere considerati come separati e non comunicanti ma devono essere interconnessi l'uno all'altro, procedere contemporaneamente e con analisi multidisciplinari.

#### **4.2.1 Valutazione della presenza di potenziale fagliazione superficiale**

La fase iniziale per lo studio della pericolosità associata alla fagliazione superficiale deve prevedere analisi geologiche e sismotettoniche a scala regionale e locale per una valutazione preliminare della presenza o assenza di sorgenti sismogeniche in grado di produrre rotture superficiali nell'area di interesse; l'analisi deve quindi prevedere una raccolta organica delle informazioni disponibili a diverse scale di dettaglio, da regionale a sito-specifica. I risultati di questa analisi iniziale devono essere anche in grado di indirizzare la pianificazione preliminare di un programma di indagini efficiente e mirato per l'integrazione dei dati disponibili al fine di realizzare un *database* il più completo possibile per lo svolgimento della PFDHA (ANSI 2.30, 2015).

##### Obiettivi

Gli obiettivi principali di questa fase sono:

- 1) definizione del contesto tettonico regionale dominante;
- 2) valutazione preliminare della presenza del potenziale di fagliazione superficiale presente a scala regionale;
- 3) sviluppo una conoscenza sufficiente sulle condizioni generali potenzialmente presenti nell'area di interesse;
- 4) definizione di un'area di studio per le fasi successive di raccolta dei dati di *input*;
- 5) predisposizione preliminare del programma di indagini di dettaglio.

##### Indicazioni per l'applicazione

Per la valutazione della presenza o assenza di potenziale di fagliazione è innanzitutto necessario verificare, in modo preliminare, la presenza di strutture in grado di generare terremoti morfogenici (*sensu* Caputo, 1993) nelle vicinanze del sito indagato. La raccolta delle informazioni esistenti deve essere completata tramite l'analisi di foto aeree, dati satellitari e *DEM (Digital Elevation Model)* e attraverso rilievi di campagna mirati al riconoscimento preliminare di elementi geomorfologici riconducibili all'azione di terremoti e faglie.

##### Attività da prevedere

La raccolta e l'analisi delle informazioni geologiche e sismotettoniche dovrebbe interessare, ove possibile, i seguenti dati:

- letteratura specifica sull'area analizzata e studi tecnici sito-specifici;
- cataloghi dei terremoti, con particolare attenzione a quelli potenzialmente morfogenici, storici e strumentali, avvenuti nella regione individuata. I dati minimi necessari dovrebbero essere: localizzazione dell'epicentro macrosismico, profondità focale, magnitudo (tipologia della magnitudo, se terremoti pre-strumentali documentazione dei metodi utilizzati per la sua derivazione dai valori di intensità), intensità massima, isosisme, coordinate dell'epicentro, momento sismico, principali parametri descrittivi della struttura sorgente;
- mappe topografiche, geologiche, geomorfologiche;
- foto aeree e altre immagini da telerilevamento;
- modelli del terreno, ad es. *DEM (Digital Elevation Model)* a diverse risoluzioni;
- dati di pozzo, dati da indagini geofisiche, stratigrafie.

### Risultati

Sulla base dei dati analizzati nella fase iniziale, deve essere individuata l'area di studio, ossia la porzione di territorio in cui devono essere eseguite le indagini di dettaglio necessarie per lo svolgimento della PFDHA. L'area di studio deve quindi essere delineata, preferibilmente, sulla base di una distanza radiale dal sito che comprenda al suo interno tutte le strutture considerate in grado di produrre terremoti che potrebbero causare fagliazione superficiale al sito indagato. L'area deve avere forma e dimensioni variabili in base al contesto sismotettonico della regione in cui si trova.

L'insieme delle indagini sopra descritte deve permettere di valutare con sufficiente affidabilità se nell'area indagata è presente un potenziale di fagliazione superficiale e se risulta quindi necessaria una valutazione della pericolosità associata.

Qualora non fosse ritenuto necessario procedere con la valutazione della pericolosità è fondamentale supportare tale decisione con dati dettagliati e affidabili; nel caso in cui i dati non fossero sufficienti per definire con ragionevole certezza che il potenziale di fagliazione superficiale possa essere trascurato, si deve comunque procedere con una valutazione probabilistica (SSG-9, 2010).

Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

Una delle principali fonti di incertezza in questa fase di raccolta dei dati deriva dai cataloghi sismici. Molto spesso, terremoti differenti, seppur verificatisi nella stessa regione o generati dalla medesima sorgente, sono riportati nei cataloghi con valori di magnitudo non direttamente confrontabili poiché calcolati su parametri differenti ( $M_w$ ,  $M_s$ ,  $M_L$ , etc.). Per ovviare a tali discrepanze si ricorre normalmente all'uso di modelli di conversione empirici, al fine di ottenere un insieme di dati uniforme per i cataloghi dei terremoti utilizzati nella valutazione della pericolosità sismica (Bommer et al., 2005). Essendo conversioni basate su relazioni empiriche, l'incertezza che potrebbero introdurre nelle stime risulta molta elevata e può derivare sia da una variabilità intrinseca derivante dalla non perfetta correlazione tra nessuna coppia di tipologie di magnitudo, sia dalla incompletezza e non perfetta rappresentazione della realtà da parte dei database da cui tali relazioni sono derivate. In ogni caso la scelta delle formule di conversione deve essere condotta con estrema attenzione; ad esempio, se devono essere effettuate conversioni empiriche tra  $M_L$  e  $M_w$ , le equazioni dovrebbero essere derivate localmente poiché le scale  $M_L$  sono generalmente differenti da una regione e l'altra, e tali relazioni sono spesso non lineari (Hanks and Boore, 1984). Nel caso in cui esistessero più relazioni empiriche per una stessa conversione e queste relazioni fossero ugualmente applicabili, le differenze tra l'utilizzo di una o dell'altra costituiscono incertezza, detta epistemica (vedi § 4.4), e tutte le alternative possibili devono essere esplicitate.

**4.2.2 Caratterizzazione dell'area di studio**

In generale, la caratterizzazione dell'area di studio all'interno di una PFDHA deve mirare all'individuazione, la mappatura e la caratterizzazione di tutte le strutture potenzialmente attive, ossia in grado di originare terremoti, e di tutte quelle considerate potenzialmente capaci, ossia in grado di manifestare rotture in superficie o vicino ad essa (*sensu* IAEA, 2010). Le caratteristiche geologiche, sismologiche, morfologiche, idrologiche e geotecniche dell'area di studio devono quindi essere indagate con un dettaglio sufficiente a supportare e ad implementare la valutazione del potenziale di fagliazione effettuata nelle fasi precedenti e deve prevedere tutte le attività utili per la definizione dei dati di *input* necessari per la costruzione del modello sismotettonico alla base delle valutazioni e la mappatura completa di tutte le strutture che considerate potenzialmente in grado di contribuire alla pericolosità da fagliazione superficiale presente al sito.

### Obiettivi

L'obiettivo di questa fase di analisi è quindi il riconoscimento di tutti gli elementi tettonici e non tettonici che potrebbero contribuire alla definizione della pericolosità da fagliazione superficiale potenzialmente presente al sito e la successiva realizzazione delle basi cartografiche alla base di diversi modelli all'interno dei calcoli di una PFDHA.

### Indicazioni per l'applicazione

Una delle questioni più delicate all'interno di un processo per la valutazione del potenziale di fagliazione è il riconoscimento delle strutture potenzialmente attive e/o capaci.

Il riconoscimento dell'attività sismica di una faglia viene fatto essenzialmente attraverso lo studio dei cataloghi sismici e dei dati strumentali di sismicità. Per quanto riguarda il potenziale di fagliazione superficiale, è innanzitutto necessario definire nel dettaglio cosa si intende per faglia capace poichè tale identificazione può basarsi su assunti che possono differire a seconda delle situazioni studiate, principalmente in base al dominio sismotettonico in cui ci si trova. Secondo le indicazioni riportate da IAEA nella guida SSG-9 (IAEA, 2010), una faglia può essere considerata capace se:

- mostra evidenze di un movimento nel passato o di movimenti ricorrenti all'interno di un periodo definito, tali che sia ragionevole supporre che in futuro possano verificarsi ulteriori movimenti che portino a deformazione e/o rottura della superficie o del terreno vicino ad essa. La finestra temporale di interesse per la definizione dell'attività delle strutture tettoniche non può essere infatti nè stabilito a priori nè universalmente; esso dipende fortemente dalle caratteristiche dell'assetto strutturale sia regionale che locale che influenza i tassi di deformazione. Nelle aree caratterizzate da alta sismicità in cui i tempi di ritorno sono relativamente brevi, ad esempio, l'intervallo temporale da considerare risulta nell'ordine delle decine di migliaia di anni (Pleistocene Superiore-Olocene); invece, nelle aree a sismicità più bassa tale arco temporale deve essere esteso indicativamente fino a comprendere l'intero periodo Pliocene – Quaternario (ad es Galadini et al., 2012);
- presenta una relazione strutturale con un'altra struttura riconosciuta come sicuramente capace tale che il movimento di una delle due possa innescare un movimento anche sull'altra faglia in superficie o vicino ad essa;

- la massima magnitudo potenziale associata ad una struttura sismogenica è sufficientemente grande, e il relativo terremoto si origina ad una profondità per cui si possa ragionevolmente attendere, all'interno del contesto tettonico attuale, movimenti in superficie o vicino ad essa.

Una volta riconosciute, tutte le strutture potenzialmente interessanti dal punto di vista sismotettonico devono essere riportate su base cartografica per rendere possibili tutte le elaborazioni successive previste in una PFDHA. La rappresentazione cartografica deve essere quanto più precisa possibile: per questo motivo si raccomanda di affiancare alle indagini di campo l'analisi di immagini della superficie topografica ad alta risoluzione, come ad esempio quelle ottenibili tramite la tecnologia *LiDAR (Light Detection And Ranging)* che permettono la realizzazione di modelli della superficie con risoluzione anche sub - decimetrica (ad es. Begg e Mouslopoulou, 2010), e di utilizzare questi dati come base cartografica.

La mappatura geologica di dettaglio deve essere sviluppata soprattutto nelle aree in cui, nella cartografia esistente, non sono disponibili dati utili alla localizzazione di tracce di faglie primarie e secondarie che potrebbero costituire un pericolo di fagliazione superficiale. Le carte devono includere i risultati delle interpretazioni aerofotogrammetriche e LIDAR nonché i rilievi di campagna; molta attenzione deve essere posta nella mappatura del Quaternario e devono essere messi in evidenza particolari situazioni deposizionali e di erosione che potrebbero rappresentare punti chiave nell'interpretazione cronologica della tettonica dell'area. Inoltre deve essere prevista un'attenta analisi geomorfologica che permetta di identificare eventuali peculiarità del reticolo idrografico, dei terrazzi fluviali e marini, delle morene glaciali, etc. che possano far pensare ad un'eventuale attività delle faglie, con lo scopo di stimare età e entità della dislocazione potenziale.

Un ulteriore aiuto può derivare dalle indagini geofisiche che, oltre a fornire informazioni sulle geometrie delle unità litologiche, possono fornire informazioni rilevanti sulla presenza, la posizione e le caratteristiche di eventuali faglie potenzialmente sismogeniche e/o capaci.

Questa fase risulta fondamentale per indirizzare le indagini dirette come trincee e sondaggi geognostici necessari per la caratterizzazione di dettaglio delle caratteristiche di ognuna delle strutture individuate e quindi la definizione dei valori necessari per la costruzione dei modelli che costituiscono i calcoli in una PFDHA.

Attività da prevedere

Alla luce di quanto riportato sopra, le attività minime richieste per questa fase devono essere condotte a scala di sito e sono:

- 1) definizione del piano di indagini;
- 2) indagini geomorfologiche, topografiche e geologiche di superficie. Ad esempio:
  - a. rilievi LiDAR
  - b. GPS
  - c. dati satellitari
- 3) indagini geologiche di sottosuolo;
- 4) indagini geofisiche.

Risultati

Sulla base delle indagini e delle analisi effettuate in questa fase, deve essere individuata l'area di studio, devono essere realizzate le cartografie geologiche e geomorfologiche di dettaglio in cui devono essere riportate con precisione le tracce delle strutture considerate potenzialmente attive e/o capaci. La cartografia prodotta sarà la base per la definizione e l'indirizzamento delle successive indagini di caratterizzazione della faglia e costituirà la base su cui verranno effettuate numerose valutazioni e quantificazioni fondamentali per un corretto svolgimento delle fasi di calcolo.

**4.2.3 Caratterizzazione dei parametri di faglia**

Le indagini geologiche, sismologiche e geofisiche intraprese per la caratterizzazione del potenziale di fagliazione devono essere indirizzate verso la ricerca dei parametri necessari per la definizione dell'ubicazione e della geometria delle strutture d'interesse, per la quantificazione delle dislocazioni attese e del loro tasso di occorrenza, non tralasciando la caratterizzazione e la valutazione delle incertezze associate ad ogni valore.

Obiettivi

L'obiettivo di questa fase di analisi è la raccolta di tutti i dati specifici per la caratterizzazione di ogni singola struttura di interesse, ricavati da misure in campo o derivati attraverso relazioni empiriche per la compilazione di un *database* sito-specifico in cui devono essere riportati tutti i dati necessari ai calcoli della PFDHA.



Indicazioni per l'applicazione

I dati per la caratterizzazione della struttura di interesse devono almeno comprendere:

- parametri geometrici, sia con valori misurati che potenziali (lunghezza, inclinazione, area di rottura profonda, profondità);
- cinematica dettagliata;
- tasso di attività (*slip rate*);
- magnitudo potenziali associate.

I dati necessari possono essere ricondotti a due tipologie specifiche, ossia i dati derivati da misure dirette e i dati derivati da elaborazioni su base statistica o dall'applicazione di specifiche relazioni empiriche.

***Parametri di faglia misurati***

Lo scavo di trincee esplorative, unitamente alle datazioni dei depositi, costituiscono le basi per la conduzione di studi di tipo paleosimologico (ad es. TECDOC-1767 – IAEA, 2015), la principale tipologia di analisi che può consentire la valutazione di alcuni dei parametri fondamentali di una faglia, soprattutto all'interno di una valutazione della pericolosità associata, come ad esempio il suo grado di attività o fornire una dimostrazione affidabile dell'inattività.

Studi di trincea effettuati vicino alla struttura possono, infatti, essere necessari per confermare l'attività della faglia e per identificare la posizione della faglia rispetto alle porzioni che potrebbero verosimilmente sperimentare rottura.

Anche i terremoti storici possono essere valutati durante studi in trincea per permettere ai paleosismologi di determinare la quantità di dislocazione sperimentata durante un dato terremoto così come lo il tasso di movimento della faglia. Questo permette lo sviluppo del tasso di offset atteso e di associare la faglia ad un intervallo di ricorrenza.

Devono ad esempio essere misurati e quantificati i seguenti parametri:

- l'orientazione e l'inclinazione del piano di rottura;
- eventuali relazioni strutturali indicanti collegamenti cinematici con altre strutture;
- componenti orizzontali e verticali per la definizione finale della cinematica;
- la direzione del movimento;
- lunghezza della rottura;

- grado di complessità delle rotture nella zona di faglia;
- entità delle dislocazioni sperimentate in passato;
- datazione delle dislocazioni;
- il tasso di movimento.

Le componenti orizzontali e verticali della dislocazione e l'inclinazione della faglia dovrebbero essere valutate per classificare il senso del movimento su una faglia. Per i casi in cui una faglia ha sperimentato movimenti in più di una direzione durante la sua storia, l'attenzione deve convergere sulla valutazione del suo senso di movimento nel regime tettonico corrente. Il senso della deformazione attesa può essere valutato con ragionevole certezza sulla base delle deformazioni passate più recenti.

Il tasso di movimento (*slip rate*), da valutare all'interno dell'intervallo temporale più adatto definito, deve essere valutato sulla base della combinazione dei seguenti fattori (ANSI, 2015):

- a) testimonianze storiche e geologiche relative alla storia di dislocazioni della faglia;
- b) dati di sismicità strumentale e pre-strumentale;
- c) relazioni strutturali che possono indicare collegamenti cinematici con una faglia quaternaria conosciuta;
- d) contesto tettonico regionale;
- e) studi paleosismologici di dettaglio sulla faglia.

#### Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

I dati misurati direttamente sono affetti da un grado di incertezza proporzionale alla variabilità naturale intrinseca del fenomeno in esame. L'abilità di utilizzare i dati paleosismici per valutare la variabilità, ad esempio, nelle rotture superficiali dipende dalla quantità di esposizione di una trincea, sia lateralmente, lontano dalla faglia primaria, sia verticalmente, poiché la rottura di faglia può variare la sua posizione da terremoto a terremoto.

Generalmente gli studi di trincea sono indirizzati verso lo sviluppo di lunghi *record* temporali di terremoti e presentano un'eccellente risoluzione verticale tendendo però ad essere limitati lateralmente, rendendo difficile avere un buon grado di confidenza nel fatto che lo studio catturi la variabilità nella localizzazione della rottura a maggiori distanze dalla faglia primaria.

***Parametri di faglia derivati***

I principali parametri di faglia i cui valori possono essere derivati sulla base della dipendenza da altri fattori attraverso relazioni empiriche, necessari all'interno di una PFDHA sono:

- magnitudo massima;
- magnitudo caratteristica;
- dislocazione massima;
- dislocazione media.

Per ognuna delle faglie considerate potenzialmente sismogeniche deve essere valutata la magnitudo del massimo terremoto che tale sorgente sismica è capace di produrre nel regime tettonico corrente; la sua valutazione dovrebbe includere una serie di vincoli forniti ad esempio dalle specifiche quantità di deformazione cosismica registrate dalle indagini dirette, dai dati di sismicità e da stime della massima dimensione della rottura attesa (ANSI, 2015).

Generalmente, i parametri di faglia correlati alla magnitudo del massimo terremoto atteso, e spesso utilizzati per la sua definizione, includono la lunghezza della rottura, l'area della rottura o la dislocazione superficiale massima (ad es. Wells e Coppersmith, 1994; Hanks e Bakun 2002; Stirling e Goded, 2013), definiti principalmente attraverso studi paleosismologici sulle rotture registrate in passato. La magnitudo massima è spesso intesa come la più grande magnitudo che può verificarsi su una faglia. Nell'elencare i parametri di faglia, il termine "massima magnitudo" viene spesso utilizzato per indicare sia la reale magnitudo massima sia la magnitudo media dalla rottura dell'intera faglia. Infatti, nelle analisi della pericolosità sismica sia probabilistiche che deterministiche, viene generalmente stimata una magnitudo per ogni sorgente sulla base delle dimensioni della faglia (area o lunghezza), o delle dislocazioni (ad es. Wells e Coppersmith, 1994). Tuttavia, la magnitudo fornita nei modelli empirici è la magnitudo media con la variabilità naturale descritta in termini di deviazione standard. La reale magnitudo massima è la magnitudo in corrispondenza della quale viene troncata la distribuzione delle magnitudo (Abrahamson, 2000). La dimensione della faglia (lunghezza o area) è tipicamente utilizzato per stimare la magnitudo media in seguito alla rottura dell'intera faglia; questa magnitudo è descritta meglio come "magnitudo media caratteristica".

*Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate*

Come mostrato in precedenza, negli studi di caratterizzazione per la valutazione della pericolosità sismica, una faglia viene spesso analizzata attraverso indagini paleosismiche che forniscono valori di *slip rate*, dislocazioni per evento, e qualche volta lunghezza della rottura superficiale. Relazioni empiriche, tra cui le più diffusamente usate risultano quelle di Wells e Coppersmith (1994), vengono di solito utilizzate per definire il valore di magnitudo associato ai possibili eventi futuri partendo dai parametri della faglia. Tuttavia, attualmente, queste leggi scalari sono state costruite sulla base di *dataset* basati su terremoti storici perlopiù caratterizzati da magnitudo elevate e con espressioni superficiali significative, che non possono essere considerati completi e rappresentativi dell'intera realtà.

Inoltre, una faglia, in seguito ad un terremoto, può sperimentare una grande quantità di *afterslip*; negli studi paleosismici, questa possibilità non viene generalmente presa in considerazione e la dislocazione è direttamente convertita in magnitudo, assumendo che l'intera dislocazione sia avvenuta durante il terremoto, poiché la distinzione tra movimento cosismico e *afterslip* non può essere fatta sulla base dei record stratigrafici di una trincea, la magnitudo può essere qualche volta sovrastimata.

Nel tempo sono state sviluppate numerose relazioni empiriche partendo da dati relativi a situazioni anche molto differenti. Essendo sviluppate sulla base di dati empirici misurati, le relazioni dipendono fortemente dal contesto tettonico in cui vengono raccolte le informazioni di partenza e il non considerare questa dipendenza può condurre a stime completamente errate. La situazione ideale prevederebbe lo sviluppo di equazioni empiriche *ad hoc* per ogni regione studiata; questo risulta tuttavia molto difficile, soprattutto a causa della scarsità dei dati specifici disponibili. L'incertezza e l'errore associato all'utilizzo delle equazioni empiriche può essere in parte limitato sviluppando relazioni specifiche basate su database di dati omogenei relativi ad esempio a specifici contesti sismotettonici. Stirling e Gode (2013) propongono una raccolta delle equazioni empiriche disponibili, specificando per ognuna le caratteristiche del database di partenza e le indicazioni per una corretta scelta e applicazione (Tab. 4.1). In alcuni casi non sarà però possibile identificare direttamente una regione analoga ben caratterizzata: in quel caso possono essere inserite nell'albero logico le equazioni derivanti da molte regioni, attribuendo alle alternative gradi di affidabilità comparabili per esplicitare l'equivalenza tra le diverse equazioni.

Molti casi studio moderni dimostrano che la lunghezza della rottura in superficie o la dislocazione superficiale cosismica dipendono dalla profondità del terremoto, dal modulo di taglio e da molti altri fattori come ad esempio lo *stress drop* (ad es. Mohammadioun e Serva, 2001) aprendo così la possibilità di sviluppare nuove metodologie di definizione indiretta dei parametri di faglia, potenzialmente più accurate (ad es. Baize e Scotti, 2015).

Inoltre, negli ultimi anni, è stato reso possibile anche il riconoscimento di strutture caratterizzate da deformazioni molto deboli grazie alle moderne tecniche come InSAR, LiDAR, etc. che potenzialmente possono permettere l'implementazione dei *database* delle rotture da terremoto con eventi di magnitudo moderata o altre categorie di terremoti scarsamente rappresentate nei database esistenti (inverse, cieche etc...).

**Tabella 4.1.** *Basi della classificazione delle equazioni empiriche fatta da Stirling e Goded (2013) (modificata da Stirling e Goded, 2013)*

<b>Regime tettonico</b>	<b>Sub - regime</b>	<b>Meccanismo</b>
<i>Limite di placca crostale</i>	<i>Faglie di margini di placca veloci (&gt; 10 mm/anno)</i>	<i>Dominante trascorrente</i>
	<i>Faglie di margini di placca veloci (&lt; 10 mm/anno)</i>	<i>Tutte le cinematiche Trascorrenti Normale Inverse</i>
<i>Continentale</i>		<i>Inverse Trascorrenti</i>
<i>Subduzione</i>	<i>Continentale Oceanica Intraplacca</i>	<i>Sovrascorrimento Sovrascorrimento Normale</i>
<i>Vulcanico</i>	<i>Crosta sottile (&lt; 10 km)</i>	<i>Normale</i>
	<i>Crosta spessa (&lt; 10 km)</i>	<i>Normale</i>

### Risultati

Le tipologie dei risultati di questa fase possono variare molto, soprattutto sulla base della quantità e della qualità dei dati specifici misurabili durante le campagne di indagini paleosismologiche. Nel caso in cui i dati permettesero lo sviluppo di nuove relazioni empiriche o l'implementazione di quelle esistenti, la procedura seguita per la loro definizione deve essere esplicitata, unitamente ad adeguate analisi di sensibilità e alle incertezze associate ai risultati. In generale, deve inoltre essere posta particolare attenzione alla definizione

dell'incertezza associata all'origine dei dati raccolti, poiché i fattori che possono influenzare l'affidabilità e la precisione di valori osservati in tempi storici o ricavati da studi paleosismologici possono portare anche a grandi differenze nei risultati finali di una valutazione della pericolosità (ad esempio Caputo et al., 2008).

### **4.3 Definizione e applicazione dei modelli di calcolo**

Nella sezione seguente vengono riportate e descritte le metodologie per la definizione e per l'applicazione dei modelli di distribuzione delle probabilità necessari per una PFDHA, sia per la rappresentazione delle sorgenti sismogeniche che per la caratterizzazione della fagliazione superficiale, primaria e secondaria.

Verrà posta particolare attenzione sulla discussione delle incertezze associate alla definizione dei modelli per le relazioni di attenuazione poiché sono la componente fondamentale della metodologia e la letteratura relativa è ancora scarsa.

#### **4.3.1 Caratterizzazione delle sorgenti sismogeniche**

I primi tre elementi nel modello alla base della PFDHA rappresentano le caratteristiche della sorgente sismica la cui attivazione in occasione di un terremoto può causare rotture superficiali, nel dettaglio:

- $\alpha_n(m^0)$  rappresenta l'attività sismica, ossia il tasso di occorrenza di tutti i terremoti sulla sorgente  $n$  che registrino una magnitudo superiore a un dato valore  $m^0$ ;
- $f_n(m)$  rappresenta la probabilità alla quale potrebbero avvenire terremoti con magnitudo compresa tra una magnitudo minima  $m^0$  stabilita e il massimo terremoto che la sorgente  $n$  può essere in grado di produrre;
- $f_{kn}(r|m)$  rappresenta la distribuzione delle distanze  $r$  tra il terremoto  $m$  sulla struttura  $n$  e il sito  $k$ .

Di seguito vengono riportate alcune indicazioni per la definizione delle tre componenti necessarie per la rappresentazione della sorgente sismogenica.

##### **4.3.1.1 Definizione del tasso di ricorrenza dei terremoti**

Un elemento chiave in una valutazione della pericolosità è la stima dell'intervallo di ricorrenza dei terremoti di diverse magnitudo. La definizione del tasso di ricorrenza deve essere eseguita per ognuna delle sorgenti sismogeniche individuate nella fase iniziale, potenzialmente in

grado di generare fagliazione in superficie o vicino ad essa, in corrispondenza dell'area indagata.

Indicazioni per l'applicazione

È innanzitutto necessario stabilire un valore di magnitudo minimo  $m_0$  che rappresenterà il limite inferiore di magnitudo al di sotto del quale i terremoti associati sono considerati non in grado di contribuire alla pericolosità da fagliazione superficiale. Tale parametro deve essere quantificato sia sulla base di considerazioni relative al valore minimo di magnitudo potenzialmente in grado di produrre fagliazione superficiale (sia principale che secondaria) sulla base di dati sito-specifici o raccolti e analizzati in contesti simili, sia su considerazioni di tipo ingegneristico.

Le metodologie e gli approcci per la definizione del tasso di occorrenza sono molteplici e dovrebbero essere scelti principalmente sulla base della quantità e della qualità di dati a disposizione; ad esempio, se è disponibile un catalogo sismico ampio e con dati ritenuti affidabili e rappresentativi si può utilizzare la legge di Gutenberg – Richter, mentre nei casi in cui i dati di sismicità fossero insufficienti, è preferibile l'utilizzo dell'approccio basato sui valori di *slip-rate* ricavati dalle indagini geologiche. Nel dettaglio:

1) *Legge di Gutenberg-Richter*

È una relazione statistica che rappresenta la distribuzione temporale dei terremoti in funzione della loro magnitudo (Gutenberg e Richter, 1954):

$$\text{Log}_{10}N = a - bm$$

dove

$N$  è il numero di terremoti di magnitudo superiore ad  $m$  verificatisi in un dato intervallo di tempo in una data area (tasso di eccedenza)

$a$  e  $b$  sono costanti definite dalla trattazione statistica dei dati provenienti dalle registrazioni dei terremoti passati e sono ottenuti mediante regressioni su *database* sismico della zona di interesse. Il valore  $b$  indica la frequenza di terremoti grandi o piccoli (al crescere di  $b$  diminuisce il numero di forti terremoti rispetto ai piccoli), normalmente risulta compreso tra 0.6 e 1 e non mostra molta variabilità regionale.

Tuttavia il valore di  $b$  si differenzia in modo significativo nelle sequenze sismiche, in cui può arrivare a 2.5 indicando l'assenza di terremoti di grande energia, come accade ad esempio in un contesto tettonico vulcanico dove, per la presenza di piccole faglie, l'accumulo della deformazione è generalmente scaricato attraverso piccoli terremoti.

## 2) *Slip-rate*

Di seguito si riporta, invece, la procedura per la definizione del tasso sulla base dei valori di *slip-rate*, che rappresenta il tasso secondo il quale si verifica l'accumulo e il rilascio di energia, e di conseguenza anche la quantità di energia sismica (momento sismico) che una faglia è in grado di rilasciare in occasione di terremoti nel tempo. Per una accurata applicazione in una PFDHA il valore di *slip-rate* deve essere valutato sulla base di dati di faglia specifici; tuttavia, nel caso in cui non si abbiano a disposizione dati specifici sulla faglia studiata il valore di *slip-rate* può essere derivato da quello regionale. Quindi, sulla base dei dati disponibili in seguito alla caratterizzazione dell'area di studio e in virtù della sua diretta dipendenza dal momento sismico, il tasso di occorrenza può essere definito come (NRC, 2012):

$$\alpha(m \geq m_0) = \frac{M_0}{\overline{M_0}}$$

dove:

$M_0/\overline{M_0}$  è il rapporto tra il momento sismico totale accumulato  $M_0$  e il momento medio rilasciato in occasione di terremoto

con

$$M_0 = \mu AS$$

dove:

$\mu$  è il modulo di taglio della crosta terrestre ( $3.1 \cdot 10^{11}$  dyn·cm<sup>2</sup> (Hanks e Kanamori, 1979))

$A$  è l'area del piano di rottura

$S$  è lo *slip-rate* medio

e



$$\overline{M_0} = \int_m f_n(m) M_0(m) dm$$

dove:

$f_n(m)$  è la funzione di densità di probabilità dell'occorrenza di terremoti con magnitudo differenti (definita nel paragrafo successivo)

$M_0(m)$  è collegato alla magnitudo  $m$  secondo la relazione di Hanks e Kanamori (1979):

$$M_0(m) = 10^{1.5m+16.05}$$

In generale, l'intervallo di ricorrenza deve essere determinato sulla base delle tempistiche degli eventi quaternari e deve includere l'analisi delle variabilità degli intervalli di ricorrenza, della completezza delle registrazioni di eventi di deformazione e del limite di rilevamento degli eventi di deformazione. Inoltre, l'uniformità del comportamento ricorrente (ad es. uniforme, quasi uniforme, non uniforme) dovrebbe essere valutata attraverso la comprensione delle scale temporali lunghe (geologiche) e del contesto sismotettonico della regione in cui si trova il sito di interesse (ANSI, 2015).

La trattazione delle incertezze sia aleatoria che epistemica risulta fondamentale poiché le stime degli intervalli di ricorrenza basate sulla sismicità storica e sui fati geologici possono essere anche molto diversi, soprattutto quando sono relativi ad una specifica faglia.

#### **4.3.1.2 Caratterizzazione della distribuzione delle magnitudo**

Per avere una completa rappresentazione della distribuzione delle magnitudo si propone l'utilizzo di un modello che permette di considerare in modo sufficientemente completo sia la massima magnitudo che la magnitudo caratteristica.

##### Indicazioni per l'applicazione

Youngs and Coppersmith (1985) hanno proposto un modello che utilizza una distribuzione esponenziale di magnitudo-frequenza al di sotto del valore di magnitudo massima attesa  $m_{max}$  e una distribuzione uniforme per i valori compresi nell'intervallo  $m_{max} \pm 0.25$ :

per  $m_0 \leq m \leq m_{char} - 0.25$

$$f_n(m) = \frac{1}{1 + c_2} \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(\overline{m}_{char}-m_0-0.25)}}$$

e per  $m_{char} - 0.25 < m \leq m_{char} + 0.25$

$$f_n(m) = \frac{1}{1 + c_2} \frac{\beta e^{-\beta(\bar{m}_{char} - m_0 - 1.25)}}{1 - e^{-\beta(\bar{m}_{char} - m_0 - 0.25)}}$$

dove:

$1/1+c_2$  è un fattore di normalizzazione (ai fini dei calcoli probabilistici) con (ad es. NRC, 2012):

$$c_2 = \frac{1}{2} \frac{\beta e^{-\beta(\bar{m}_{char} - m_0 - 1.25)}}{1 - e^{-\beta(\bar{m}_{char} - m_0 - 0.25)}}$$

$\beta$  è il prodotto tra il valore  $b$ , della legge di Gutenberg – Richter, e  $\ln(10)$

Il tasso di attività  $\alpha_n(m^0)$  e la funzione di distribuzione delle magnitudo  $f_n(m)$  insieme vanno a costituire la relazione di ricorrenza delle magnitudo.

$$\alpha(m \geq m_{min}) = \alpha(m \geq m_0) \int_{m_{min}}^{\bar{m}_{char} + 0.25} f_n(m) dm$$

#### 4.3.1.3 Valutazione della distanza terremoto - sito

Nelle analisi per la valutazione della pericolosità sismica la definizione del parametro “distanza” può variare molto. Le più utilizzate sono:

- distanza del sito dall’epicentro;
- distanza del sito dall’ipocentro;
- distanza del sito dal punto più vicino della rottura superficiale;
- distanza del sito dal punto più vicino della proiezione in superficie della rottura.

Alcune definizioni tengono conto della profondità della rottura mentre altre considerano solo le distanze in superficie. Inoltre le definizioni basate su ipocentro ed epicentro considerano solo la posizione dell’inizio della rottura mentre altre definizioni necessitano di considerare esplicitamente il fatto che le rotture avvengono su un piano piuttosto che in un singolo punto nello spazio.

Normalmente, in occasione di terremoti con magnitudo elevata e distanti le distanze sorgente-sito vengono misurate rispetto all’epicentro o all’ipocentro, mentre per siti vicini alla sorgente, le distanze vengono misurate direttamente dal punto più vicino della rottura di

faglia. La distanza sito-sorgente è di solito identificata utilizzando sia l'inclinazione che la profondità del piano di faglia e la geometria della sorgente.

#### **4.3.2 Caratterizzazione della fagliazione superficiale**

In generale, le relazioni di attenuazione forniscono le stime dei parametri della distribuzione di probabilità di dislocazione come una funzione di semplici parametri che caratterizzano la sorgente del terremoto, l'ubicazione del sito rispetto alla faglia causativa, e possibilmente, le condizioni geologiche superficiali al sito. Esse descrivono la distribuzione dei movimenti lungo la faglia e l'attenuazione dei movimenti al di fuori di essa. In molti aspetti, una relazione di attenuazione della dislocazione è simile alle relazioni di attenuazione utilizzate nelle PSHA, ma l'attenuazione della dislocazione è molto meno compresa rispetto a quella dei parametri legati allo scuotimento al suolo e i dati empirici di dislocazione, soprattutto per quanto riguarda quelli di fagliazione secondaria, sono scarsi. Diventa quindi una questione importante per la valutazione della pericolosità da fagliazione la definizione dei limiti entro cui le future dislocazioni al sito varieranno relativamente alla quantità di rigetto e alla distribuzione delle rotture lungo la faglia e al di fuori di essa. Le incertezze nella distribuzione degli *slip* e la quantità di rottura superficiale devono essere quantificate e incluse in modo esplicito nella PFDHA (ANSI, 2015).

All'interno dell'approccio terremoto, per la valutazione della pericolosità totale, devono essere considerate sia la fagliazione primaria che quella secondaria, rappresentate da modelli di distribuzione della probabilità (Youngs et al., 2003):

$$P_{kn}(D > d|m, r) = P_{kn}(Slip|m) \cdot P_{kn}(D > d|m, r, Slip)$$

I modelli utilizzati per la rappresentazione della distribuzione delle probabilità sopra riportate variano a seconda della tipologia di faglia in esame (normale, inversa, trascorrente) o se si tratta di fagliazione primaria o secondaria.

Tali modelli sono basati su dati empirici, per cui la corretta applicazione della procedura per lo svolgimento di una PFDHA deve innanzitutto prevedere la formulazione di distribuzioni di probabilità specifiche per la struttura, il sito o la regione di interesse. Questo tuttavia risulta difficile a causa della scarsità dei dati di fagliazione (mappatura delle faglie, valori di

dislocazione, etc..) misurati in occasione di terremoti passati, soprattutto se si ricercano dati di più eventi avvenuti su una stessa struttura.

Per questo motivo, all'interno di queste linee guida vengono riportati i modelli proposti in letteratura per la caratterizzazione della fagliazione, ricavati perlopiù dall'analisi di *database* costruiti grazie alla raccolta di dati misurati in occasione di terremoti avvenuti in diverse parti del mondo, tra loro confrontabili sulla base di alcuni parametri, primo tra tutti il contesto tettonico e geodinamico dell'area.

#### **4.3.2.1 Caratterizzazione della fagliazione primaria**

La fagliazione primaria si verifica lungo il piano riconoscibile come il luogo in cui avviene il rilascio di energia sismica in occasione di un terremoto. Se la rottura sul piano si estende fino alla superficie, essa può essere rappresentata come una dislocazione lungo una singola traccia o all'interno di una zona ampia anche fino a diversi metri (Stepp et al., 2001).

##### **4.3.2.1.1 Presenza di rotture in superficie sulla faglia primaria - $P(\text{slip} | m)$**

Questo termine esprime la probabilità condizionata che la rottura sulla faglia causata dal terremoto di magnitudo  $m$  raggiunga la superficie al punto  $k$  su quella stessa faglia.

##### Indicazioni per l'applicazione

Tale probabilità può essere calcolata sia attraverso simulazioni che con l'utilizzo di modelli empirici. In generale, la determinazione della probabilità di avere dislocazione in un particolare sito deve fare riferimento alle informazioni sito e faglia specifiche. Se tali informazioni non sono disponibili o sono inadeguate, possono essere applicati modelli statistici e coefficienti derivati da dati relativi a terremoti globali con simile meccanismo di fagliazione in contesti tettonici simili.

##### 1) *Metodo per simulazioni*

Nel primo caso la distribuzione della probabilità delle distanze tra sito e rottura viene ottenuta sulla base di una simulazione in cui, per quel dato terremoto di magnitudo  $m$ , la rottura attesa (stimata sulla base di relazioni empiriche che mettono in relazione magnitudo, area di rottura e lunghezza (ad es. Wells and Coppersmith, 1994; Stirling e Goded, 2013)), se di lunghezza inferiore alla lunghezza totale della faglia considerata, viene localizzata casualmente o secondo intervalli regolari lungo tutta la lunghezza della faglia. Il processo viene ripetuto per ogni valore di magnitudo generabile da quella faglia,

utilizzando le rispettive lunghezze e/o aree di rottura; le misure di tutte le distanze così ottenute vanno a popolare la distribuzione di probabilità (Youngs et al, 2003). Tale metodologia deve essere applicata nel caso in cui si assumesse che le rotture co-sismiche possano verificarsi in qualsiasi punto della faglia e che le dimensioni di tale rottura debbano essere individuate attraverso relazioni empiriche tra la magnitudo e l'area di rottura (ad es. Wells and Coppersmith, 1994).

Un approccio alternativo per valutare l'occorrenza di rotture superficiali è basato sulla considerazione di un'area di rottura da terremoto e la distribuzione delle profondità dei terremoti attesi su una faglia. L'area di rottura, come anticipato è tipicamente valutata da relazioni empiriche dipendenti dalla magnitudo (Wells e Coppersmith, 1994; Hanks e Bakun, 2002). L'area di rottura viene quindi localizzata sulla faglia in corrispondenza della distribuzione delle profondità ipocentrali attese in occasione di terremoti (questa valutazione si basa tipicamente sulla distribuzione osservata della sismicità ben localizzata sulla faglia o nella regione) (ANSI, 2015).

## 2) *Metodo per modelli empirici*

In alternativa può essere valutata sulla base di modelli empirici che definiscono la probabilità che la rottura raggiunga la superficie come funzione della magnitudo. L'occorrenza di rotture superficiali su una faglia principale, considerato l'avvenimento di un terremoto di magnitudo  $m$ , è spesso stabilita attraverso l'analisi dei dati di numerosi terremoti con meccanismo di sorgente e contesto tettonico simile a quello di interesse. Sulla base di una serie di *dataset* (ad es. Wells e Coppersmith (1993), dePolo (1994) e Pezzopane and Dawson (1996)) Wells e Coppersmith (1993) e Lettis et al. (1997) hanno derivato un modello di regressione logistica per la definizione del tasso al quale terremoti di diverse magnitudo, possano rompere la superficie; la forma della regressione logistica è stata selezionata in virtù della natura dicotomica delle variabili considerate, per cui, data l'occorrenza di un terremoto di magnitudo  $m$  la rottura superficiale può verificarsi oppure no. La probabilità di un risultato positivo è quindi data da:

$$P(\text{Slip}|m) = \frac{e^{f(m)}}{1 + e^{f(m)}}$$

con  $f(m) = a + bm$

I coefficienti  $a$  e  $b$  assumeranno valori differenti a seconda del tipo di cinematica caratterizzante la fagliazione e, idealmente, le caratteristiche dell'ambiente fisico in cui viene analizzato il processo; per questo motivo, al fine di diminuire le incertezze associate, tali coefficienti dovrebbero essere derivati da *database* costruiti *ad hoc* a seconda del contesto geologico e sismotettonico dell'area di studio. Nei casi in cui non fossero disponibili dati sufficienti per la loro definizione, possono essere utilizzati i valori presenti in letteratura, scegliendoli sulla base della cinematica di interesse. In particolare:

- per tutte le cinematiche (Wells e Coppersmith, 1993)

$$a = -12.51 \text{ e } b = 2.053$$

- per faglie normali (Pezzopane e Dawson, 1996)

$$a = -16.02 \text{ e } b = 2.685$$

$$a = -18.71 \text{ e } b = 3.041$$

$$a = -12.53 \text{ e } b = 1.921$$

- per faglie inverse (Moss e Ross, 2011)

$$a = -7.3 \text{ e } b = 1.03$$

#### Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

Le caratteristiche proprie della metodologia per lo svolgimento di un PFDHA, suggeriscono che l'incertezza nella localizzazione delle potenziali future rotture superficiali, e di conseguenza la sua trattazione, ha un ruolo fondamentale sulla definizione della pericolosità; questo, soprattutto perché la fagliazione superficiale, non è un fenomeno spazialmente continuo e, interessa aree che, seppur numerose, presentano estensioni limitate, soprattutto in ampiezza. Le variabili che definiscono l'incertezza associata alla localizzazione di rotture future sono principalmente:

- l'incertezza derivante dall'accuratezza della mappatura delle tracce di faglia e delle rotture associate, la scala a cui vengono mappate e la capacità dell'operatore, che può essere ricondotta alla componente epistemica;
- l'incertezza dovuta alla naturale variabilità della localizzazione dei terremoti e delle caratteristiche delle rotture, riconducibile alla componente aleatoria.

Ad esempio Petersen et al. (2011) introduce un'ulteriore funzione di densità di probabilità  $f_R(r)$  all'interno della PFDHA con cui considerare ed inserire direttamente nel calcolo entrambe le componenti che concorrono all'incertezza legata alla localizzazione delle rotture. Le due componenti dell'incertezza dovrebbero idealmente essere trattate in modo separato, ma ciò risulta possibile raramente, soprattutto perché richiede una raccolta sistematica di tali dati ed una loro attenta valutazione statisticamente significativa, poiché, se così non fosse, potrebbero contribuire all'introduzione di ulteriori incertezze.

In generale, la componente aleatoria dell'incertezza associata alla posizione delle rotture dovrebbe essere quantificata sulla base di analisi dei dati geologici raccolti da studi paleosismici così da permettere l'inclusione esplicita della variabilità naturale della posizione delle rotture future nei calcoli della PFDHA, fornendo una migliore comprensione del fenomeno e permettendo una più accurata eventuale definizione dei vincoli di progettazione per il pericolo di dislocazione stimato.

Sulla base dell'analisi dei dati, Chen et al. (2013) propone di integrare l'incertezza dell'ubicazione, nei calcoli della pericolosità, come 2 deviazioni standard su entrambi i lati della struttura; di conseguenza la dislocazione calcolata per un dato livello di pericolosità in una data posizione è un profilo a forma di campana che è perpendicolare alla rottura e centrato sulla traccia mappata della faglia.

Per quanto riguarda la componente epistemica invece, una diminuzione dell'incertezza può certamente derivare da una migliore mappatura delle strutture di interesse, poiché la sua origine può essere fatta risalire alla risoluzione della base cartografica e alle difficoltà nel trasferire una struttura, anche se ben riconosciuta in campo, su una base cartografica con risoluzione limitata. L'accuratezza delle tracce in carta dipende anche dalle condizioni geomorfologiche e geologiche, che influenzano l'abilità di un geologo nel riconoscere e interpretare la faglia così come l'abilità di trasferire accuratamente quelle informazioni spaziali su una base cartografica o in GIS. La quantificazione dell'incertezza relativa alla localizzazione delle rotture superficiali deve quindi basarsi sull'analisi statistica dei dati disponibili, ottenuti dal confronto con basi cartografiche più precise, in particolare DEM da dati LiDAR a risoluzione submetrica, foto aeree e immagini digitali multispettrali ad alta risoluzione.

Ad esempio, la metodologia proposta da Petersen et al. (2011), successivamente ripresa da Chen et al. (2013), si basa sul confronto tra le tracce di faglia mappata prima di un terremoto

e le rotture prodotte dal terremoto avvenuto sulla faglia con lo scopo di quantificare la capacità delle tracce mappate pre-evento di predire la localizzazione delle rotture post-evento, partendo dal presupposto che le strutture siano state originariamente mappate sulla base delle espressioni geomorfologiche della faglia, e che questi elementi dovrebbero essere più facilmente riconoscibili, ad esempio, nelle immagini LiDAR.. Dall'analisi di questi dati sono state ottenute delle regressioni che possono essere applicate ad altre situazioni per valutare, su basi probabilistiche, la localizzazione delle future rotture, anche se l'affidabilità per l'applicazione di tali equazioni risulta fortemente condizionata dal *database* iniziale utilizzato per la loro definizione. Tuttavia, mentre questa analisi dell'incertezza può non essere necessaria per nuove tracce mappate sulla base delle nuove tipologie di dati ad alta risoluzione, le stime dell'incertezza sono importanti per l'analisi delle strutture già mappate in quanto sono numerose le strutture che non hanno copertura LiDAR. Inoltre, poiché la mappatura geologica di faglie attive viene tipicamente compilata a scale simili in altre regioni e utilizzando metodi simili, questa metodologia per la quantificazione delle incertezze potrebbe essere applicabile in altre aree e forse estesa, attraverso una metodologia generale, ad altre tipologie di faglia dove questo genere di analisi non è ancora stato intrapreso (Chen et al., 2013).

#### **4.3.2.1.2 Stima della dislocazione – $P(D>d|m,r,Slip)$**

Il secondo modello necessario per la definizione della funzione di attenuazione della dislocazione rappresenta la probabilità condizionata che al punto  $k$  la dislocazione superi un valore  $d$  a patto che avvenga un movimento in seguito ad un terremoto di magnitudo  $m$  generatosi sulla faglia  $n$  ad una distanza  $r$  dal sito. In generale, la probabilità condizionata che la dislocazione sulla faglia principale superi un valore prefissato può essere valutato principalmente sulla base di modelli costruiti su dati empirici. Tali modelli dovrebbero essere costruiti sulla base di dati relativi alla specifica faglia analizzata o relative alle strutture simili presenti nella regione; tuttavia, qualora non fossero disponibili dati sufficienti o, fosse ritenuto che le caratteristiche delle rotture possano variare in modo casuale in occasione di terremoti futuri, è consigliato l'utilizzo di modelli e coefficienti derivati dall'analisi dell'insieme di dati relativi a terremoti avvenuti a livello globale, che presentino almeno la stessa cinematica (diretta, inversa, trascorrente).



**Indicazioni per l'applicazione**

In generale, la procedura per la caratterizzazione della distribuzione delle dislocazioni prevede le seguenti attività:

- 1) valutare la dislocazione media  $D_{media}$  o la dislocazione massima  $D_{max}$  come funzione della magnitudo attraverso modelli empirici (vedi § 4.2.3);
- 2) sviluppare la distribuzione delle probabilità per la dislocazione normalizzata per  $D_{media}$  o  $D_{max}$  rispetto alla loro posizione lungo la traccia di faglia, o selezionare il modello più adatto tra quelli presenti in letteratura.

Di seguito vengono presentati i modelli presenti in letteratura per la valutazione delle dislocazioni, suddivisi per le diverse cinematiche.

**Faglie normali**

Youngs et al. (2003) suggerisce la normalizzazione delle misure di dislocazione sulla faglia rispetto al massimo valore di dislocazione  $D_{max}$  misurato per ogni rottura (le indicazioni per il calcolo di  $D_{max}$  sono riportate nel paragrafo 4.3.2.2). La distribuzione dei rapporti  $D/D_{max}$  viene espressa in funzione di  $x/L$  ossia il rapporto tra la distanza dal punto di interesse e uno degli estremi della rottura ( $x$ ) e la lunghezza totale della rottura ( $L$ ). La distribuzione dei rapporti viene costruita assumendo che  $D/D_{max}$  possa variare tra 0 e 1 e che  $f(D/D_{max} | x/L)$  sia simmetrica su  $x/L=0.5$  (la simmetria è una forzatura perché non si può sapere a priori se  $x$  sia misurato rispetto all'estremità della rottura con la maggiore o minore dislocazione). Fissato l'intervallo  $0 \leq D/D_{max} \leq 1$  è possibile modellizzare la probabilità attraverso la distribuzione beta (Youngs et al., 2003):

$$F(D/D_{max}) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^y z^{a-1}(1-z)^{b-1} dz$$

dove:

$\Gamma()$  è la funzione gamma

$$a = \exp(-0.705 + 1.38 x/L)$$

$$b = \exp(0.421 - 0.257 x/L) \quad \text{con } 0 \leq x/L \leq 0.5$$

La probabilità condizionata di eccedenza  $P_{kn}(D>d|m,r,slip)$  può essere quindi ottenuta convolvendo l'equazione sopra con la distribuzione lognormale di  $D_{max}$ . Poiché il calcolo di

$P_{kn}(D>d|m,r,slip)$  richiede la valutazione del rapporto  $x/L$  per ogni rottura, la probabilità condizionata di slip  $P_{kn}(slip|m,r)$  e la probabilità condizionata di eccedenza  $P_{kn}(D>d|m,r,slip)$  devono essere calcolate unitamente.

In alternativa, la dislocazione lungo la rottura può essere normalizzata sulla dislocazione media.  $P_{kn}(D>d|m,r,slip)$  viene quindi calcolata convolvendo la distribuzione per  $D/D_{media}$  con una distribuzione empirica di  $D_{media}$  come funzione della magnitudo (per es. Wells e Coppersmith, 1994; Stirling e Goded, 2013). Il rapporto  $D/D_{media}$  è limitato a valori positivi e può essere asimmetrica. Una distribuzione flessibile di questo tipo è la distribuzione gamma con ha la seguente forma cumulativa (Youngs et al., 2003):

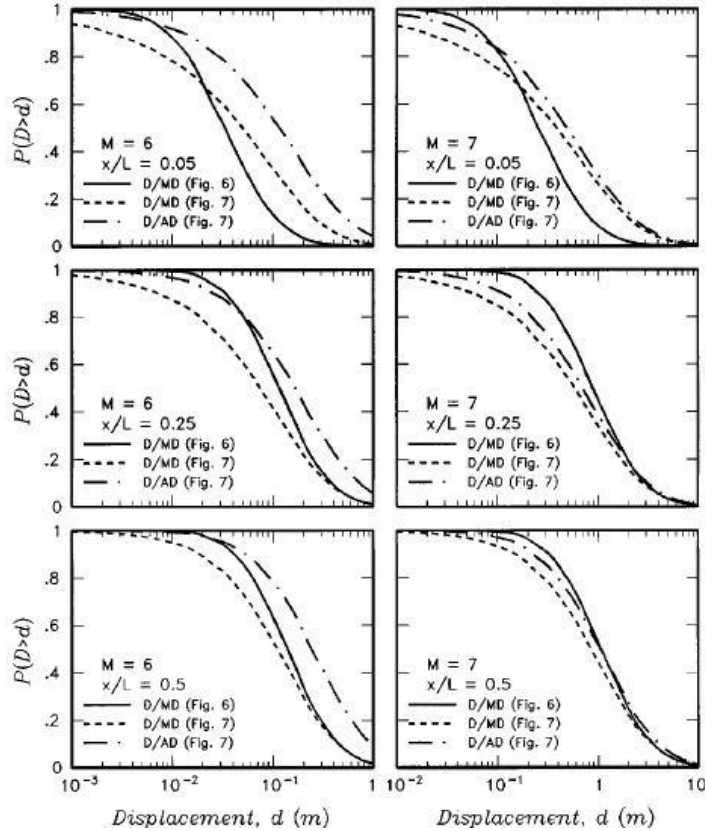
$$F(D/D_{media}) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{D/D_{media}/b} e^{-t} t^{a-1} dt$$

dove:

$\Gamma()$  è la funzione gamma

$$a = \exp(-0.193 + 1.628 x/L)$$

$$b = \exp(0.009 - 0.476 x/L) \quad \text{con } 0 \leq x/L \leq 0.5$$



**Figura 4.2.** Confronto tra alcuni esempi di distribuzioni condizionate di probabilità  $P_{kn}(D>d|m,r,slip)$  normalizzate su  $D_{max}$  (in figura MD) e  $D_{media}$  (in figura AD) (Youngs et al., 2003)

La figura 4.2 mostra il confronto tra curve di probabilità di eccedenza costruite secondo i modelli sopra riportati. Le differenze nelle curve, evidenti in questo esempio ma anche generalmente riscontrabili, derivano da una serie di fattori, tra cui: differenze nelle ampiezze delle distribuzioni dei dati misurati, differenze nelle regressioni empiriche selezionate (a seconda delle magnitudo e di  $D_{max}$  e  $D_{media}$ ), differenze nelle forme delle distribuzioni beta e gamma, forzatura o no delle relazioni sulla base di considerazioni geometriche e fisiche, come ad esempio tendere a dislocazione nulla in vicinanza dell'estremità della rottura.

**Faglie trascorrenti**

Petersen et al. (2011) hanno sviluppato una serie di regressioni per la modellizzazione delle rotture che possono verificarsi in ambiente trascorrente, che mettono in relazione distanza e dislocazione in funzione della magnitudo o, dislocazioni normalizzate per la dislocazione media con la distanza, eliminando così la dipendenza dalla magnitudo, poiché già considerata nel calcolo della dislocazione media. Sia per i dati normalizzati che per la dipendenza distanza-magnitudo, Petersen et al. (2011) propone 3 diversi modelli per la definizione della probabilità di eccedenza ( $l/L$  rappresenta la distanza lungo la faglia espresso come il rapporto tra la distanza tra il punto della rottura più vicino al sito e l'estremità della rottura più vicina ( $l$ ) e la lunghezza totale della rottura ( $L$ ):

1. *modello bilineare* che modella una situazione in cui si verificano dislocazioni costanti vicine al centro della rottura e assottigliamenti lineari verso le estremità (Fig. 4.3 a):

- a. magnitudo – distanza:

- i. per le estremità ( $l/L < 0.3$ )

$$\ln(D) = a_1 m + b(l/L) + c_1$$

con  $a_1 = 1.7969$ ;  $b = 8.5206$ ;  $c_1 = -10.2855$ ;  $\sigma_{\ln(D)} = 1.2906$

- ii. per la parte centrale ( $l/L \geq 0.3$ )

$$\ln(D) = a_2 m + c_2$$

con  $a_2 = 1.7658$ ;  $c_2 = -7.8962$ ;  $\sigma_{\ln(D)} = 0.9624$

- b. valori di dislocazione normalizzati ( $D/D_{media}$ ) fissando  $D/D_{media} = 1$  al centro della rottura e  $(l/L)' = 0.3008$  il valore di  $l/L$  dove le due porzioni si intersecano (Fig.4.3e):

- i. per  $l/L < (l/L)'$

$$\ln(D/D_{media}) = 8.2525(l/L) - 2.3010 \pm 1.2962 \sigma_{\ln(D/D_{media})}$$

ii. per  $l/L \geq (l/L)'$

$$\ln(D/D_{media}) = 0.1816 \pm 1.0013 \sigma_{\ln(D/D_{media})}$$

2. *modello polinomiale* che modella dislocazioni leggermente inferiori al centro, prevedendo una distribuzione della rottura asimmetrica dove le dislocazioni possono essere maggiori in prossimità delle estremità (es. Wesnousky, 2008) (Fig. 4.3 c):

a. magnitudo – distanza:

$$\ln(D) = 1.7895m + 14.4696(l/L) - 20.1723(l/L)^2 - 10.54512 \pm 1.1346 \sigma_{\ln(D)}$$

b. valori di dislocazione normalizzati ( $D/D_{media}$ ):

$$\ln(D/D_{media}) = 14.2824(l/L) - 19.8833(l/L)^2 - 2.6279 \pm 1.1419 \sigma_{\ln(D/D_{media})}$$

3. *modello ellittico* che curva all'estremità (Biasi and Weldon, 2006, 2009) (Fig. 4.3 d):

a. magnitudo – distanza:

$$\ln(D) = bx + am + c$$

dove:

$$bx = b \sqrt{1 - \frac{1}{0.5^2} \left[ \left( \frac{l}{L} \right) - 0.5 \right]^2}$$

$$\text{con } b = 3.3041; a = 1.7927; c = -11.2192; \sigma_{\ln(D)} = 1.1348$$

b. valori di dislocazione normalizzati ( $D/D_{media}$ ):

$$\ln(D/D_{media}) = 3.2699x - 3.2749 \pm 1.1419 \sigma_{\ln(D/D_{media})}$$

dove:

$$x = \sqrt{1 - \frac{1}{0.5^2} \left[ \left( \frac{l}{L} \right) - 0.5 \right]^2}$$

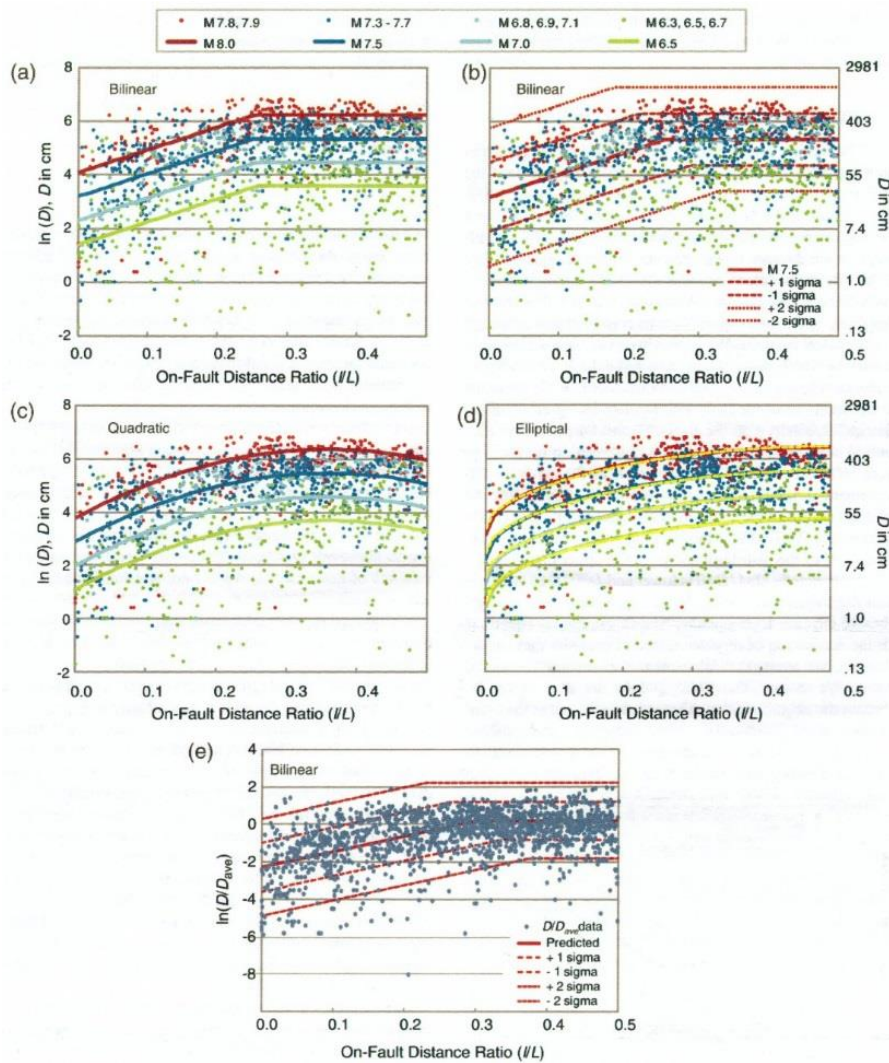


Figura 4.3. Confronto tra i modelli di regressione proposti da Petersen et al. (2011)

### Faglie inverse

Sebbene la probabilità di fagliazione superficiale in ambiente inverso sia più bassa che in ambiente normale l'analisi del rischio di fagliazione superficiale risulta particolarmente importante poiché il verificarsi di rotture secondarie non può essere esclusa anche a grandi distanze (fino a km dalla faglia principale).

Moss e Ross (2011) forniscono nuove equazioni empiriche ricavate da dati relativi a faglie inverse alternative alle relazioni che Youngs et al. (2003) avevano proposto per faglie normali. Sulla base di *database* appropriati costruiti con dati relativi a eventi di fagliazione inversa Moss e Ross (2011) propongono il seguente modello per la rappresentazione di  $P_{kn}(D > d | m, r, slip)$  (sia per  $D_{media}$  che  $D_{max}$ ):

$$h(D) = \int_{-\infty}^{\infty} f(D/D_{media})g(D_{media})\frac{1}{D_{media}}dD_{media}$$

dove:

- per la determinazione della variabilità spaziale delle rotture lungo la faglia ( $f(D/D_{media})$  o  $f(D/D_{max})$ ):

- distribuzione di Weibull per  $D/D_{media}$ :

$$f(D/D_{media}) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{z}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(z/\lambda)^k}$$

dove:

$$k = \exp(-31.8(x/L)^3 + 21.5(x/L)^2 - 3.32 x/L + 0.431)$$

$$\lambda = \exp(17.2(x/L)^3 - 12.8(x/L)^2 + 3.99 x/L - 0.38)$$

- distribuzione gamma per  $D/D_{media}$ :

$$f(D/D_{media}) = z^{k-1} \frac{e^{-z/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}$$

dove:

$$k = \exp(-30.4(x/L)^3 + 19.9(x/L)^2 - 2.29 x/L + 0.574)$$

$$\theta = \exp(50.3(x/L)^3 - 34.6(x/L)^2 + 6.60 x/L - 1.05)$$

- distribuzione beta per  $D/D_{max}$ :

$$f(D/D_{max}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) + \Gamma(\beta)} z^{\alpha-1} (1 - z)^{\beta-1}$$

dove:

$$\alpha = 0.901x + 0.713$$

$$\beta = -1.86x + 1.74$$

- per la determinazione della distribuzione delle dislocazioni media e massima ( $g(D_{media})$  o  $g(D_{max})$ ):

$$\log(D_{media}) = 0.3244m - 2.2192$$

$$\log(D_{max}) = 0.5102m - 3.1971$$

### Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

La quantificazione della variabilità della dislocazione è un passaggio fondamentale per una corretta PFDHA, poiché la variabilità nella dislocazione nelle equazioni empiriche alla base

della valutazione è grande. Ad esempio i dati di Petersen et al. (2011) indicano una deviazione standard per i dati di dislocazione che è significativamente più alta delle deviazioni standard dalle attuali equazioni di attenuazione utilizzate all'interno delle PSHA; questa grande differenza tra la variabilità nelle equazioni di attenuazione dello scuotimento al suolo rispetto a quella associata all'attenuazione della dislocazione non è sorprendente se si considera la scarsità e la scarsa qualità dei dati di dislocazione rispetto ai primi (ANSI, 2015).

Studi paleosismici sito-specifici che dimostrino la ripetibilità delle dislocazioni nel tempo possono essere utili per limitare l'incertezza e per quantificare la variabilità naturale delle quantità di rigetto superficiale.

In molti casi, le relazioni di attenuazione utilizzate nella PFDHA sono selezionate tra modelli esistenti in letteratura sviluppati sulla base di dati relativi a eventi di dislocazione avvenuti su strutture ubicate altrove ma in regioni caratterizzate dallo stesso regime tettonico del sito di interesse. I modelli alternativi considerati per la valutazione della distribuzione dei valori di dislocazione costituiscono la componente epistemica dell'incertezza e devono essere esplicitate le motivazioni che hanno portato alla loro scelta.

#### **4.3.2.2 Caratterizzazione della fagliazione secondaria**

La fagliazione secondaria o distribuita è definita come la dislocazione che avviene su altre faglie, tagli o fratture in prossimità della rottura principale in risposta ad una riattivazione della stessa (Youngs et al., 2003). In generale, la fagliazione secondaria è spazialmente discontinua e può originarsi anche a diverse decine di metri o diversi chilometri di distanza dalla rottura principale. Una faglia in grado di causare rotture primarie può anche costituire fagliazione secondaria in seguito a rotture primarie avvenute su altre strutture (Stepp et al., 2001); quindi, una delle prime assunzioni da fare è che tutte le strutture riconoscibili mappate che mostrano qualche testimonianza di dislocazione accumulata siano in grado di dislocare in occasione di terremoti futuri. Inoltre è necessario stabilire se una superficie che non mostra evidenze di discontinuità originatesi in seguito a eventi passati, possa essere considerata potenzialmente in grado di rompere in seguito a terremoti futuri. In Petersen et al. (2011) la fagliazione secondaria o distribuita viene considerata come la dislocazione che avviene su fratture non mappate e su altre discontinuità strutturali a piccola scala in prossimità della rottura principale esclusa la riattivazione del movimento su altre faglie, poiché l'incertezza introdotta è considerata troppo elevata a causa della grande differenza nelle caratteristiche di rottura delle



due tipologie di strutture. Per questo motivo Petersen et al. (2011) considera i modelli sviluppati applicabili entro i 2 km dalla faglia principale, poiché oltre tale distanza la maggior parte delle rotture potrebbe derivare da movimenti innescati su faglie esistenti.

Tuttavia, l'inclusione della fagliazione distribuita è importante, poiché in alcune situazioni molte dislocazioni possono essere osservate senza che necessariamente la struttura primaria propaghi fino alla superficie, come ad esempio negli ambienti estensivi dell'Italia centrale e della Grecia (Weatherill et al., 2014).

L'analisi e la rappresentazione della fagliazione secondaria nella PFDHA deve basarsi sulle seguenti componenti:

- stima della distribuzione potenziale della fagliazione secondaria al sito;
- analisi, perlopiù in ambiente GIS, della distribuzione delle rotture suddividendo lo spazio attraverso reticolati di varie dimensioni;
- valutazione delle quantità di dislocazione potenziale su faglie secondarie.

#### **4.3.2.2.1 Presenza di rotture secondarie in superficie - $P(Slip|m;r)$**

Come per la fagliazione primaria,  $P_{kn}(Slip|m;r)$  esprime la probabilità condizionata che si verifichino dislocazioni in superficie, o vicino ad essa, su una struttura nel punto  $k$  in seguito ad un terremoto di magnitudo  $m$  avvenuto su un'altra sorgente  $n$  a distanza  $r$ .

Il meccanismo causativo che associa la rottura sulla faglia primaria ai movimenti su faglie o discontinuità adiacenti alla rottura principale, nella maggior parte dei casi non è sufficientemente compreso e potrebbero essere coinvolti molteplici fattori. Per questo motivo si procede attraverso un approccio empirico per la definizione di questa funzione di probabilità, facendo riferimento a dati relativi a rotture storiche, al sito o in situazioni paragonabili, o evidenziate attraverso studi paleosismici.

#### **Indicazioni per l'applicazione**

Per la stima della probabilità di occorrenza di rotture secondarie si procede, di norma, sulla base delle tracce cartografate attraverso analisi statistiche su base spaziale tramite l'utilizzo di *software GIS (Geographic Information System)*. L'approccio è basato su una mappatura dettagliata delle rotture superficiali prodotte da terremoti passati utilizzando basi di dati in formato *raster*, suddivise in grigliati con celle di dimensione definita; il tasso di occorrenza di fratture viene quindi indicato come il rapporto tra il numero delle celle contenenti fagliazione secondaria e il numero totale delle celle costituenti l'intera area potenzialmente interessata



da rotture in seguito ad un terremoto di magnitudo  $m$ . Ad esempio Youngs et al. (2003), ha proposto un calcolo del tasso basato su celle di dimensioni 500mx500m mentre Petersen et al. (2011) ha proposto l'utilizzo di celle con diverse dimensioni, 25x25m, 50x50m, 100x100m, 150x150m e 200x200m. La scelta delle dimensioni della cella da utilizzare è un parametro critico per la valutazione della pericolosità e deve dipendere direttamente dalle dimensioni dell'infrastruttura in progetto; tipicamente aree più piccole hanno minore probabilità di contenere rotture superficiali.

Per la definizione della funzione che descriva la distribuzione, i dati utilizzati devono inoltre essere analizzati per evidenziare, attraverso forme funzionali riconoscibili, eventuali *trend* osservabili, come ad esempio una presenza sempre minore di rotture all'aumentare della distanza dalla faglia principale sorgente, o l'aumentare della densità di rotture all'aumentare della magnitudo, o a seconda della tipologia di faglia, le differenze di presenza di rotture tra i blocchi interessati dal movimento di faglia. Ad esempio, sulla base dei dati utilizzati per la definizione del modello, che sembrano mostrare alcune tendenze dipendenti dalla distanza e dalla magnitudo, Youngs et al. (2003), in virtù anche della natura dicotomica di questo fenomeno, per cui una rottura secondaria può esserci o non esserci in un punto (in questo caso una cella), propone la seguente regressione logistica (Fig. 4.4):

$$P(\text{Slip}|m) = \frac{e^{f(x)}}{1 + e^{f(x)}}$$

$$\text{con } f(x) = C_1 + (C_2 + C_3 m + C_4 h) \cdot \ln(r + C_5)$$

dove

$m$  è la magnitudo

$r$  la distanza dalla rottura principale

$h$  un indicatore variabile ( $h=0$  *footwall*,  $h=1$  *hangingwall*)

$C_1 = 2.06$ ;  $C_2 = -4.62$ ;  $C_3 = 0.118$ ;  $C_4 = 0.682$ ;  $C_5 = 3.32$  (dai dati in Pezzopane e Dawson 1996)

I dati riportati nella figura 4.4 mostrano una grande variabilità tra i tassi di occorrenza valutati per terremoti di magnitudo simile, evidenziando la presenza di altri importanti fattori che influenzano le distribuzioni di probabilità, che non sono stati considerati nell'equazione sopra. Poiché spesso i parametri influenzanti la distribuzione delle rotture non risultano facilmente

riconoscibili, può essere applicato un approccio alternativo per il calcolo della probabilità che prevede la rappresentazione di tali variabili sconosciute attraverso una loro variazione random (ad es. Brillinger and Preisler, 1983):

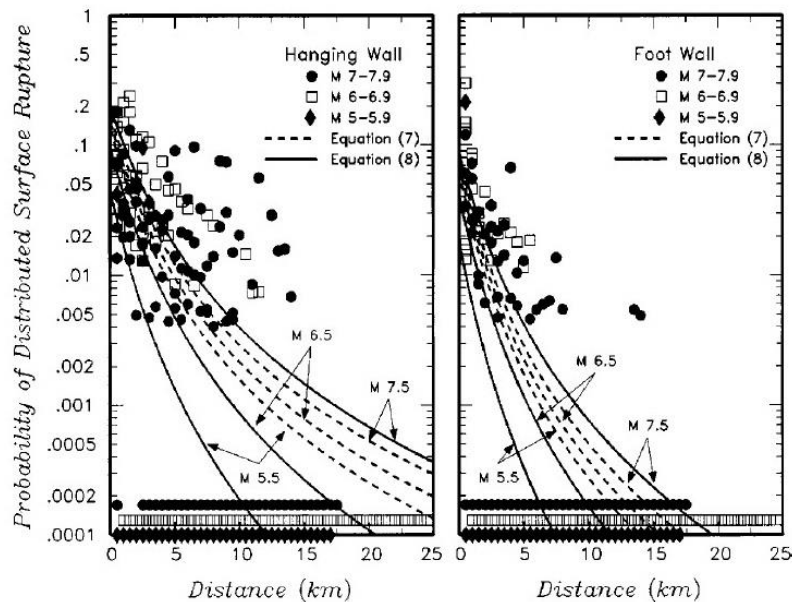
$$f(x)=C_1+(C_2+C_3m+C_4h)\cdot\ln(r+C_5)+\tau z_i$$

dove

$z_i$  è una variata normale con media fissata a 0 e unità di varianza rappresentante un effetto random per l'i-esimo evento

$\tau$  la misura della variabilità esistente tra eventi diversi, qui  $\tau = 0.611$

$C_1 = 3.27$ ;  $C_2 = -8.28$ ;  $C_3 = 0.577$ ;  $C_4 = 0.629$ ;  $C_5 = 4.14$  (dai dati in Pezzopane e Dawson 1996)



**Figura 4.4.**  $P(\text{Slip}|m;r)$  relativa ai dati contenuti in Pezzopane e Dawson (1996) (Youngs et al., 2003)

I dati relativi alla presenza di fagliazione secondaria non mostrano sempre delle tendenze in relazione ad altri parametri. Ad esempio, Petersen et al. (2011), sulla base delle analisi dei terremoti considerati, non evidenzia alcuna dipendenza della frequenza di rotture dalla magnitudo del terremoto causativo. Tuttavia ritrova una dipendenza della frequenza di rotture dalla distanza dalla faglia sorgente e viene proposta la seguente funzione esponenziale, che tiene conto delle diverse dimensioni delle celle utilizzate per il calcolo dei tassi di occorrenza:

$$\ln(P) = a(z)\ln(r) + b(z)$$

dove:

$r$  è la distanza dalla faglia sismogenica

$a(z)$  e  $b(z)$  sono i coefficienti di regressione e sono in funzione della dimensione delle celle

<i>Dimensione cella (m<sup>2</sup>)</i>	<i>a(z)</i>	<i>b(z)</i>	<i>Deviazione standard</i>
25 x 25	-1.1470	2.1046	1.2508
50 x 50	-0.9000	0.9866	1.1470
100 x 100	-1.0114	2.5572	1.0917
150 x 150	-1.0934	3.5526	1.0188
200 x 200	-1.1538	4.2342	1.0177

La funzione esponenziale tuttavia non fornisce una buona rappresentazione della presenza di rotture entro poche centinaia di metri dalla faglia; per questo motivo la probabilità di rottura entro le aree prossime alla faglia principale viene interpolata linearmente sulla base della probabilità media di rottura sulla faglia stessa  $p_0$  e le prime due probabilità medie di fagliazione distribuita,  $p_1$  alla distanza  $r_1$  e  $p_2$  alla distanza  $r_2$  (Tab. 4.2).

**Tabella 4.2.** *Punti di interpolazione per la valutazione della presenza di fagliazione distribuita (Petersen et al., 2011)*

<i>Dimensione cella (m<sup>2</sup>)</i>	<i>p<sub>0</sub> (%)</i>	<i>p<sub>1</sub> (%)</i>	<i>p<sub>2</sub> (%)</i>	<i>r<sub>1</sub> (m)</i>	<i>r<sub>2</sub> (m)</i>
25 x 25	74.451	7.8690	2.0108	100	200
50 x 50	87.162	4.8206	2.6177	100	200
100 x 100	90.173	18.523	6.6354	100	200
150 x 150	87.394	19.592	7.0477	150	300
200 x 200	92.483	18.975	7.4709	200	400

#### Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

L'approccio per la valutazione della fagliazione secondaria presenta grandi limiti e comporta la presenza di una grande incertezza. Limiti e incertezze derivano soprattutto dalla scarsità dei dati osservabili; infatti, come visibile nelle analisi di Youngs et al. (2003) o Petersen et al. (2009) i modelli empirici sviluppati sono derivati da database relativamente ristretti. Di conseguenza, a prescindere dalla forma che può assumere la distribuzione e dai valori attribuiti ai coefficienti, il modello descritto ha come assunzione iniziale il fatto che la mappatura dei dati relativi alle rotture storiche sia completa, una condizione che non si verifica nella realtà delle applicazioni. Questo porta tendenzialmente ad una sottostima della potenziale presenza di rotture secondarie in occasione di terremoti futuri. Youngs et al. (2003) suggerisce che questa potenziale sottostima può essere controbilanciata dall'assunzione per cui la probabilità di

occorrenza di rotture sia considerata omogenea su tutta l'area inclusa all'interno di ognuna delle celle definite per l'analisi, tanto più quanto si assume una dimensione elevata della cella unitaria.

Come nell'analisi della fagliazione superficiale sulla struttura primaria, assume un ruolo fondamentale nella limitazione dell'incertezza epistemica, il grado di dettaglio, la completezza e la precisione della cartografia utilizzata nell'analisi, che deve essere aumentato attraverso indagini specifiche di sito come la mappatura geologica dettagliata, analisi geomorfologiche e studi paleosismologici di trincea. Tuttavia, poiché normalmente le strutture secondarie sperimentano dislocazioni limitate, può risultare molto complesso il loro riconoscimento, soprattutto a causa di fenomeni, come deposizione o erosione, che possono cancellare le evidenze in tempi molto brevi.

L'incertezza aleatoria associata alla fagliazione secondaria, derivante quindi dalla variabilità naturale del fenomeno può essere generalmente estremamente elevata soprattutto per quanto riguarda la valutazione della presenza di discontinuità e fratture non mappate in passato (Chen e Petersen, 2011), e dalla scarsa comprensione delle caratteristiche di dipendenza tra rottura primaria e secondaria e delle caratteristiche dei materiali che costituiscono gli strati superficiali.

#### **4.3.2.2 Stima della dislocazione – $P(D>d|m,r,Slip)$**

L'analisi della probabilità condizionata che la dislocazione sulle rotture secondarie e distribuite superi un valore prefissato di dislocazione è il parametro la cui definizione potrebbe risultare ad oggi la più complessa, principalmente a causa dei pochissimi dati disponibili sulle dimensioni delle rotture che avvengono su strutture secondarie. Tipicamente, in seguito ad un evento sismico, la rottura principale viene mappata e descritta con dettaglio maggiore rispetto alle rotture secondarie che sono più numerose e ampiamente disperse, con dimensioni limitate e, nella maggior parte dei casi non si conservano nel tempo e sono quindi non individuabili per eventi passati.

#### **Indicazioni per l'applicazione**

Alcuni autori hanno proposto delle metodologie per il calcolo della probabilità di eccedenza partendo da osservazioni sui *trend* eventualmente riconoscibili all'interno dei *dataset* considerati, da operazioni di normalizzazione delle dislocazioni secondarie sui valori di

dislocazione media ( $D_{media}$ ) o dislocazione massima ( $D_{max}$ ) relativi alla faglia principale (dePolo, 1994) o ricercando delle correlazioni tra i vari parametri all'interno dello scenario di applicazione del modello (Petersen et al., 2011) e individuando di conseguenza la funzione di forma che meglio descrivesse le distribuzioni dei valori di *offset*.

In generale, le analisi di Youngs et al e Petersen et al. 2011 indicano che la dislocazione su strutture secondarie diminuisce in direzione perpendicolare alla rottura della faglia principale all'aumentare della distanza da essa. I dati disponibili non indicano variazioni delle dislocazioni su fagliazione secondaria lungo la componente spaziale parallela alla rottura principale.

Inoltre, Youngs et al. (2003) riconosce anche una diminuzione della quantità di dislocazione al diminuire della magnitudo e all'aumentare della distanza e, nel caso di fagliazione diretta o inversa dislocazioni maggiori sul tetto e minori sul letto. Sulla base di queste osservazioni Youngs et al. (2003) descrive la distribuzione utilizzando valori di dislocazione distribuita normalizzati rispetto alla dislocazione massima ( $D_{max}$ ) sulla faglia primaria associata; come per le rotture sulla faglia principale, per la rappresentazione della distribuzione è stata individuata la funzione gamma:

$$F(d/D_{max}) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{d/D_{max}/b} e^{-t} t^{a-1} dt$$

dove:

$\Gamma()$  è la funzione gamma

$a = 0.25$

$b = (d/D_{max})/5.535$

con, rispettivamente per letto e tetto, per i percentili 85° e 95°:

$$d/D_{max} = 0.35 \cdot \exp(-0.091r)$$

$$d/D_{max} = 0.16 \cdot \exp(-0.137r)$$

Secondo Petersen et al. (2011), invece, la fagliazione secondaria aumenta esponenzialmente all'aumentare di  $m$  e diminuisce all'aumentare della distanza dalla faglia. Quindi, per caratterizzare la relazione tra l'entità delle dislocazioni  $d$  e la distanza  $r$  dalla faglia principale, in un ambiente trascorrente, sulla base di un'analisi multivariata, gli autori hanno individuato una funzione esponenziale nella forma  $d = ar^b$  che, trasformata in forma logaritmica e addizionata di un termine che esprima la dipendenza lineare dalla magnitudo  $m$ , diventa:

a. magnitudo – distanza:

$$\ln(d) = am + b \cdot \ln(r) + c$$

dove sulla base del database analizzato da Petersen et al. (2011):

$$a = 1.4016; b = - 0.1671 \text{ e } c = - 6.7991; \sigma_{\ln(d)} = 1.1193$$

b. valori di dislocazione normalizzati ( $d/D_{media}$ ):

$$\ln(d/D_{media}) = b \cdot \ln(r) + c$$

dove sulla base del database analizzato da Petersen et al. (2011):

$$b = - 0.1826; c = - 1.5471; \sigma_{\ln(d/D_{media})} = 1.1388$$

#### Riconoscimento e trattazione delle incertezze associate

Le correlazioni individuate per la definizione di  $P_{kn}(D>d/m,r,slip)$  sono generalmente deboli e l'individuazione delle funzioni per la descrizione delle distribuzioni deve essere attenta e preferibilmente basata sui dati raccolti nell'ambito geologico e sismotettonico considerato (es. Youngs et al., 2003; Petersen et al., 2011).

Inoltre è importante ricordare che, quando vengono utilizzate regressioni basate su dislocazioni normalizzate, devono essere combinate l'incertezza aleatoria dalle regressioni di tali valori normalizzati e quella dal calcolo del valore utilizzato per la normalizzazione ( $D_{media}$  e  $D_{max}$ ).

#### **4.4 Rappresentazione delle incertezze**

Una parte assolutamente fondamentale nelle analisi probabilistiche e, in generale, in ogni tipo di modellazione, è la presenza di una adeguata e quanto più esaustiva trattazione delle incertezze, che deve essere condotta parallelamente ai processi di calcolo in ogni loro fase.

È fondamentale che l'applicazione dell'analisi PFDHA preveda un trattamento esplicito delle incertezze. In particolare vengono riconosciute due principali tipologie di incertezza (e.g. Petersen et al., 2011) (Tab. 4.3):

- incertezza aleatoria: si riferisce alle incertezze dovute a variabili random che derivano direttamente dall'anisotropia dell'ambiente naturale, sia nello spazio che nel tempo;

- incertezza epistemica: è l'incertezza legata agli errori, alle imprecisioni e all'incompletezza dei database da cui vengono estrapolati i dati di input, dalle metodologie per la raccolta di tali dati all'origine, dalle imprecisioni nella mappatura
- delle faglie e dalle assunzioni fatte durante lo sviluppo dei modelli.

Indicazioni per l'applicazione

All'interno di un PFDHA la componente aleatoria dell'incertezza dovrebbe considerare e rappresentare la naturale variabilità dei parametri di *input* quali ad esempio la caratterizzazione (e quindi il modello descrittivo) della distribuzione temporale e spaziale dei terremoti su tutte le faglie potenzialmente in grado di causare rotture in corrispondenza del sito studiato (ad esempio anche una perfetta conoscenza dei campi di *stress* all'interno di una regione, non potrà permettere una previsione certa dell'ubicazione e della magnitudo di terremoti futuri) o la caratterizzazione della naturale variabilità dei potenziali punti di rottura in occasione di un terremoto, sia sulla struttura primaria che intorno ad essa. Questo tipo di analisi porterebbe ad avere come risultato un'unica curva di probabilità.

**Tabella 4.3.** Esempi di sorgenti di incertezza in un'analisi probabilistica

<b>Elemento nella procedura</b>	<b>Epistemica</b>	<b>Aleatoria</b>
<i>Modello</i>	<i>È il grado di affidabilità con cui può predire gli eventi. Può rappresentare la possibilità che un modello possa sistematicamente sovrastimare o sottostimare i risultati</i>	<i>È la variabilità non espressa da un modello. Ad esempio, può essere la variabilità attribuita alle componenti del processo fisico non modellati e rappresenta quindi la variabilità esistente tra le predizioni modellistiche e le osservazioni.</i>
<i>Parametro</i>	<i>È associata alla stima dei parametri del modello derivati dai dati disponibili, da misure indirette, etc.</i>	<i>Può essere dovuta a fattori che sono naturalmente variabili, ma che presentano un effetto sistematico sui risultati del modello.</i>

La curva di probabilità per la valutazione della pericolosità così definita non è in grado di esplicitare l'intera incertezza inclusa nella PFDHA mancando ogni considerazione della componente epistemica, ossia l'incertezza che deriva direttamente dalla conoscenza incompleta dei fenomeni e delle leggi che guidano i processi naturali, e che porta quindi alla definizione di modelli imprecisi per la rappresentazione della realtà. Quindi, l'incertezza

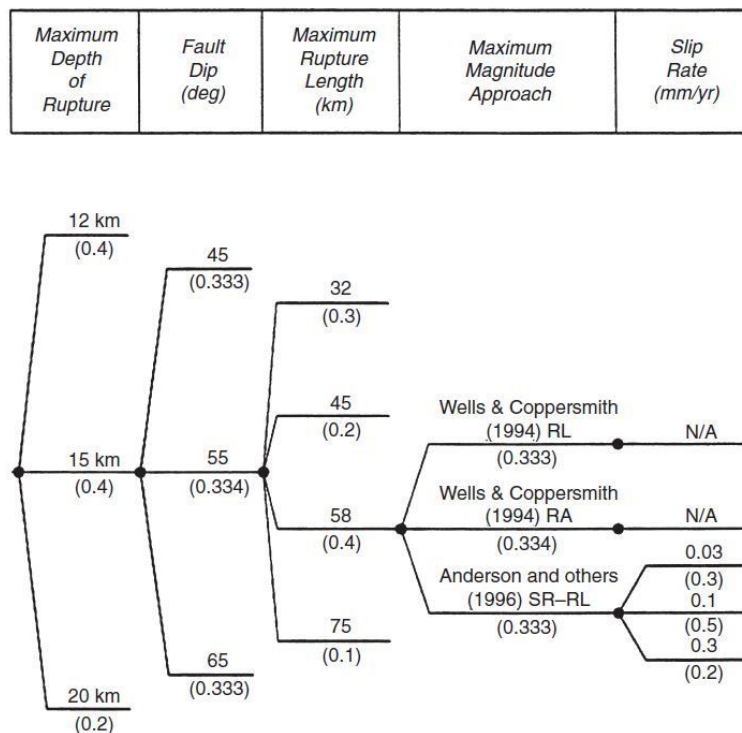
epistemica nasce dalle diverse assunzioni, dalle ipotesi dai modelli e dalle metodologie utilizzate per quantificare i parametri di *input*, portando a interpretazioni multiple che devono essere sempre esplicitate e propagate attraverso l'analisi e che portano ad avere risultati costituiti da un'insieme di curve di pericolosità ognuna caratterizzata da un peso, definito sulla base dell'affidabilità e della potenzialità di rappresentazione della realtà.

Il prodotto di una corretta valutazione dell'incertezza epistemica è costituito da serie di diversi *input* alternativi in ogni fase della PFDHA che permetta di definire l'intero ventaglio delle possibili, verosimili e tecnicamente difendibili interpretazioni della realtà (e quindi il 100% di probabilità che almeno una di esse si verifichi), rappresentabili ad esempio attraverso curve di pericolosità percentili (ANSI 2.30, 2015). Come anticipato, ognuna delle interpretazioni deve essere accompagnata da un peso, ossia un valore che esprima il suo grado di affidabilità e verosimiglianza. Tale valore viene comunemente esplicitato attraverso la costruzione di un albero logico, una metodologia che deriva direttamente dalla valutazione probabilistica del pericolo sismico (PSHA) (ad es. McCalpin, 2009). Con il termine albero logico si indica uno schema costituito da "rami" e "nodi" che descrivono le dipendenze tra i vari parametri inclusi in un processo di calcolo. La regola fondamentale per la costruzione di un albero logico è che i parametri che descrivono interamente o parzialmente una "causa" devono precedere quei parametri relativi all'"effetto"; ogni parametro nell'albero logico deve essere posizionato a seconda della sua dipendenza dagli altri parametri considerati, ad esempio lo *slip rate* dipende da parametri come la dislocazione per evento, che a sua volta dipende dalla magnitudo, che a sua volta dipende dalle caratteristiche geometriche della sorgente e così via. Da ogni nodo possono partire diversi rami (tipicamente da 2 a 5, McCalpin, 2009) che rappresentano le alternative considerate all'interno della PFDHA. Ad ogni ramo deve poi essere attribuito un peso (tipicamente con valori normalizzati compresi tra 0 e 1) sulla base del grado di affidabilità, accuratezza, dettaglio e di completezza dei dataset utilizzati, di precisione, influenza sui risultati, etc. dell'alternativa rappresentata, facendo in modo che la somma dei pesi attribuiti ad ogni alternativa per la definizione dello stesso parametro (ossia i diversi rami che si originano da uno stesso nodo) sia pari a 1, affinché le varie alternative coprano il 100% delle probabilità e quindi l'intero intervallo delle possibilità fisiche reali attese per quello specifico parametro (Fig. 4.5). Ognuno dei pesi definiti deve essere tecnicamente giustificato e documentato in modo appropriato.



È difficile definire delle linee guida univoche per l'assegnazione dei pesi poiché le decisioni non possono essere separate dall'applicazione specifica. Inoltre, i fattori da considerare nell'assegnazione dei pesi finali sono spesso numerosi; per questo motivo può essere necessario definire una gerarchia che tenga conto dell'influenza di ogni fattore sul peso finale e di conseguenza sui risultati, ad esempio sulla base di specifiche analisi di sensibilità, e un sistema chiaro e trasparente per la combinazione dei vari gradi della gerarchia nel peso finale (Bommer et al., 2005).

In generale, i pesi vengono combinati nel modo migliore attraverso la moltiplicazione così che pesi con valori molto bassi o pari a 0 vengono eliminati e non influenzano i risultati poiché costituiscono modelli considerati poco affidabili.



**Figura 4.5.** Rappresentazione parziale della struttura di un albero logico (modificato da McCalpin, 2009)

La procedura seguita per la definizione dei pesi deve essere trasparente e riproducibile, sia per facilitare le revisioni degli studi sia per permettere un semplice aggiornamento dei pesi qualora nuovi dati concorrano a rafforzare o a indebolire una delle alternative.

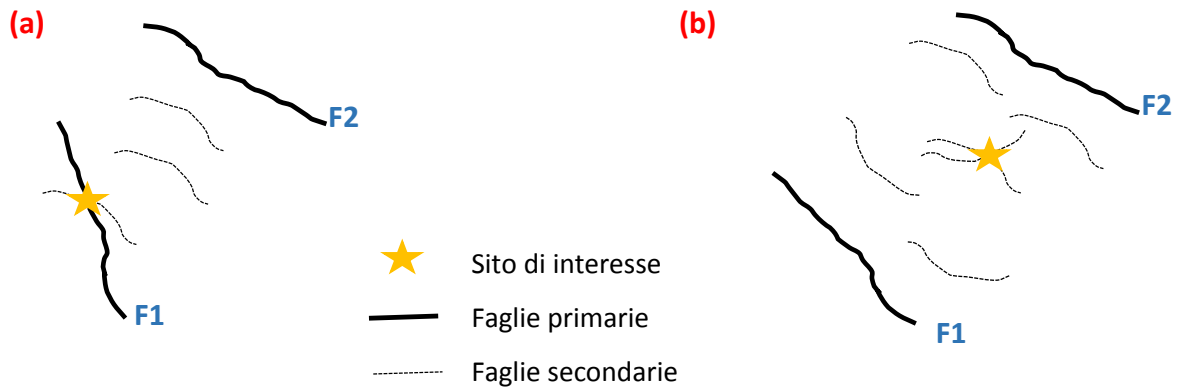
Per ogni ramo aggiunto la quantità di calcoli può aumentare in modo esponenziale: per questo motivo si consiglia di non aggiungere rami con differenze molto piccole tra le alternative che rappresentano.

In alcuni casi si possono incontrare difficoltà nel distinguere se un'incertezza può essere considerata aleatoria o epistemica: ad esempio, l'inclusione di rami alternativi rappresentanti differenti profondità focali, con i pesi assegnati sulla base delle distribuzioni delle profondità degli ipocentri riportate nei cataloghi sismici, non coincide pienamente con gli scopi della metodologia dell'albero logico, poiché la distribuzione delle profondità dei terremoti rappresenta una variabilità aleatoria e deve quindi essere inclusa nei calcoli (Bommer et al., 2005).

#### **4.5 Rappresentazione dei risultati**

Le procedure descritte nei capitoli precedenti conducono alla quantificazione della pericolosità di fagliazione superficiale espressa come la distribuzione delle probabilità per cui, in un dato periodo di tempo, al sito si verifichi una dislocazione di entità superiore ad un valore prestabilito in seguito ad un terremoto generato dalla stessa faglia che sperimenta la dislocazione o da un'altra faglia, anche distante, in grado di provocare rotture su strutture presenti al sito.

I calcoli per la valutazione della pericolosità devono essere condotti seguendo tutte le possibili alternative dell'albero logico che porteranno alla generazione di numerose curve di pericolosità, ognuna caratterizzata da un peso associato derivato dalla combinazione dei singoli pesi attribuiti ai vari passaggi e dalla gerarchia definita per ogni parametro e modello (vedi § 4.4). Le curve vengono poi normalmente sommate e combinate tra loro al fine di ottenerne una, tipicamente definita come la curva media o mediana che deve esprimere la probabilità annuale di eccedenza totale, ossia comprendente sia la componente derivante dalla fagliazione primaria che da quella secondaria (Fig. 4.6).



**Figura 4.6.** Rappresentazione schematica delle componenti da considerare per la definizione di curve di eccedenza rappresentanti la pericolosità totale. Nel caso (a), in cui il sito di interesse è posizionato lungo la faglia sismogenica F1, la probabilità di eccedenza annuale totale è data dalla somma della probabilità associata alla fagliazione primaria in seguito all'attività di F1 e fagliazione secondaria in seguito all'attività di F2. Nel caso (b) invece il sito si trova al di fuori delle tracce delle due sorgenti sismogeniche che e la probabilità di eccedenza annuale totale è data dalla somma della probabilità associata alla fagliazione secondaria che può verificarsi in seguito all'attività di F1 e di F2 (modificato da Takao et al., 2013).

I risultati ottenuti possono essere espressi in diverse forme, a seconda delle finalità di applicazione, ad esempio per fini ingegneristici di progettazione, per questioni normative o di pianificazione del territorio o per particolari valutazioni di sicurezza, come possono essere le analisi di sicurezza in caso di impianti nucleari.

Di seguito vengono elencate e descritte brevemente alcune delle forme per la presentazione dei risultati di una PFDHA (ad es. Youngs et al., 2003; ANSI 2.30, 2015, Petersen et al., 2011).

#### Curve di pericolosità media

Si tratta di curve rappresentanti la media aritmetica di tutto l'insieme di curve di pericolosità generate all'interno del processo di PFDHA che comprenda l'incertezza nella conoscenza dei processi che governano la rottura di faglia.

#### Curve dei percentili

Tramite questa tipologia di rappresentazione, simile a quella della PSHA, la pericolosità è rappresentata in termini di curve percentili, ossia curve al di sotto delle quali, sulla base dello stato delle conoscenze, si ha la certezza che sia compreso il valore reale di pericolosità. Ad esempio si ha il 50% di probabilità che il valore reale della pericolosità sia al di sotto o al di sopra del 50° percentile, o c'è il 95% di probabilità che si trovi al di sotto del 95° percentile,

sempre considerando il livello dello stato delle conoscenze. Le curve percentili dovrebbero essere sempre plottate perché risultano un ottimo mezzo per mostrare l'aumento della pericolosità dovuto all'incertezza nella caratterizzazione dei modelli di calcolo.

Valori di dislocazione con una data probabilità di eccedenza

Vengono rappresentati i valori medi e i percentili di dislocazione con una data probabilità di eccedenza comunemente con l'utilizzo di un modello di probabilità di Poisson per cui, in corrispondenza del sito la probabilità che, in seguito ai terremoti che possono avvenire su ogni sorgente sismogenica della regione, la dislocazione  $D$  superi il valore di dislocazione  $D_0$  in uno specifico periodo di tempo  $T$  è data da:

$$P(D > D_0) = 1.0 - e^{-\lambda(z)T}$$

dove:

$\lambda(z)$  è la frequenza media durante il periodo  $T$  ed è costituita dai risultati della PFDHA per fagliazione primaria e secondaria

$D$  comprende i contributi sia della fagliazione primaria che di quella secondaria;

Disaggregazione per scenari

La disaggregazione della pericolosità sismica (ad es. Bazzurro and Cornell, 1999) è un'operazione che consente di valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito. Infatti, la curva di pericolosità fornisce gli effetti combinati di tutte le magnitudo e distanze sulla probabilità di eccedenza e poiché tutte le sorgenti le magnitudo e le distanze considerate sono combinate tra loro, è difficile avere una comprensione intuitiva, basata unicamente sull'osservazione della curva, di cosa stia realmente controllando la pericolosità. Per individuare quali siano gli eventi che hanno una maggiore influenza sulla pericolosità, la curva deve essere scomposta nei suoi contributi da differenti scenari.

In una valutazione della pericolosità vengono però considerati un gran numero di scenari; per ridurre questo numero a una quantità maneggiabile, gli scenari considerati simili vengono raggruppati ed è di fondamentale importanza definire in modo dettagliato quali sono i fattori che influenzano i criteri di similitudine stabiliti.

La forma più comune di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza che permette di definire il contributo di sorgenti sismogeniche caratterizzate da specifici intervalli di magnitudo-distanza (*bins*), all'interno della pericolosità totale. Lo scenario dominante può essere caratterizzato attraverso una media delle disaggregazioni, in termini di media

matematica o moda. I valori medi di magnitudo e distanze sono definiti come le medie pesate sulla base dei pesi dati dal processo di disaggregazione. La media ha il vantaggio di poter essere definita in modo univoco ed è semplice da calcolare, ma può fornire un valore che non corrisponde ad uno scenario realistico. La moda invece può essere considerato il valore più verosimile. È data dal gruppo di scenari che ha il più grande valore di disaggregazione. La moda ha il vantaggio di corrispondere sempre ad uno scenario realistico ma dipende da un raggruppamento di scenari, perciò non può essere considerata robusta.

È utile plottare sia le disaggregazioni M-R che la media M-R e la deviazione standard associata che rappresenta la variabilità delle coppie M-R

#### *Disaggregazione per sorgenti sismogeniche:*

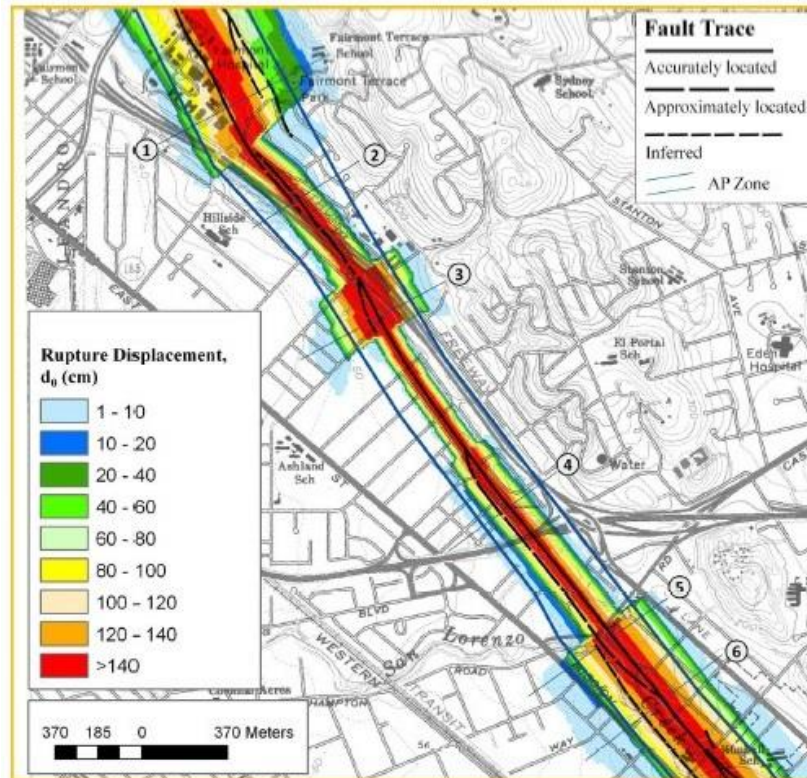
Per i siti potenzialmente soggetti agli effetti di più sorgenti sismiche, la pericolosità totale di dislocazione al sito sarà costituita dalla somma dei contributi di ogni sorgente individuale, ma potrebbe essere più utile la definizione delle curve di pericolosità specifiche per ognuna di queste sorgenti.

#### *Dislocazione relativa al terremoto di progetto*

Per l'applicazione ingegneristica in fase di progettazione potrebbe essere necessario valutare la pericolosità da fagliazione superficiale derivante solo dal terremoto (o dai pochi terremoti) identificato come il "terremoto di progetto". In questo caso, all'interno della PFDHA, può essere eliminata l'integrazione della dipendenza dalla magnitudo e il termine che descrive il tasso di attività essere sostituito con il valore relativo al "terremoto di progetto" (ANSI 2.30, 2015).

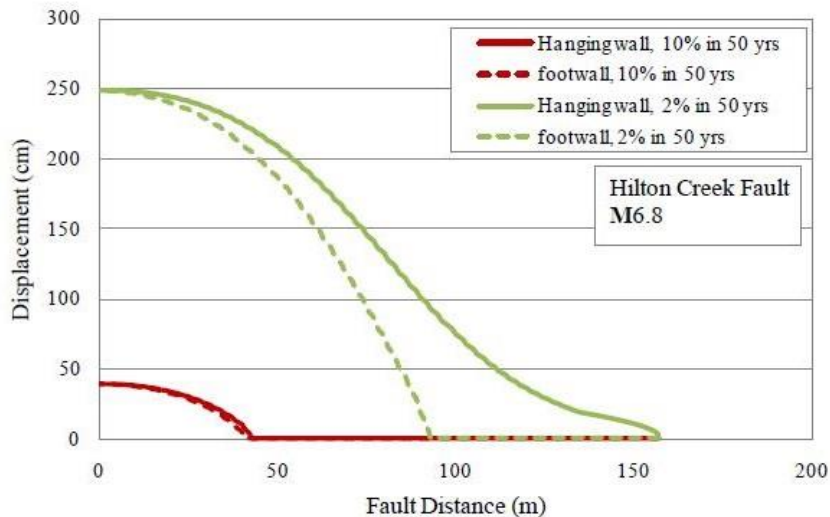
#### *Realizzazione della cartografia*

La rappresentazione su base cartografica dei risultati della PFDHA deve basarsi sulla definizione di una serie di profili trasversali (Fig. 3.4) in cui plottare i valori calcolati nella forma di interesse (ad es. Fig. 4.7). Questa tipologia di rappresentazione può essere ad esempio molto utile per finalità normative o di pianificazione del territorio.



**Figura 4.7.** Esempio di carta della pericolosità da fagliazione in cui sono rappresentati i valori con 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni (Chen et al., 2013)

La rappresentazione cartografica rispecchia le modalità con cui viene considerata l'incertezza della localizzazione delle rotture nella PFDHA e quindi attraverso una distribuzione centrata sulla faglia mappata in cui i valori di dislocazione calcolata perpendicolarmente alla struttura mostrano un profilo a campana attorno alla traccia mappata, invece che un profilo con un picco sulla faglia primaria come accade nelle valutazioni deterministiche (Chen et al., 2014). In particolare, nel caso della fagliazione trascorrente il profilo può essere considerato simmetrico rispetto alla rottura principale, mentre nel caso della fagliazione normale o inversa i profili della quantità delle dislocazioni sono asimmetrici, poiché la dislocazione è maggiore e si attenua più lentamente sul tetto rispetto al letto (ad es. Fig. 4.8), ed il grado di simmetria nel profilo è dato dal contributo della fagliazione secondaria.



**Figura 4.8.** Esempio di rappresentazione del profilo trasversale tipico di una faglia normale (Chen et al., 2014)

#### 4.6 Definizione della pericolosità da fagliazione superficiale al sito

L'ultima fase di una valutazione del potenziale di fagliazione superficiale in un dato sito deve prevedere il percorso decisionale, effettuato normalmente da parte dell'organismo di controllo, per la definizione del reale livello di pericolosità presente (Fig. 4.9). Di seguito viene proposto, in termini generali, un approccio, ispirato a quello presentato nello standard ANSI/ANS – 2.30 (2015) per portare a termine il percorso decisionale relativamente alla fattibilità di un'opera ingegneristica in un sito prescelto sulla base della definizione della pericolosità derivante da fagliazione superficiale.

L'approccio si basa su una procedura a 6 livelli consecutivi caratterizzati da domande rappresentanti gradi di pericolosità potenzialmente crescenti (Fig. 4.9).

La prima determinazione dipende dal fatto che il sito si trovi o non si trovi in un'area che potrebbe sperimentare fagliazione superficiale, sia primaria che secondaria: nel caso in cui il sito sia posizionato lontano da ogni potenziale rottura, allora può essere considerato accettabile dal punto di vista della pericolosità da fagliazione superficiale (livello 1).

Una fondamentale decisione deve riguardare la definizione delle distanze, tra le costruzioni e strutture primarie o secondarie, che possono essere considerate sicure, poiché le fasi successive dell'approccio qui illustrato si basano su tali valori.



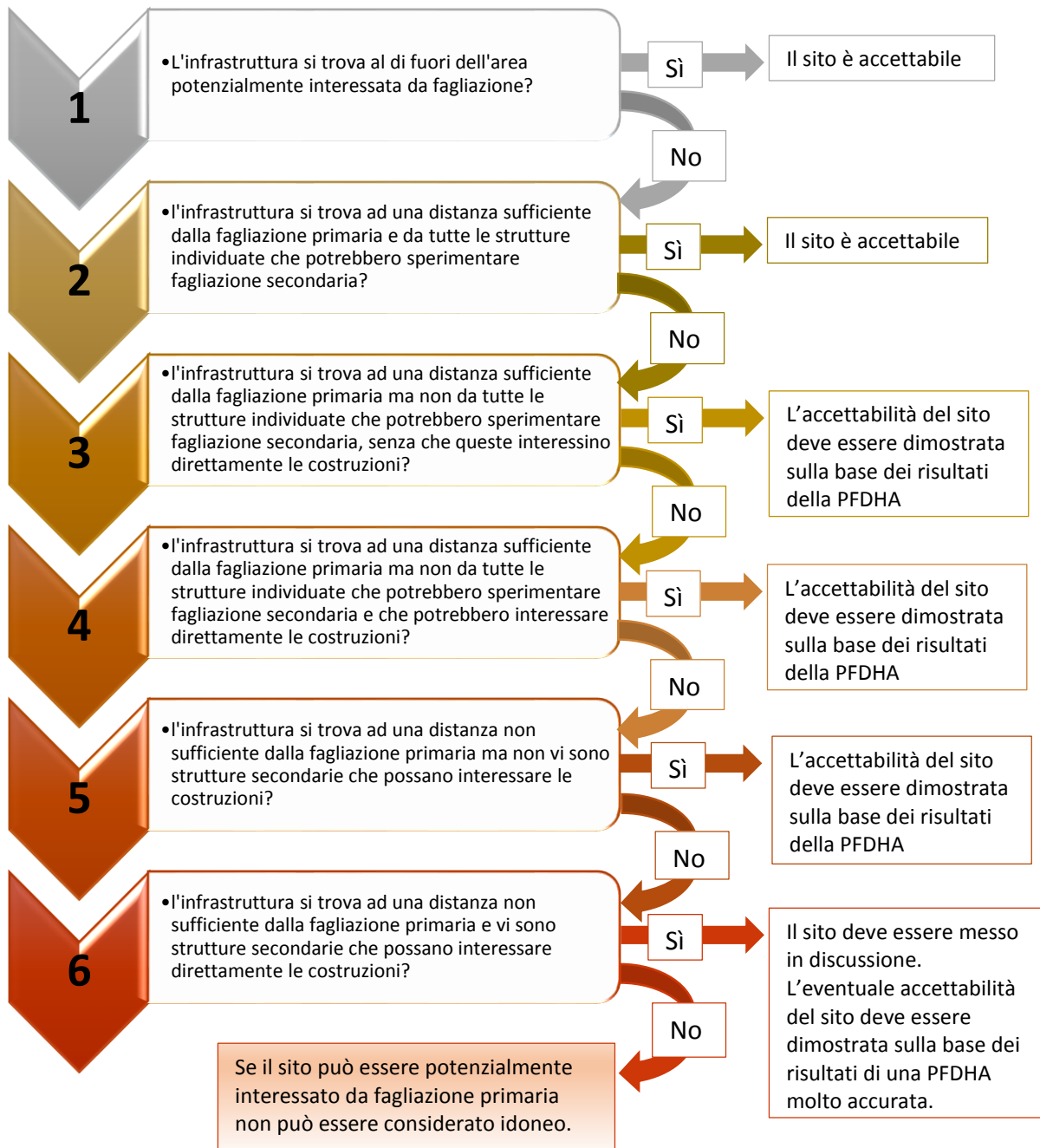


Figura 4.9. Proposta di approccio per la definizione della pericolosità al sito

Negli *step* iniziali una risposta affermativa determina l'accettabilità del sito perché la probabilità che si verifichi qualche rottura in superficie risulta sufficientemente bassa, e potrebbero potenzialmente essere sufficienti le analisi indicate nella fase iniziale riportata in figura 4.10. Nelle fasi seguenti, invece, ogni risposta affermativa deve essere basata e dimostrata dai risultati ottenuti attraverso l'applicazione di una quanto più completa e accurata PFDHA, e che possa supportare l'assunzione di una bassa probabilità di occorrenza di fagliazione superficiale. I livelli successivi al 4 rappresentano situazioni in cui la probabilità



di avere rotture al sito non è sufficientemente bassa da poter essere trascurata; in questi casi la PFDHA deve essere costruita partendo da indagini di caratterizzazione di dettaglio non solo del sito in analisi ma su aree più vaste, da definire a seconda della complessità dell'ambiente geologico. In generale, un sito che in fase di caratterizzazione presentasse evidenze di fagliazione superficiale recente, non dovrebbe essere considerato accettabile e l'infrastruttura dovrebbe essere localizzata altrove. Questo non è tuttavia sempre possibile; nel caso di alcune tipologie di infrastrutture, come ad esempio oleodotti, gasdotti, acquedotti, etc., non è possibile evitare totalmente strutture capaci e si deve procedere affinché le soluzioni progettuali siano sensibili alla quantità di dislocazione (ad es. Sorensen et al., 2003). In questi casi o, nei casi in cui si volesse dimostrare che la probabilità di future rotture superficiali sia accettabilmente bassa, una PFDHA potrebbe essere uno dei metodi più adatti per fornire le basi su cui definire i criteri di accettabilità del sito relativamente alla pericolosità da fagliazione superficiale (ANSI, 2015). I risultati delle indagini devono documentare la presenza o l'assenza di rotture superficiali al sito, in particolare nei casi in cui le analisi portino a concludere che la pericolosità sia trascurabile (SSG-9 - IAEA, 2010).

In generale è importante specificare che, in ogni caso, i siti da preferire per la realizzazione di opere sono quelli caratterizzati da una minima probabilità di presenza di potenziale fagliazione superficiale e di strutture in grado di produrre terremoti nelle immediate vicinanze del sito (ad es. entro 5 o 10 km). Quindi a causa delle incertezze e delle difficoltà nel mitigare gli effetti delle deformazioni permanenti del terreno, in presenza di deformazioni superficiali o poco profonde databili al Quaternario o al Tardo Pleistocene nelle regioni tettonicamente attive, o considerando finestre temporali più ampie (nell'ordine delle centinaia di migliaia di anni) nel caso ad esempio di regioni continentali stabili, la decisione più prudente è quella di selezionare un sito alternativo. In alternativa si può cercare di dimostrare l'accettabilità o la non accettabilità del sito attraverso una PFDHA.

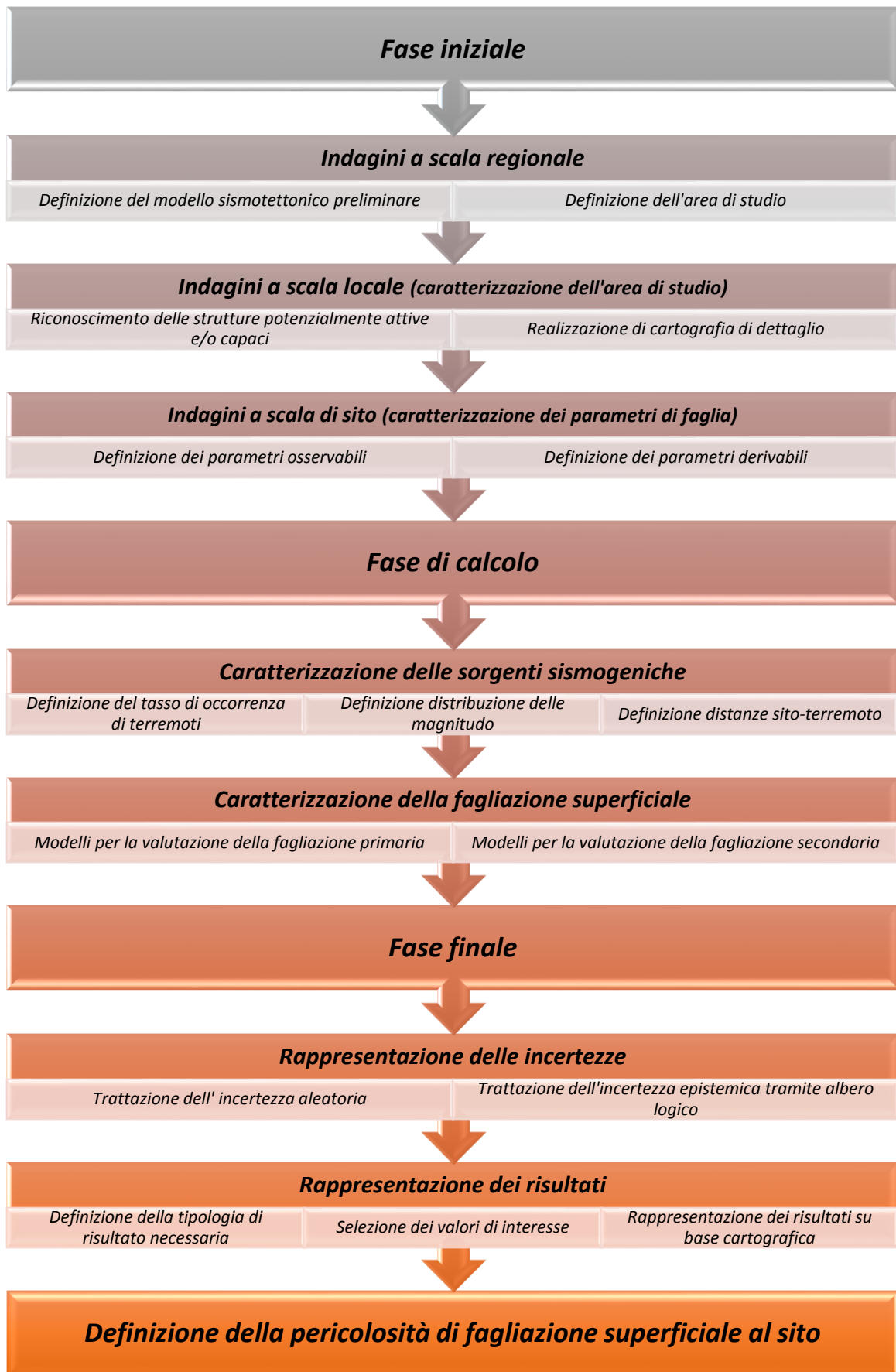


Figura 4.10. Schema riassuntivo della procedura per la definizione della pericolosità di fagliazione

## **5 Caso studio: la faglia di Paganica**

Gli elementi più importanti di una PFDHA sono i modelli che descrivono le distribuzioni delle probabilità per la caratterizzazione della fagliazione superficiale, ossia la probabilità che occorrono rotture a una certa distanza dalla faglia primaria in seguito ad un terremoto di una certa magnitudo e la probabilità con cui si distribuiscono i valori di dislocazione alle diverse distanze e che tali dislocazioni superino un dato valore di interesse stabilito. Tali modelli devono essere sviluppati sulla base di insiemi di dati empirici e sono quindi fortemente dipendenti dalle caratteristiche fisiche delle strutture sismogeniche a cui i dati fanno riferimento e all'ambiente fisico in cui esse si trovano. Inoltre, i dati di fagliazione superficiale, come ad esempio la mappatura delle rotture e le quantità di dislocazione, in passato, in occasione dei rilievi in seguito a eventi sismici, spesso non sono stati registrati in modo sistematico; inoltre, soprattutto in contesti tettonici caratterizzati da terremoti con magnitudo non troppo elevata e tempi di ritorno anche molto lunghi, come ad esempio l'Italia, le dislocazioni sono spesso limitate e effetti sulla superficie causati da terremoti antichi non si conservano.

Ciò è particolarmente vero per quanto riguarda la fagliazione superficiale lungo strutture secondarie, che spesso presenta valori di dislocazione compresi entro poche decine di centimetri ed è un fenomeno fino ad oggi poco considerato nei rilievi post-evento. Questo ha portato ad avere database molto limitati e statisticamente poco robusti su cui sviluppare i modelli statistici per la considerazione di tale fenomeno ai fini della valutazione della pericolosità totale da fagliazione superficiale in un sito. Inoltre, poiché una delle finalità del presente lavoro è la valutazione preliminare dell'applicabilità della PFDHA all'interno di un processo di localizzazione e caratterizzazione di un sito per la realizzazione di un'infrastruttura considerata critica e rilevante, e in particolare per quanto riguarda il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi, e poiché per tale caso particolare la componente che potrebbe maggiormente interessare la pericolosità al sito sono le rotture lungo strutture diverse dalla sorgente sismogenica e distanti da essa, le analisi riportate all'interno di questo capitolo si concentrano proprio sulla valutazione dei modelli per la valutazione della probabilità di fagliazione secondaria.

Per potere procedere ad una valutazione basata sul confronto con dati reali italiani è stata scelta la Faglia di Paganica, ed in particolare i dati derivanti dai rilievi eseguiti in seguito al terremoto di  $M_w$  6.3 avvenuto il 6 aprile 2009 a L'Aquila, poiché al momento risulta essere

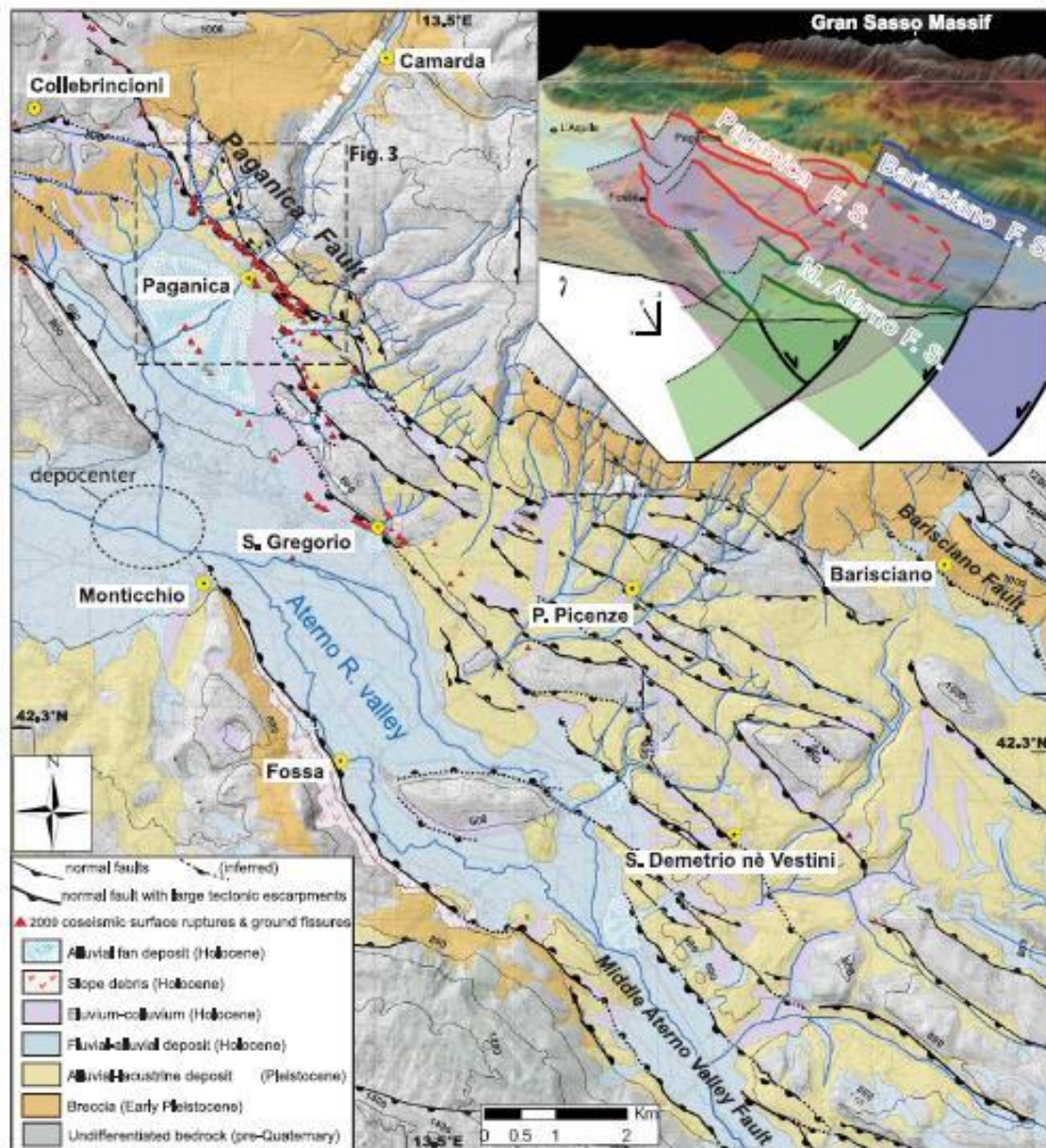
l'evento per cui è stata condotta la più completa caratterizzazione della fagliazione superficiale, sia primaria che secondaria (ad es. EMERGEO, 2010; Guerrieri et al., 2011; Vittori et al., 2011; Boncio et al., 2012).

L'oggetto dell'analisi presentata all'interno di questo capitolo riguarda quindi la valutazione delle modalità utilizzate per la caratterizzazione di una faglia primaria rispetto alla sua capacità di provocare dislocazione secondaria secondo un approccio probabilistico. Infatti, questa applicazione mira principalmente ad un confronto tra i modelli utilizzabili in un ambiente distensivo (Youngs et al., 2003), come quello a cui appartiene la faglia di Paganica, e ciò che è stato realmente rilevato per valutare, seppure in modo preliminare e riferito ad un singolo terremoto, in questo caso specifico, la capacità rappresentativa dei modelli ad oggi presenti in letteratura per una reale valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale presente in un sito.

### **5.1 La Faglia di Paganica**

La Faglia di Paganica è stata individuata come la struttura causativa dell'evento del 6 aprile 2009 che ha causato più di 300 vittime e danni ingenti alle strutture. Si tratta di una faglia normale a direzione NO - SE e fa parte di uno dei sistemi di strutture che, dal tardo Pliocene, controllano l'intensa tettonica estensiva che ha portato alla formazione di bacini intramontani lungo la catena degli Appennini; in particolare, insieme alle faglie antitetiche che bordano la valle dell'Aterno, va a costituire il *graben* che controlla il depocentro olocenico in cui si trova la città de L'Aquila (Cinti et al., 2011) (Fig. 5.1).

In superficie, il sistema Faglia di Paganica - San Demetrio risulta abbastanza complesso poichè caratterizzato dalla presenza di molte tracce sovrapposte con andamento simile e frequentemente arrangiate in sequenze quasi frattali di *horsts* e *grabens* di dimensioni variabili. Osservando le caratteristiche spaziali della fagliazione in superficie, sulla base dei differenti assetti strutturali si possono distinguere due zone: lungo la porzione nord tra Collebrincioni e Paganica, la deformazione è localizzata su poche tracce vicine entro un'ampiezza di circa 1 km. Nel settore sud l'arrangiamento strutturale diventa più complesso, la deformazione sembra essere accomodata da molte strutture tettoniche lungo un insieme di tracce di faglia parallele tra loro distanti anche alcuni chilometri (Cinti et al., 2011).



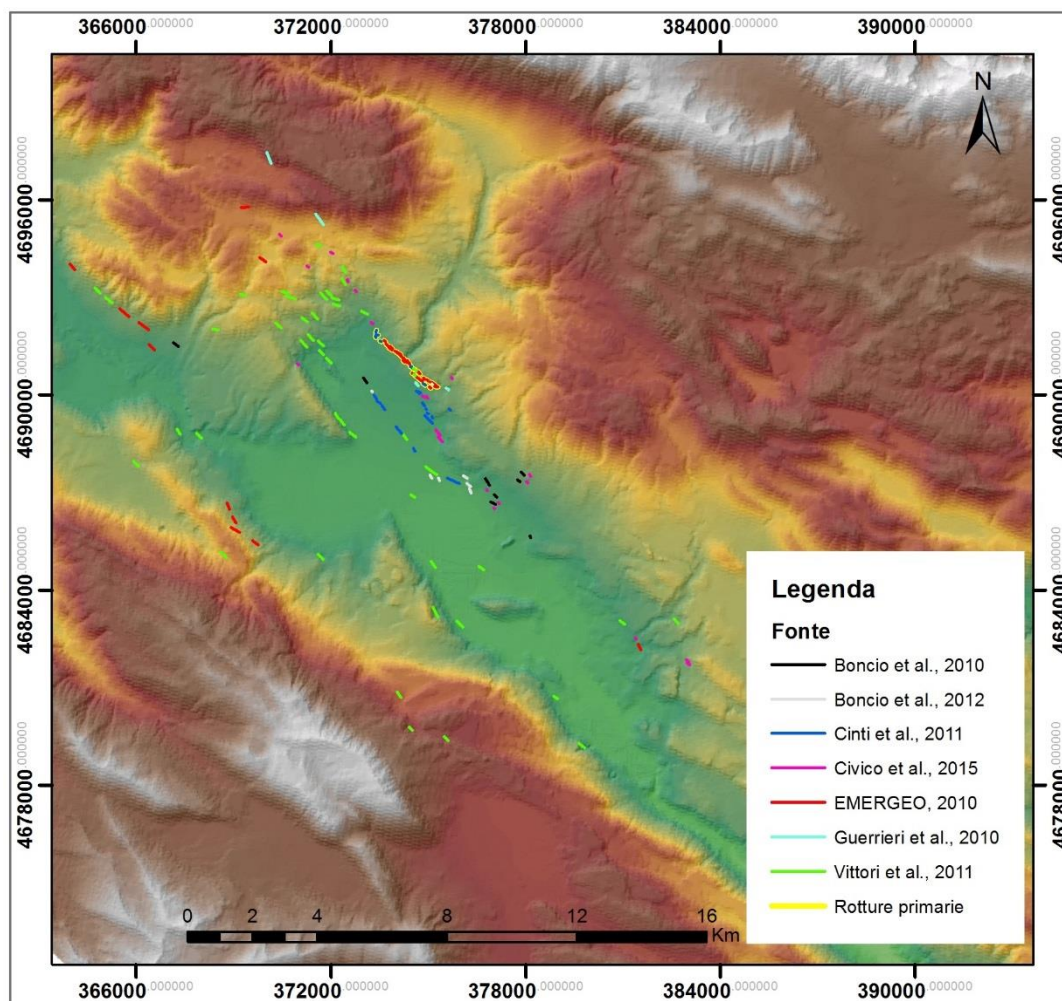
**Figura 5.1.** *Faglie normali attive e depositi Quaternari della media valle del fiume Aterno (Cinti et al., 2011)*

## 5.2 Caratterizzazione della fagliazione superficiale

In seguito all'evento di magnitudo  $M_w$  6.3 del 2009 sono state osservate rotture cosismiche pressoché continue per quasi 3 km con una dislocazione massima di circa 15 cm (ad es. Civico et al., 2015; Vittori et al., 2011) e concentrate in una fascia limitata lungo la porzione più settentrionale della struttura, soprattutto in corrispondenza dell'abitato di Paganica (L'Aquila) (Fig. 5.1) riconducibili a fagliazione primaria, e una serie di rotture discontinue fino ad una distanza di circa 12 km soprattutto nell'area corrispondente al tetto della faglia, che possono essere considerate fagliazione secondaria.

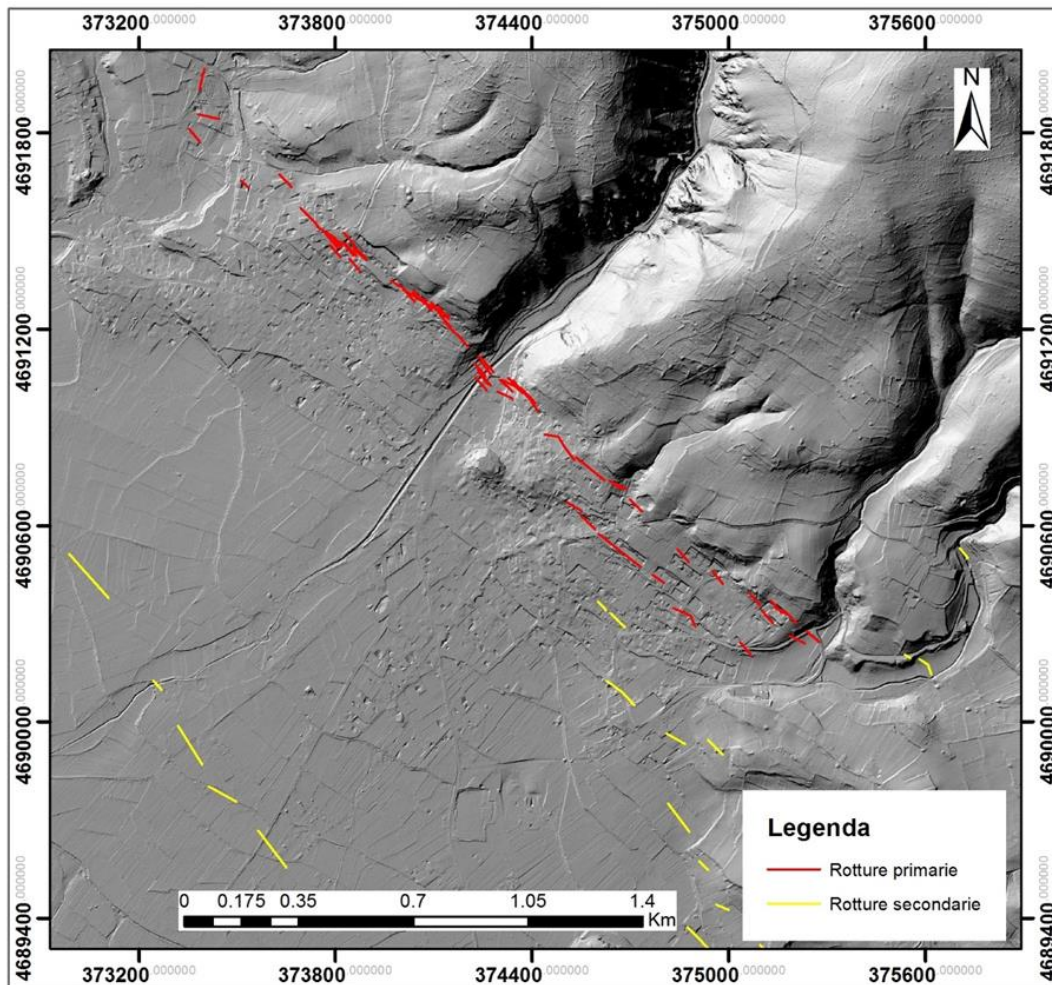


Sulla base dei soli dati disponibili in letteratura relativi all'evento del 2009, sono state quindi digitalizzate ed analizzate in ambiente GIS le rotture primarie e secondarie rilevate dopo il terremoto (Fig. 5.2) con lo scopo di effettuare dei confronti con i modelli per la caratterizzazione della fagliazione superficiale all'interno di una PFDHA presenti in letteratura, che nel caso di faglie normali sono quelli presentati in Youngs et al. (2003).



**Figura 5.2.** Fagliazione primaria e secondaria considerata

I dati originali e il lavoro di digitalizzazione eseguito per questa tesi sono entrambi basati sul modello digitale del terreno (*DTM – Digital Terrain Model*) con risoluzione a 1 m (Fig. 5.3) ricavato ed elaborato a partire dai dati *LiDAR* a risoluzione submetrica disponibili per l'area considerata, raccolti e processati pochi giorni dopo l'evento del 2009 dalla Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia; per questo motivo, l'errore cartografico può essere considerato limitato.



**Figura 5.3.** Ingrandimento dell'area del comune di Paganica (la base cartografica e l'Hillshade ricavato dal DTM a 1 m, fornito da INGV)

### 5.2.1 Fagliazione secondaria

Per l'individuazione delle rotture considerabili come fagliazione secondaria, si è tenuta in considerazione la definizione data da Youngs et al. (2003) che considera sia le rotture superficiali avvenute in seguito a movimenti innescati su altre faglie, sia rotture avvenute lungo altri piani di debolezza crostale.

Nelle analisi condotte i dati utilizzati per il calcolo della probabilità di avere rotture sono più numerosi perché da quanto riportato in letteratura non è stato possibile attribuire un valore di dislocazione ad ognuna delle rotture su strutture secondarie riportate nelle carte.

#### 5.2.1.1 Probabilità di rottura

Per la valutazione della probabilità di avere rotture su strutture secondarie ad una data distanza  $r$  in seguito ad un terremoto di magnitudo  $m$ , è stato seguito il metodo proposto da Youngs et al. (2003) e ripreso da Petersen et al. (2011), basato sulla cartografia.



Innanzitutto è stata definita, sulla base delle rotture riportate in letteratura, un'area di circa 12 km di raggio, attraverso lo strumento *Buffer* di *ArcGIS*, centrata sulla traccia delle rotture primarie registrate in superficie che contenga al suo interno tutte le tracce relative alla fagliazione secondaria (Fig. 5.4).

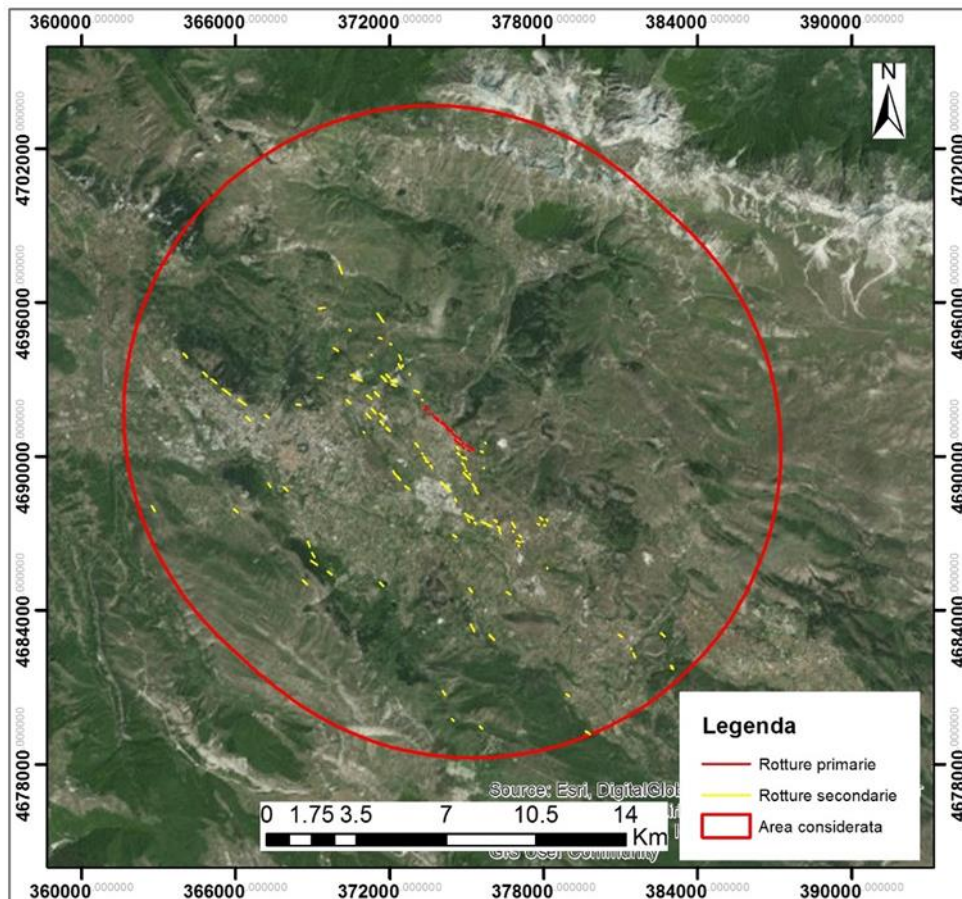


Figura 5.4. Area considerata per la valutazione della probabilità di rottura

Il file contenente il poligono formatosi dall'applicazione dello strumento *Buffer* è stato poi convertito dal formato *shapefile* al formato *raster*, così da permettere la suddivisione dell'area di studio in celle di dimensione predefinita, in questo caso *pixel*, per il successivo calcolo della probabilità. Infine, attraverso lo strumento *GIS Extract by Mask* sono stati individuati i *pixel* contenenti rotture e, secondo incrementi della distanza pari alle dimensioni dei *pixel*, è stata valutata la probabilità di rottura esprimendola come:

$$P = \frac{\text{pixel contenenti rottura}}{\text{pixel totali}}$$

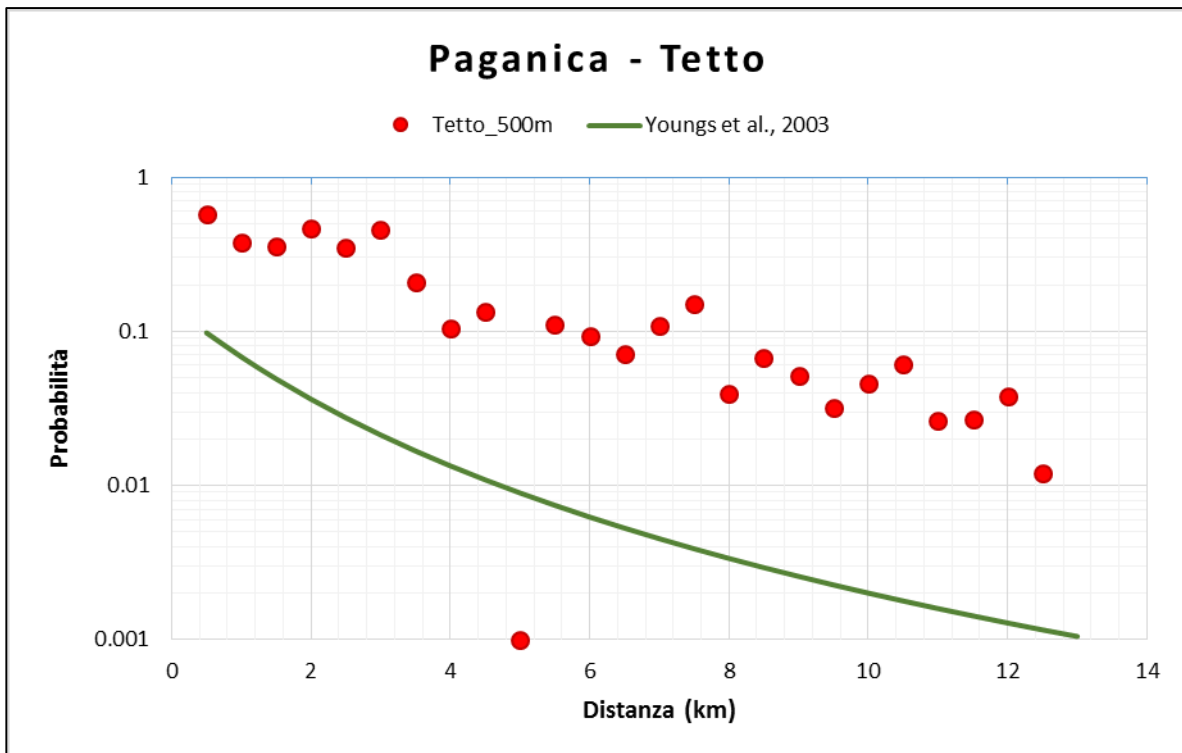
Il procedimento di calcolo è stato applicato separatamente sulla porzione dell'area riconoscibile come tetto della faglia e su quella identificabile come letto. Nella figura 5.5 sono riportati i

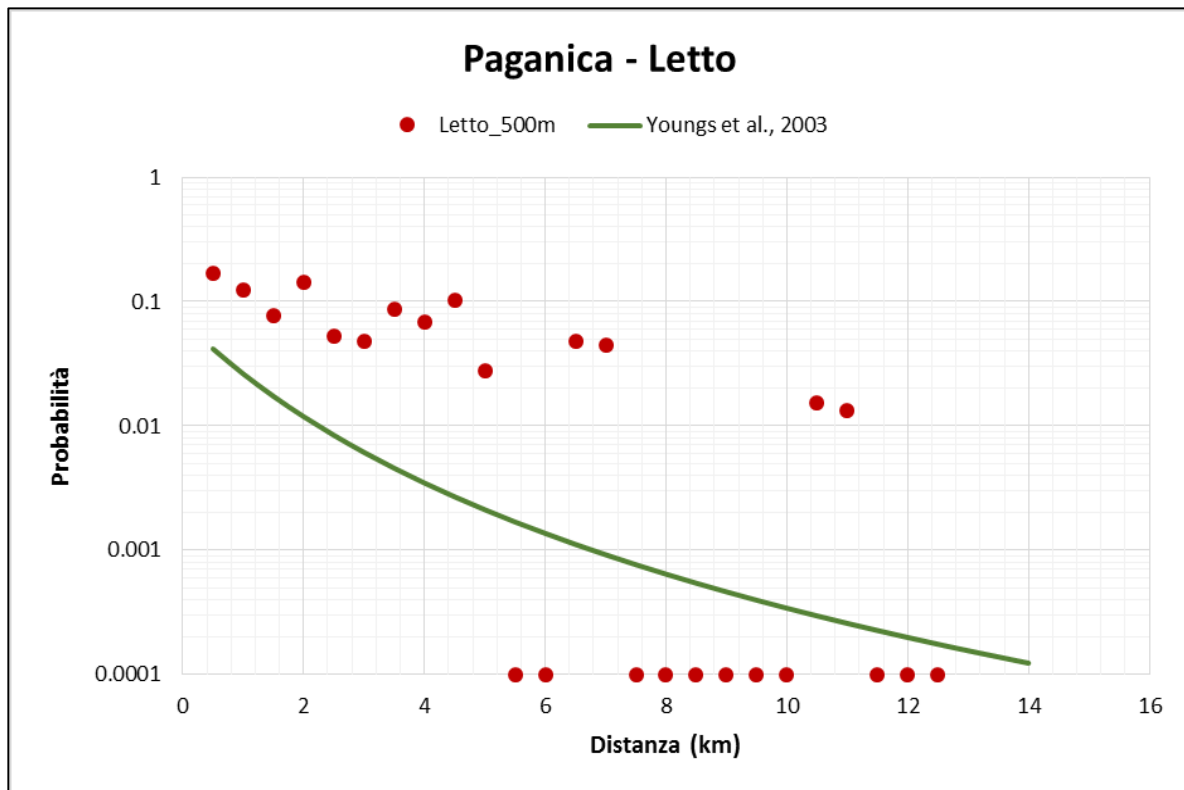


dati di probabilità ottenuti dall'analisi delle rotture reali sperimentate in seguito al terremoto del 2009 di magnitudo  $M_w$  6.3 valutati su celle di 0.5 x 0.5 km e la curva derivata dalla funzione di regressione logistica proposta da Youngs et al. (2003), calcolata sempre per magnitudo 6.3 (derivata anch'essa da analisi con celle 0.5 x 0.5 km):

$$P = \frac{e^{2.06 \cdot (-4.62 + 0.118m + 0.629h) \cdot \ln(r + 3.32)}}{1 + e^{2.06 \cdot (-4.62 + 0.118m + 0.629h) \cdot \ln(r + 3.32)}}$$

con  $m = 6.3$ ,  $h = 1$  per il tetto e  $h = 0$  per il letto e  $r$  è il valore incrementale di distanza dalla faglia primaria.

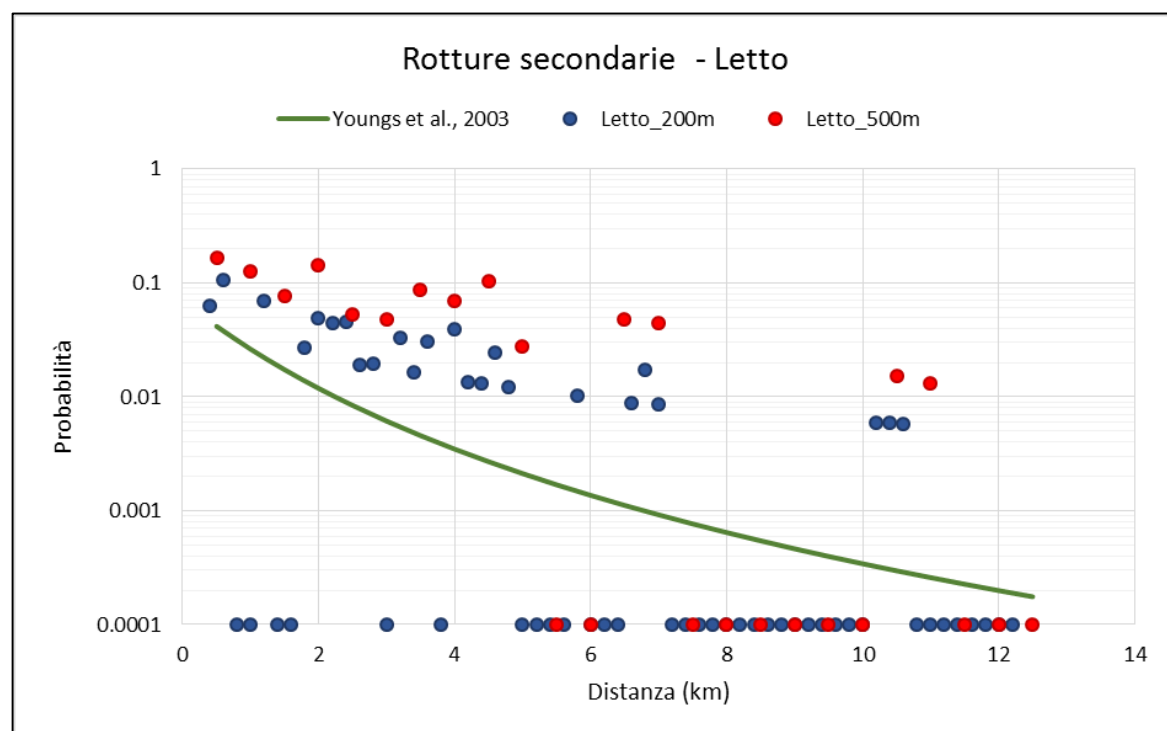
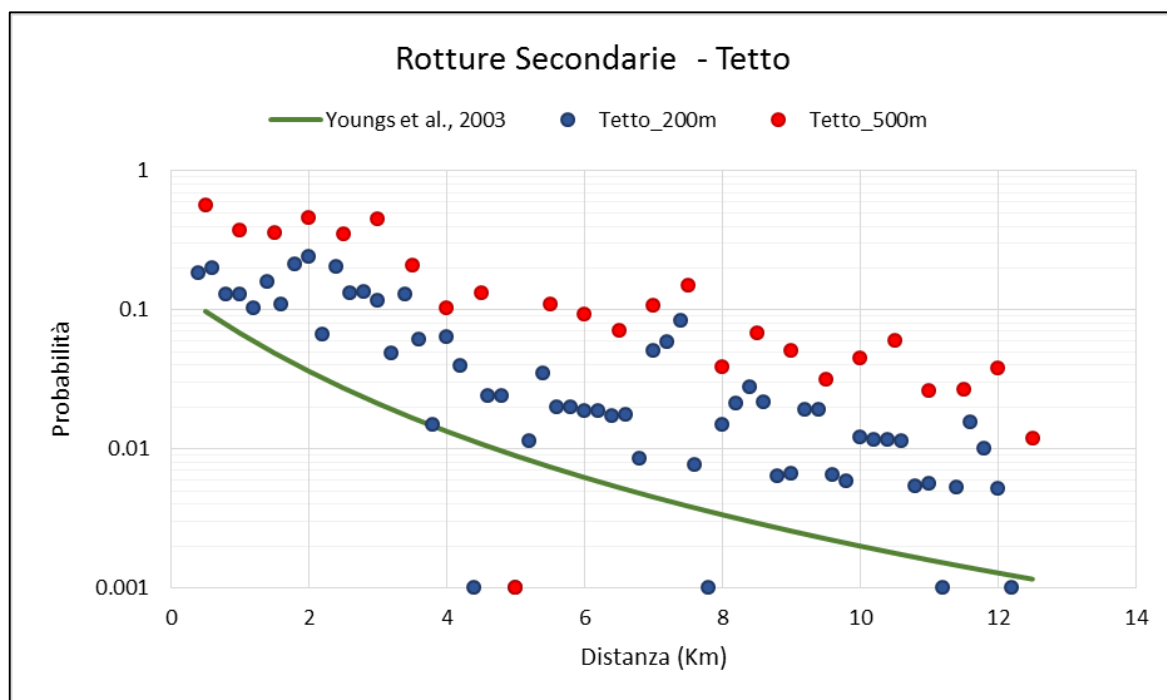




**Figura 5.5.** Confronto tra la curva proposta in Youngs et al. (2003), calcolata su magnitudo 6.3, e i dati reali relativi ad un terremoto di magnitudo 6.3 sulla Faglia di Paganica. I punti allineati nella parte bassa dei grafici corrispondono a distanze dove non è stata registrata la presenza di rotture.

Dall'osservazione dei grafici riportati in figura 5.5 è riconoscibile una tendenza alla diminuzione della probabilità di avere rotture su strutture secondarie all'aumentare della distanza dalla sorgente sismogenica. Il grafico mostra che per magnitudo 6.3 il modello di Youngs et al. (2003) sottostima la probabilità di avere rotture superficiali a tutte le distanze considerate.

Un'ulteriore considerazione deve riguardare la definizione delle dimensioni delle celle su cui basare le analisi per il calcolo della probabilità di rottura la cui scelta deve essere affrontata con molta attenzione poiché ha una grande influenza sui valori finali; per illustrare questo aspetto la valutazione è stata effettuata anche attribuendo ai *pixel* dimensioni di 0.2 x 0.2 km (Fig. 5.6).



**Figura 5.6.** Confronto tra le probabilità con pixel di 0.5 km di lato, pixel con 0.2 km di lato e la curva proposta in Youngs et al. (2003). I punti allineati nella parte bassa dei grafici corrispondono a distanze dove non è stata registrata la presenza di rotture.

Considerando *pixel* di lato 0.2 km, le probabilità di avere rotture superficiali risultano più basse poiché l'area utile a contenerle, utilizzata per l'analisi è più limitata. Tali valori si avvicinano

maggiormente al modello proposto da Youngs et al. (2003), sviluppato però attraverso l'utilizzo di *pixel* di 0.5 km di lato.

Come affermato più volte all'interno di questo lavoro, poiché l'approccio probabilistico si fonda su modelli statistici sviluppati sulla base di dati empirici, la corretta applicazione del metodo dovrebbe basarsi sui dati specifici della regione analizzata o di situazioni il più possibile simili, purché numerosi e statisticamente sufficientemente robusti; i dati alla base delle equazioni presentate in Youngs et al. (2003) si basano sui dati di rotture riportati in Pezzopane e Dawson (1996) raccolti all'interno della caratterizzazione del sito di Yucca Mountain (Nevada, USA) e riferiti a 13 terremoti avvenuti in una regione estensiva negli Stati Uniti Occidentali.

Inoltre, una corretta attribuzione delle dimensioni è fondamentale affinché i risultati della PFDHA possano essere considerati utili per l'analisi della fagliazione e, proprio in virtù del loro carattere spaziale, la definizione dell'unità areale su cui basare i calcoli non può prescindere da valutazioni sul reale ingombro della struttura ingegneristica in progetto.

#### **5.2.1.2 Distribuzione delle dislocazioni**

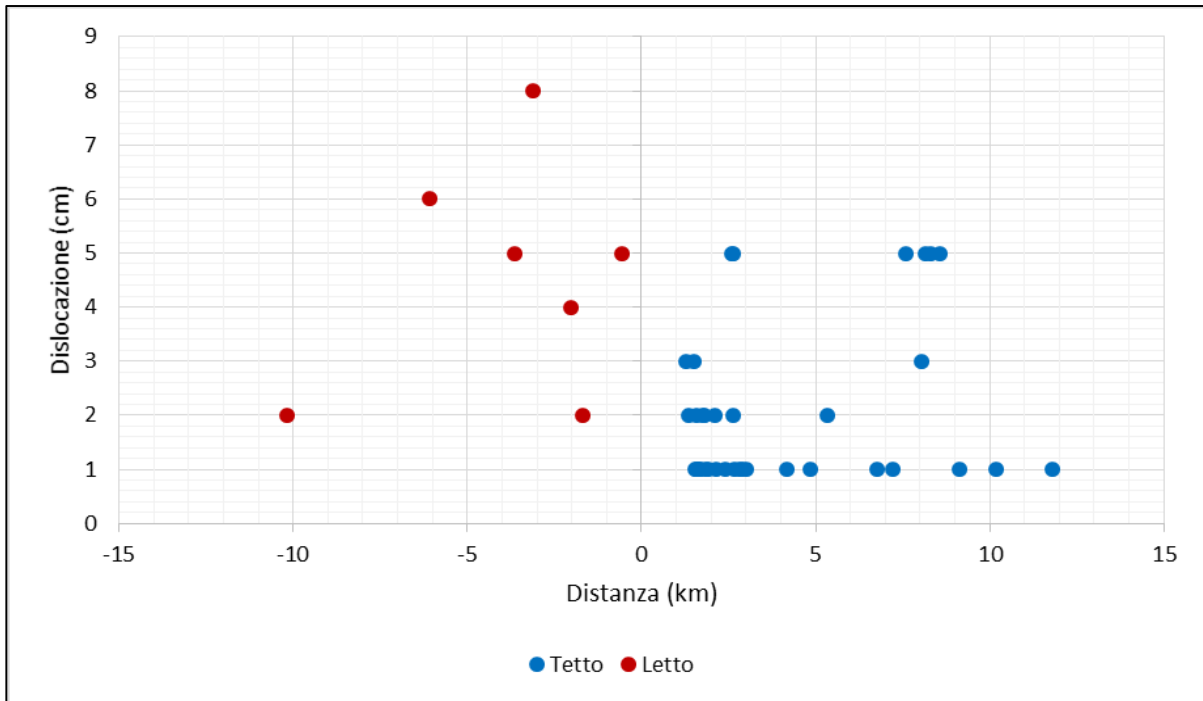
Per alcune delle rotture digitalizzate e utilizzate per l'analisi della probabilità di fagliazione, è stato possibile risalire all'entità delle dislocazioni.

Nel grafico riportato in figura 5.7 vengono plottate le dislocazioni misurate in base alla distanza dalla traccia della faglia primaria; dall'osservazione dei dati riportati non sembra esserci una particolare relazione tra la quantità di dislocazione registrata e la distanza dalla faglia primaria.

Nel grafico di figura 5.8 vengono plottati i valori di dislocazione ricavati dai dati di letteratura normalizzati sia per la dislocazione massima realmente misurata sulla faglia primaria (15 cm) sia per la dislocazione massima ricavata attraverso le equazioni riportate in Wells e Coppersmith (1994) per faglie normali e impostando la magnitudo  $m$  pari a 6.3, e in particolare:

$$\log(D_{max}) = -5.90 + 0.89m$$

da cui si ricava  $D_{max} = 0.75 \text{ m} \pm 0.38$ , ben al di sopra dei valori rilevati in occasione del terremoto de L'Aquila che, sempre sulla base delle equazione presenti in Wells e Coppersmith (1994) presenta valori di dislocazione massima attribuibili ad un evento di magnitudo  $6.0 \pm 0.29$ .



**Figura 5.7.** *Variazione della quantità di dislocazione con la distanza*

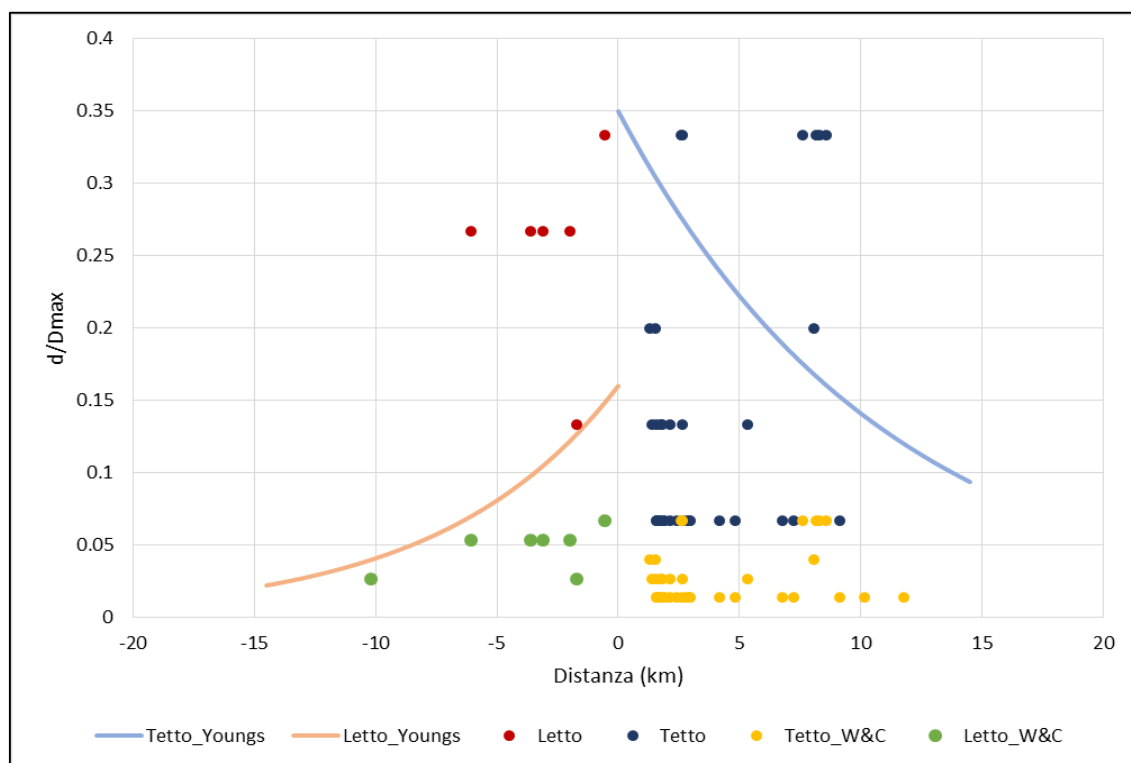
All'interno del grafico viene riportata anche la curva rappresentante i modelli proposti in Youngs et al. (2003), rispettivamente per letto e tetto, e forzate tra i percentili 85° e 95°:

$$d/D_{max} = 0.35 \cdot \exp(-0.091r)$$

$$d/D_{max} = 0.16 \cdot \exp(-0.137r)$$

I modelli sviluppati da Youngs et al. (2003) si basano sull'assunzione che, in caso di terremoto, l'entità delle dislocazioni sia maggiore sul tetto rispetto al letto e che tali valori diminuiscano più velocemente su quest'ultimo all'aumentare della distanza dalla faglia primaria; come si potrebbe notare dalla figura 5.7 però, nel caso dell'evento del 2009 non sembrano essere riconoscibili queste tendenze. Dall'osservazione del grafico riportato in figura 5.8, nel caso dell'evento del 2009 e per valori normalizzati sulla dislocazione massima realmente rilevata, il modello proposto in Youngs et al. (2003) e forzato tra i percentili 85° e 95° sembra mostrare una buona capacità predittiva per quanto riguarda le dislocazioni attese sul tetto, mentre

sottostima le quantità di dislocazione attese sul letto. Invece, i valori normalizzati per la dislocazione massima attesa per magnitudo 6.3 ricavata attraverso le equazioni riportate in Wells e Coppersmith (1994) sono, come prevedibile, più bassi e cadono tutti al di sotto dei modelli proposti da Youngs et al. (2003).



**Figura 5.8.** Confronto tra le dislocazioni rilevate in occasione del terremoto de L'Aquila del 2009 normalizzate per la dislocazione massima rilevata, per la dislocazione massima derivata dalle equazioni di Wells e Coppersmith (1994) (per il confronto è stata plottata solo la serie di valori normalizzati per il valore medio) e i modelli forzati tra i percentili 85° e 95° proposti in Youngs et al. (2003)

### 5.3 Discussione e conclusioni

La valutazione è condotta sul confronto tra i dati misurati relativi ad un unico evento sulla faglia di Paganica e le curve derivate dai modelli presenti in letteratura forzando le equazioni al valore di magnitudo registrato durante il terremoto de L'Aquila avvenuto il 6 aprile 2009. I modelli proposti in Youngs et al. (2003) non mostrano in nessuna delle due componenti per la caratterizzazione della fagliazione secondaria, una buona capacità predittiva, perché porterebbero ad una sottostima della pericolosità. Questo potrebbe essere principalmente dovuto al fatto che le relazioni sono state elaborate utilizzando dati relativi ad un contesto tettonico non paragonabile a quello della valle del fiume Aterno, e probabilmente a tutta la regione appenninica, e che il database non sia quindi sufficientemente popolato per essere considerato statisticamente rappresentativo.

## **6 Discussione**

Le problematiche proprie di un processo di localizzazione specifico, soprattutto se relativo alla realizzazione di un'opera considerabile critica, sia in termini di pericolosità potenziale (ad esempio impianti a rischio di incidente rilevante) che di resilienza di una comunità in seguito ad un evento naturale estremo (per esempio il mantenimento dell'integrità di infrastrutture primarie come acquedotti, elettrodotti, strade, etc.), porta molte volte alla necessità di intraprendere percorsi di ragionamento scientifico per la valutazione della reale applicabilità ed affidabilità delle metodologie proposte e utilizzate. Questo risulta particolarmente vero per quanto riguarda la valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale, sia perché si tratta di una disciplina ancora relativamente nuova, sia perché le leggi fisiche alla base del fenomeno della fagliazione sono scarsamente conosciute e comprese, a causa dell'alto livello di variabilità naturale intrinseca del processo e della scarsità dei dati empirici relativi.

La necessità di ricercare una metodologia in grado di restituire risultati utilizzabili in tutte le fasi di un processo di localizzazione e di realizzazione di un'infrastruttura, soprattutto se considerata critica, ha portato l'attenzione del presente progetto di dottorato sull'analisi di una metodologia abbastanza recente proposta per la quantificazione della pericolosità da fagliazione attraverso un approccio probabilistico. Questo tipo di analisi, oltre a rappresentare un potenziale strumento per valutazioni relativamente speditive della pericolosità da fagliazione, anche in fasi preliminari del processo di localizzazione e, successivamente, permettere una caratterizzazione ed una quantificazione della pericolosità più accurata sulla base di dati sito-specifici di grande dettaglio, costituisce un efficace base per l'intero percorso decisionale volto alla definizione dell'idoneità di un sito per la realizzazione dell'opera di interesse. Inoltre, soprattutto per quanto riguarda l'applicazione in ambito nucleare, essendo basato su un approccio probabilistico permette di ottenere risultati confrontabili con le stime di pericolosità derivanti da altri fattori naturali, come ad esempio lo scuotimento al suolo, tornado, etc. (Todorovska et al., 2007) per una corretta definizione dei parametri utili alla progettazione ingegneristica e alle analisi di sicurezza dell'intero sistema infrastruttura-ambiente.

Come illustrato nei capitoli precedenti una PFDHA fornisce infatti la possibilità di ottenere curve di pericolosità che correlano la quantità di dislocazione con uno specifico periodo di ritorno e la valutazione della pericolosità può focalizzarsi sulla dislocazione superficiale causata dalla rottura cosismica della faglia sismogenica o lungo strutture secondarie anche

molto distanti, in seguito al rilascio di energia sismica sulla struttura sismogenica; i risultati ottenuti attraverso questo tipo di analisi possono essere utilizzati sia all'interno di un processo di localizzazione di un impianto o un'infrastruttura considerati pericolosi o critici, sia come base per le successive decisioni sull'accettabilità del sito che come dati di *input* per l'eventuale progettazione dell'opera.

Tuttavia, come deducibile da quanto riportato nei capitoli precedenti, tale metodologia presenta alcuni vantaggi ma ancora molti limiti.

### **6.1 Potenzialità del metodo**

Alcuni fenomeni naturali, come ad esempio i terremoti, esibiscono una natura essenzialmente stocastica la cui interpretazione non dipende da una maggiore o minore accuratezza delle misure ma dal fatto che risultano caratterizzati da un carattere essenzialmente irregolare. Le eventuali regolarità (persistenze) vanno cercate a livello di proprietà della popolazione e non sui singoli eventi. Per esempio, dall'analisi dei dati globali, è stato notato che il numero di terremoti sembra decrescere regolarmente con la magnitudo, ossia i terremoti molto intensi risultano più rari dei terremoti deboli ("Legge di Gutenberg e Richter"). Il fenomeno della rottura superficiale in seguito al verificarsi di terremoti non è ad oggi un processo ben conosciuto e, non essendo state individuate leggi fisiche che possano descriverlo con ragionevole precisione, può essere al momento equiparato ad un fenomeno di natura stocastica. Questi presupposti hanno nel tempo scoraggiato un approccio di tipo deterministico alla previsione dei singoli terremoti e, negli ultimi anni, dei fenomeni di fagliazione superficiale, a favore di approcci di tipo probabilistico.

Secondo l'approccio probabilistico ogni "ipotesi" riguardo ai possibili scenari sismici futuri diventa possibile, anche se questo non vuol dire che tutti questi scenari siano ugualmente verosimili; rispetto alle conoscenze disponibili infatti alcuni scenari possono essere considerati più verosimili di altri e la maggiore o minore verosimiglianza viene espressa in forma di un valore di probabilità.

Oltre alla possibilità di considerare l'intero ventaglio delle possibilità verosimili, i principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di una PFDHA possono essere:

- l'inclusione dei contributi di differenti terremoti con magnitudo compresa tra un valore minimo stabilito e il valore massimo potenzialmente generabile da ognuna delle sorgenti sismogeniche considerate;



- l'inclusione dei contributi di tutte le sorgenti presenti a tutte le distanze dal sito;
- i risultati forniti forniscono i mezzi per selezionare i parametri utili alla progettazione;
- i risultati sono forniti per un dato intervallo di tempo.

Inoltre, alcune faglie attive presentano geometrie di rottura complesse con molti rami e rigetti che formano una zona di deformazione ampia da decine a centinaia di metri. L'incertezza nel predire rotture future deve quindi essere riconosciuta. Ad esempio, se una data faglia non ha evidenze di movimenti recenti ma uno dei segmenti ad essa strutturalmente collegabili sì, allora non può essere ignorata. Queste osservazioni creano situazioni in cui può essere difficile giungere ad una risposta definitiva sulla reale esistenza di una possibilità di sperimentare fagliazione superficiale in futuro. In questi casi l'approccio probabilistico può risultare lo strumento di valutazione potenzialmente più adatto (ANSI 2.30). Inoltre, la natura propria di un metodo basato su stime di probabilità, rende la PFDHA un approccio robusto per catturare l'incertezza caratterizzante il fenomeno della fagliazione, durante uno studio sito-specifico.

## **6.2 Limiti del metodo**

L'analisi probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale presenta ad oggi numerosi limiti. Innanzitutto, il presupposto di partenza di ognuna delle metodologie qui riportate può essere considerato una tra le principali fonti di incertezza, se non la maggiore, e ad oggi uno dei più grandi limiti per garantire l'affidabilità dei risultati: ognuno dei modelli sviluppati per la PFDHA ha infatti come assunzione iniziale il fatto che l'insieme di dati su cui si fonda sia completo e quindi rappresentativo di tutti i valori naturalmente assumibili dal parametro indagato. Questa assunzione è evidentemente errata e potrebbe portare a stime di pericolosità errate, sia perché le distribuzioni dei valori che un parametro può sperimentare non sono complete, sia perché su di essi si basa la ricerca e la comprensione delle potenziali interdipendenze tra due variabili o delle leggi fisiche che governano i fenomeni che si vogliono rappresentare. La raccolta di una quantità di dati sempre maggiore e di sempre migliore qualità può certamente portare a stime più affidabili riducendo sempre di più la componente epistemica dell'incertezza, anche se non comporterebbe alcun cambiamento nella componente aleatoria; è per questo motivo che è fondamentale che i risultati di una PFDHA riflettano le incertezze introdotte nell'analisi dai parametri di *input*, sia per quanto riguarda la componente aleatoria che quella epistemica.

Altri limiti e svantaggi di una PFDHA possono essere i seguenti:

- il processo può essere molto complesso;
- il risultato è un insieme di numerose sorgenti e non si riferisce a un evento di progetto come nel caso di una valutazione deterministica condotta per un singolo evento;
- permane sempre una certa carenza di trasparenza nella sua applicazione;
- in molti casi la propagazione della variabilità aleatoria può essere molto più importante della componente epistemica;
- i dati, ad oggi, nella maggior parte dei casi, coprono un intervallo limitato di magnitudo e, al di sotto di magnitudo 6.5 sono scarsamente rappresentati e devono essere spesso estrapolati.

Inoltre è necessario ricordare che la PFDHA si deve necessariamente basare su una serie di assunzioni che richiedono una profonda conoscenza del sito in esame; questa dipendenza può limitare notevolmente la sua applicabilità e la definizione di metodologie considerabili universalmente applicabili.

### **6.3 Punti di attenzione in fase di utilizzo**

Uno dei punti fondamentali per un'accurata PFDHA è certamente la corretta definizione e la piena comprensione del modello sismotettonico di partenza, rappresentativo del contesto in cui si trova il sito analizzato. Inoltre è molto importante ricercare alcune peculiarità dei fenomeni di dislocazione presenti (ad es. Jafari and Moosavi, 2008) per poter essere in grado di orientare in modo corretto la definizione dei modelli per la rappresentazione delle distribuzioni di probabilità, o eventualmente la scelta dei più adatti tra quelli presenti in letteratura. Per quanto riguarda l'applicazione dei modelli statistici, una delle possibilità per limitare le incertezze ad essi associate potrebbe essere quella di fissare dei limiti o delle condizioni precise che possano limitare o indirizzare le interpolazioni per la previsione degli eventi futuri, soprattutto nei casi in cui si ricerchino risultati relativi a lunghi tempi di ritorno; questa sorta di "punti di controllo" devono essere ricercati nella realtà fisica del caso studio di interesse o da situazioni molto simili, oppure definiti attraverso semplici valutazioni deterministiche (dislocazione massima reale, distanza massima delle rotture,...). Risulta quindi estremamente importante cercare di "ancorare" i modelli descrittivi a osservazioni sulle deformazioni reali e sulle proprietà meccaniche specifiche delle strutture in esame, soprattutto nel caso di faglie sismogeniche e di fagliazione primaria.

In generale, devono essere quindi preferite le metodologie di calcolo che tengono maggiormente conto dei dati sito-specifici; ad esempio, nella definizione della probabilità che un terremoto provochi una rottura in superficie, se possibile dovrebbero essere utilizzato il metodo basato sulle simulazioni (§ 4.3), che tiene conto delle profondità focali e delle geometrie della faglia studiata, invece che la regressione logistica che si basa su database globali non completi. Tuttavia, qualora i dati specifici di faglia non risultassero sufficienti alla definizione di alcune assunzioni specifiche importanti, è preferibile introdurre nell'analisi semplificazioni nei modelli e non tentativi di interpretazioni di dettaglio se non risultano basate su valori robusti che potrebbero introdurre grossi errori ed incertezze; ad esempio, per quanto riguarda le distribuzioni e le geometrie della rottura superficiale (dislocazioni maggiori al centro e minori alle estremità, grande complessità del meccanismo di rottura, etc.) è preferibile considerare che la rottura sia omogenea su tutta la lunghezza della faglia piuttosto che basare la valutazione su caratteristiche specifiche non dimostrate.

Inoltre, nel caso in cui i dati empirici esistenti permettessero lo sviluppo di nuovi modelli, la definizione dei parametri delle relazioni statistiche alla base dovrebbe essere sempre accompagnata da un'analisi di sensibilità che permetta di individuare i fattori in grado di influenzare maggiormente i risultati (ad es. Wells e Kulkarni, 2014; Moss e Ross, 2011; Caputo et al., 2008).

#### **6.4 L'applicazione per la localizzazione del Deposito Nazionale**

Per quanto riguarda la valutazione dell'applicabilità dell'approccio probabilistico nella localizzazione e caratterizzazione del sito definitivo per la realizzazione del Deposito Nazionale, possono essere fatte le seguenti considerazioni.

Il criterio CE3 della GT29 di ISPRA (2014) stabilisce che le aree interessate da fenomeni di fagliazione non possono essere considerate potenzialmente idonee ad ospitare il DN, e indica i database ITHACA e DISS come sorgenti dei dati necessari per questa valutazione. Sulla base di queste indicazioni si può dedurre che con il termine "fagliazione" ISPRA si riferisca alle rotture causate da strutture che sono sia sismogeniche che capaci (*sensu* IAEA, 2010) e quindi in grado di causare *terremoti morfogenici lineari* (Caputo et al., 2008), poiché i due cataloghi citati raccolgono i dati relativi a queste tipologie di faglie. È verosimile presupporre che le informazioni contenute in ITHACA e DISS, unitamente ad eventuali indagini di dettaglio sito-specifiche, saranno in grado di evitare la selezione di un sito interessato da faglie

potenzialmente in grado di causare fagliazione primaria. Per questo motivo l'eventuale applicazione della PFDHA all'interno del progetto dovrà concentrarsi sulla valutazione di quella che, in questo caso specifico, potrebbe essere considerata l'espressione della pericolosità da fagliazione superficiale residua, ossia la fagliazione secondaria, sia per quanto riguarda le rotture innescate su strutture tettoniche pre-esistenti e riconosciute, ma anche in riferimento alle rotture che possono verificarsi su altri piani di debolezza o su strutture non mappate. Tuttavia le incertezze associate ai modelli per la valutazione della fagliazione superficiale sono ad oggi molto elevate poiché le dinamiche che governano tale fenomeno non sono ancora chiare e i modelli statistici sviluppati per la sua descrizione si basano su un numero molto limitato di dati empirici, che non può essere considerato rappresentativo della realtà fisica. Questa carenza di dati deriva anche dal fatto che le deformazioni da fagliazione secondaria, essendo normalmente caratterizzata da dislocazioni limitate (tipicamente nell'ordine dei centimetri) sono difficilmente riconoscibili sul terreno.

Una valutazione della potenziale presenza e delle caratteristiche della fagliazione secondaria può però essere molto importante per la costruzione dei modelli per la valutazione della capacità della struttura Deposito, intesa come l'insieme delle componenti ingegneristiche e di quelle naturali, di garantire l'isolamento dei rifiuti radioattivi per lunghi periodi, anche nell'ordine delle decina di migliaia di anni, e quindi per i calcoli necessari per l'analisi di sicurezza. In questo senso, proprio a causa delle grandi incertezze e della carenza di dati osservati e osservabili, la valutazione del fenomeno attraverso una PFDHA può essere l'unico strumento che potrebbe portare a risultati utili. Inoltre, poiché le tendenze internazionali nell'ambito del nucleare mostrano un interesse sempre maggiore nell'utilizzo dell'approccio probabilistico nella valutazione della pericolosità da fagliazione superficiale, non può essere escluso a priori che, anche per il Deposito Nazionale, verrà richiesta una sua applicazione in fase di licenziamento del progetto definitivo.

Perché una valutazione porti a risultati considerabili sufficientemente affidabili è necessario compiere un grande sforzo nella raccolta del maggior numero di dati sito-specifici, che può avere il maggior contributo soprattutto dall'utilizzo delle nuove tecnologie di analisi e rappresentazione della superficie, come LiDAR, InSAR e varie tipologie di immagini satellitari, che potrebbero permettere un rapido arricchimento dei *database* sopra citati e potrebbero

fornire strumenti fondamentali per la quantificazione delle incertezze e delle imprecisioni associate ai dati meno recenti (ad es. Chen et al., 2013).

Tuttavia, nonostante la maggiore attenzione della comunità scientifica verso la raccolta dei dati di rotture secondarie in occasione di terremoti e lo sviluppo delle tecniche di rilevamento, ad oggi, e nell'immediato futuro, sulla base delle ricerche effettuate, la valutazione probabilistica della pericolosità da fagliazione secondaria non può essere considerata una metodologia in grado di fornire dati affidabili su cui prendere decisioni critiche. Nonostante ciò, possa comunque costituire uno strumento molto utile per lo sviluppo di alcune considerazioni e assunzioni in fase di caratterizzazione finale di un sito, di progettazione delle strutture ingegneristiche e di predisposizione dell'analisi di sicurezza.

### **6.5 Sviluppi futuri**

Come più volte affermato, per una corretta applicazione di una PFDHA è fondamentale la definizione di modelli *ad hoc* per il sito studiato. Per questo motivo la fase di caratterizzazione dell'area e la raccolta di dati rilevati a livello globale, riferiti a contesti sismotettonici assimilabili a quelli in cui ricade il sito, risultano attività estremamente importanti poiché la quantificazione dei parametri di faglia e del potenziale comportamento della fagliazione superficiale in occasione di terremoti futuri sono calcolati attraverso modelli statistici basati su tali dati empirici (Stepp et al., 2001).

In previsione della potenziale applicazione di una PFDHA per la caratterizzazione del sito finale per la costruzione del Deposito Nazionale, ma anche per un'applicazione della metodologia ad altri tipi di infrastrutture, la prima attività prevista deve essere la realizzazione di *database* specifici per ognuno dei principali contesti geodinamici riconoscibili in Italia (ad es. Galadini et al., 2012). Sulla base dei *database* realizzati dovrebbe poi essere valutata la possibilità di sviluppare nuove relazioni di attenuazione, ad esempio sulla base di altri parametri ad oggi non considerati ma che potrebbero mostrare una maggiore capacità predittiva, poiché sulla base di alcuni recenti esempi le caratteristiche delle rotture superficiali potrebbero essere controllate da altri fattori che, potenzialmente già presenti nella letteratura geologica o facilmente misurabili, possono contribuire a espandere i *database* di partenza e fornire risultati statisticamente molto più robusti.

## **7 Conclusioni**

Le deformazioni cosismiche permanenti associate a terremoti caratterizzati da magnitudo da media a grande, e gli ingenti danni alle infrastrutture critiche (acquedotti, elettrodotti, vie di comunicazione, etc.) da esse causati, come ad esempio in occasione del terremoto di Kobe (Giappone 1995,  $M_w$  6.8), del terremoto di Chi-Chi (Taiwan 1999,  $M_w$  7.6), del terremoto di Denali (Alaska 2002,  $M_w$  7.9) o del terremoto de L'Aquila (Italia 2009,  $M_w$  6.3), hanno portato ad una sempre maggior attenzione alla tematica della pericolosità da fagliazione superficiale.

L'analisi della fagliazione superficiale, definita come la dislocazione in corrispondenza o in prossimità della superficie topografica derivante per via diretta o indiretta da movimenti tettonici lungo una faglia accompagnati o meno da forti rilasci di energia sismica, costituisce infatti una parte importante del processo di caratterizzazione sismica di un sito selezionato per la realizzazione di un'opera ingegneristica, soprattutto se considerata potenzialmente pericolosa o critica se danneggiata, come può essere ad esempio per il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività.

Sulla base di queste assunzioni e in occasione dell'avvio del processo di localizzazione e realizzazione del Deposito Nazionale, il presente progetto di Dottorato, è stato quindi indirizzato verso l'individuazione delle procedure potenzialmente più adatte per lo realizzazione di un'analisi quantitativa del livello di pericolosità derivante dal fenomeno di fagliazione superficiale generato da eventi sismici. Tale valutazione risulta una componente importante sia per l'individuazione del sito potenzialmente più adatto, che per la definizione della sua accettabilità e, se necessario, per la sua successiva caratterizzazione di dettaglio, soprattutto a fini ingegneristici, per la definizione di parametri per la progettazione finale delle strutture. Le tendenze più recenti, supportate anche dagli ultimi aggiornamenti delle normative e delle linee guida internazionali, spingono ad un utilizzo sempre maggiore dei metodi probabilistici. Durante questo progetto di dottorato, tali metodi sono stati analizzati nel dettaglio per arrivare ad una loro valutazione critica, alla definizione di una proposta di linee guida per l'applicazione della valutazione probabilistica della pericolosità da fagliazione superficiale e un giudizio sulla effettiva applicazione al processo di localizzazione del DN.

L'obiettivo di una valutazione probabilistica della pericolosità derivante da fagliazione superficiale applicata al progetto Deposito Nazionale dovrebbe essere quello di fornire una

valutazione della pericolosità sia per il periodo di operatività e controllo istituzionale della struttura (300 anni), che per il periodo seguente al suo rilascio (tipicamente 10.000 anni). In questo caso specifico, la pericolosità non deve essere solo valutata in relazione ai potenziali effetti sulle strutture ingegneristiche ma deve essere tenuto in conto anche l'aspetto fondamentale dell'isolamento dei rifiuti radioattivi dall'ambiente; ad esempio, i risultati ottenuti in seguito all'applicazione della PFDHA al sito di Yucca Mountain (Stepp et al., 2001) indicano che la pericolosità da fagliazione superficiale non rappresenta un punto critico nella progettazione sismica delle strutture ma può fornire delle basi stabili per la valutazione degli effetti della fagliazione sull'isolamento dei rifiuti nel lungo periodo e quindi per la valutazione della capacità di contenimento del sistema DN – ambiente naturale circostante.

La metodologia qui proposta è stata valutata nell'ottica di una sua potenziale applicazione all'interno del processo di localizzazione e caratterizzazione del sito definitivo per la realizzazione del Deposito Nazionale per lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività e per lo stoccaggio temporaneo di lunga durata dei rifiuti ad alta attività. Come mostrato anche dall'analisi preliminare effettuata sulla base dei dati di fagliazione superficiale rilevati in occasione del terremoto de L'Aquila (6 aprile 2009,  $M_w$  6.3) tale metodologia di valutazione è caratterizzata da grandi incertezze e i modelli presenti in letteratura non possono essere considerati sufficientemente affidabili per una applicazione specifica poiché derivati da *database* limitati che non possono costituire delle basi statistiche robuste. Tuttavia, per la caratterizzazione dei siti o del sito potenzialmente definitivo per la realizzazione di un'infrastruttura particolare come il DN, devono essere previste numerose indagini di dettaglio che potranno permettere una sostanziale riduzione delle incertezze, sia di quelle riconducibili alla componente aleatoria che a quella epistemica; inoltre, sempre in seguito alle indagini di caratterizzazione, diventeranno disponibili numerosi dati che potranno potenzialmente permettere implementazioni della metodologia alla base della PFDHA, soprattutto per quanto riguarda la sua applicazione specifica al territorio italiano.

Le caratteristiche tettoniche proprie del territorio italiano, caratterizzato perlopiù da terremoti di magnitudo non troppo elevate e lunghi tempi di ritorno ha portato a preferire, tra gli approcci presenti in letteratura quello che in Youngs et al. (2003) viene definito "*Earthquake approach*", poiché i dati necessari per una valutazione probabilistica basata solamente sui valori di dislocazione della faglia di interesse risultano difficilmente

caratterizzabili e sarebbero in un numero troppo limitato per essere considerati rappresentativi del comportamento della struttura, e sarebbe una metodologia non applicabile alla valutazione della fagliazione secondaria. Attraverso l'approccio terremoto, derivato direttamente dai metodi per la valutazione probabilistica della pericolosità sismica legata allo scuotimento del suolo (PSHA), i *database* possono potenzialmente essere molto più ricchi poiché permettono l'utilizzo di dati derivati anche da strutture presenti in altri contesti globali paragonabili a quello analizzato.

In conclusione, sulla base delle analisi e delle considerazioni riportate all'interno di questo lavoro di tesi, in riferimento ai processi di localizzazione e caratterizzazione di un sito per la realizzazione di un'infrastruttura o di un'opera considerata potenzialmente critica o pericolosa, e in particolare del sito definitivo per la realizzazione del Deposito Nazionale, la valutazione critica delle procedure alla base di una PFDHA suggerisce che questa non dovrebbe essere considerata un valido strumento per una definizione di dettaglio della pericolosità associata ai fenomeni di fagliazione superficiale. Tuttavia può rappresentare una procedura adatta per la valutazione della componente residua di pericolosità, rimanente dopo l'applicazione del criterio di esclusione CE3 (GT29 – ISPRA, 2014) e i successivi studi di caratterizzazione di dettaglio del sito, derivante dalla fagliazione secondaria, soprattutto per la considerazione di rotture distribuite su strutture non mappate in precedenza. In questo caso, perché i risultati della PFDHA forniscano delle basi sufficientemente solide per la definizione del livello di pericolosità, deve essere fatto uno sforzo verso la definizione di modelli *ad hoc* per il sito analizzato, che tengano conto nel miglior modo possibile del contesto sismotettonico caratterizzante il sito stesso.



**Bibliografia**

- Abrahamson N A 2000 State of the practice of seismic hazard evaluation *Proc. Geo. Eng. 2000 (Melbourne, Australia)* **vol 1**, 659-85
- Allen, C. R. (1975). Geological criteria for evaluating seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.* 86, 1041–1057
- ANS (American Nuclear Society) (2015) *Criteria for Assessing Tectonic Surface Fault Rupture and Deformation at Nuclear Facilities ANSI/ANS- 2.30*, American Nuclear Society, La Grang, Illinois, USA
- Baize S. (2015) Earthquake geology and geophysical studies for assessing the seismic hazard: a synthesis for the Diablo Canyon Nuclear Power Plant (USA, California), *6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology, 19-24 April 2015, Pescina, Fucino Basin, Italy*, in *Miscellanea INGV* **27**, 39-42
- Baize S. and Scotti O. (2015) The Napa Earthquake, California (M=6; 24/08/2014). Post-seismic survey report, with special focus on surface faulting, RT/PRP-DGE/2015-00018, Pôle radioprotection, environnement, déchets et crise - Service de caractérisation des sites et des aléas naturels, IRSN
- Batatian, D. (2002) *Minimum Standards for Surface Fault Rupture Hazard Studies: Appendix A to the Geological Hazards Ordinance, Chapter 19.75 of the Development Code*. Salt Lake County, Salt Lake City, UT.
- Bazzurro P. and Cornell C. A. (1999) Disaggregation of seismic hazard, *Bull. Seis. Soc. Am.* **89**, 501-520.
- Begg and Mouslopoulou (2010) Analysis of late Holocene faulting within an active rift using lidar, Taupo Rift, New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **190**, 152-167
- Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O. and Scibek J. (2013) Fault zone Hydrogeology, *Earth-Science Reviews* **127**, 171-192
- Biasi e Weldon (2006) Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **96**, 1612-1623
- Biasi e Weldon (2006) San Andreas Fault rupture scenarios from multiple paleoseismic records: Stringing pearls, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **99**, 471-478
- Bommer J.J., Scherbaum F., Bungum H., Cotton F., Sabetta F. and Abrahamson N.A. (2005) On the Use of Logic Trees for Ground-Motion Prediction Equations in Seismic-Hazard Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America* **95 no. 2**, 377-389
- Boncio P., Pizzi A., Brozzetti F., Pomposo G., Lavecchia G., Di Naccio D. and Ferrarini F. (2010) Coseismic Ground deformation of the 6 April 2009 L'Aquila earthquake (Central Italy,  $M_w$  6.3), *Geophys. Res. Lett.* **37**, 6 pp.

- Boncio P., Galli, P., Naso, G., and Pizzi, A. (2012). Zoning surface rupture hazard along normal faults: Insight from the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Central Italy, Earthquake and other global earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* **102** no. 3, 918-935
- Bonilla, M. G. (1970). Surface faulting and related effects. In *Earthquake Engineering* (R. L. Wiegel, Ed.), pp. 47–74. Prentice-Hall, New York
- Brillinger, D. R., and Preisler, H. K. (1983) Maximum likelihood estimation in a latent variable problem: in *Studies in Econometrics, Time Series, and Multivariate Statistics*, S. Karlin, T. Amemiya, and L. A. Goodman (eds.), Academic Press, New York, 31–65
- Bryant W.A. and Hart E.W. (2007). Fault-rupture hazard zones in California: Alquist-Priolo earthquake fault zoning act with index to earthquake fault zones maps. *Calif. Geol. Surv. Spec. Publ.*, 42, 41 pp.
- Budnitz R. J., Apostolakis G., Boore D. M., Cluff L. S., Coppersmith K. J., Cornell C. A. and Morris P. A. (1997) Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts, *U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-6372*
- Caputo R. (1993) Morphogenic earthquakes: a proposal, *Bull. INQUA-NC* **16**
- Caputo R. (2005) Ground effects of large morphogenic earthquakes, *Preface, J. Geodyn.* **40 (2-3)**, 113-118
- Caputo R., Mucciarelli M. And Pavlides S. (2008) Magnitude distribution of linear morphogenic earthquakes in the Mediterranean region: insights from paleoseismological and historical data, *Geophys. J. Int.* **174**, 930-940
- Chapman N, Berryman K., Villamonr P., Epstein W., Cluff L. and Kawamura H.(2014) Active faults and Nuclear Power Plants, *Eos* **95 No. 4**, pp 33-40
- Chen R. and Petersen M.D. (2011) Probabilistic Fault Displacement Hazards for the Southern San Andreas Fault Using Scenarios and Empirical Slips, *Earthq. Spectra* **27**, 293 – 313
- Chen R., Dawson T.E. and Wills C.J. (2013) *Quantifying Surface Fault Rupture Location Uncertainty for Lifeline Crossings – Final Technical Report*, USGS
- Chen R., Branum D.M., Wills C.J. and Hill D.P. (2014) Scenario Earthquake Hazards for the Long Valley Caldera-Mono Lake Area, East-Central California, USGS (United States Geological Survey) File Report 2014-1045 - California Geological Survey Special Report 233, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia
- Cinti F.R., Pantosti D., De Martini P.M., Pucci S., Civico R., Pierdominici S., Cucci L., Brunori C.A., Pinzi S and Patera A. (2011) Evidence for surface faulting events along the Paganica fault prior to the 6 April 2009 L'Aquila earthquake (central Italy), *Journal of Geophysical Research* **116**

Civico R., Pucci S., De Martini P.M. and Pantosti D. (2015) Morphotectonic analysis of the long-term surface expression of the 2009 L'Aquila earthquake fault (Central Italy) using airborne LiDAR data, *Tectonophysics* **644-645**, 108-121

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2015) *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)*, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma

Cornell C.A. (1968) Engineering seismic risk analysis, *Bull.Seismol.Soc.Am.* **58**, 1583-1606

CRWMS M&O (1998). Probabilistic seismic hazard analyses for fault displacement and vibratory ground motion at Yucca Mountain, Nevada. Unpublished Report prepared by Civilian Radioactive Waste Management System Management and Operating Contractor, submitted to the US Department of Energy DE-AC04-94AL85000, Prepared for the US Geological Survey, 23 February 1998.

dePolo, C. M. (1994) The maximum background earthquake in the basin and range, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84**, 466–472

DISS Working Group (2010) Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquake larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas, © INGV

EMERGEO Working Group (2010) Evidence for surface rupture associated with the  $M_w$  6.3 L'Aquila earthquake sequence of April 2009 (Central Italy), *Terra Nova* **22(1)**, 43-51

Galadini F., Falcucci E., Galli P., Giaccio B., Gori S., Messina P., Moro M., Saroli M., Scardia G.e Sposato A. (2012) Time intervals to assess active and capable faults for engineering practices in Italy, *Engineering Geology* **139-140**, 50-65

Galli P., Galadini F., Calzoni F. (2005) Surface faulting in Norcia (central Italy): a “paleoseismological perspective”, *Tectonophysics* **403**, 117-130

Goto, J., Tsuchi, H., Chapman, N., and Kawamura, H. (2008). *Siting Japan's HLW Repository 2: Addressing the Tectonic Issues in Probabilistic Approach*. Abstract, 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway.

Gruppo di Lavoro MS (2008) *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*, Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province autonome, 3 vol

Guerrieri L., Baer G., Amit R., Blumetti A.M., Comerci V., Di Manna P., Hamiel Y., Michetti A.M., Salamon A., Mushkin A., Sileo G. and Vittori E. (2010) InSAR data as a field guide for mapping minor earthquake surface rupture: The case of the 2009 L'Aquila, central Italy, earthquake, *J. Geophys. Res. B Solid Earth Planets* **115**, 16 pp.

Guerrieri L., Blumetti A.M., Leoni G., Comerci V., Vittori E. (2014) Pericolosità da fagliazione superficiale in aree urbane, in Qualità dell'ambiente urbano – X Rapporto - Edizione 2014, 53/2014, ISPRA

- Gutenberg B. and Richter C.F. (1954) *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press 2nd ed., Princeton, N.J., 310 pp
- Hanks T.C. and Kanamori H. (1979) A moment-Magnitude Scale, *Jour. Geophys. Res.* **84**, 2348-2350
- Hanks T. C. and Boore D. M. (1984) Moment magnitude relations in theory and practice, *J. Geophys. Res.* **89**, 6229–6235.
- Hanks T. C. and Bakun W.H. (2002) A bilinear source-scaling model for M-log A Observations of continental earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.* **92**, 1841-1846
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2006) *Fundamental Safety Principles*, Safety Fundamentals No. SF-1, IAEA, Vienna
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2010) *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, Safety Standard Series No. SSG-9, IAEA, Vienna
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2011) *Disposal of Radioactive Waste*, Specific Safety Requirements No. SSR-5, IAEA, Vienna
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2014) *Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*, Specific Safety Guide No. SSG-29, IAEA, Vienna
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2015) *The Contribution of Palaeoseismology to Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations*, IAEA TecDoc Series No. TECDOC-1767, IAEA, Vienna
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (2014) *Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività*, Guida Tecnica n.29
- Jafari M.K. and Moosavi S.M. (2008) Lessons to be learned from surface fault ruptures in Iran Earthquakes, *Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Arlington, VA, August 11-16, 2008
- Lettis W.R., Wells. D.L., and Baldwin J.N. (1997). Empirical Observations Regarding Reverse Earthquakes, Blind Thrust Faults, and Quaternary Deformation: are blind thrust faults truly blind?. *Bull. Seism. Soc. Of America*, vol. 87, n. 5, 1171-1198
- McCalpin James P. (second edition 2009) *Paleoseismology*. Academic Press Publications, 613 pp.
- Mohammadioun B. and Serva L. (2001) Stress Drop, Slip Type, Earthquake Magnitude, and Seismic Hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.* **91 (4)**, 694-707
- Moss R.E.S. and Ross Z.E. (2011) Probabilistic Fault Displacement Hazard analysis for reverse faults, *Bull. Seism. Soc. Am.* **101 No. 4**, 1542-1553

Musson R.M.W., Toro G.R., Coppersmith K.J., Bommer J.J., Deichmann N., Bungum H., Cotton F., Scherbaum F., Slejko D. and Abrahamson N.A. (2005) Evaluating hazard results for Switzerland and how to do it: A discussion of “Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants” by J-U Klugel, *Engineering Geology* **82**, pp 43-55

NRC (Nuclear Regulatory Commission) (2012). Confirmatory Analysis of Seismic Hazard at the Diablo Canyon Power Plant from the Shoreline Fault Zone, *Research Information Letter 12-01*

Petersen M.D., Dawson T.E., Chen R., Cao T., Wills C.J, Schwartz D.P., and Frankel A.D. (2011) Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, April 2011 vol. 101 no. 2 805-825

Pezzopane, S. K., and Dawson, T. E. (1996) Fault displacement hazard: A summary of issues and information, in *Seismotectonic Framework and Characterization of Faulting at Yucca Mountain, Nevada*, U.S. Geological Survey Administrative Report prepared for the U.S. Department of Energy, Yucca Mountain Project (MOL.19970129.0041), Chapter 9, 160 pp.

Roncoroni M., Ripamonti L., Ventura G., Lombardo M., Rosati M., Chiaravalli F. and Michetti A.M. (2015) Fault displacement hazard assessment: perspectives from the siting of the Italian National Repository of Low and Intermediate Level radioactive Waste Short Lived (LILW-SL), *6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology, 19-24 April 2015, Pescina, Fucino Basin, Italy*, in *Miscellanea INGV* **27**, 422-425

Roncoroni M (2016) *La fagliazione superficiale all'interno del processo per la localizzazione di un deposito di rifiuti radioattivi*, Tesi di dottorato, Università degli Studi dell'Insubria

Sogin S.p.A. (2015) *SOGIN – Il Deposito Nazionale e Parco Tecnologico*, Roma

Sorensen S.P. and Meyer J.K. (2003) Effect of the Denali fault rupture on the Trans-Alaska pipeline, *Proc. Sixth U.S. Conf. and Workshop on Lifeline Earthq. Eng., ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, August 2003*, 9

Stirling M.W., Goded T., Berryman K. and Litchfield N (2013) Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **103**, 2993–3011

Stepp J.C., Wong I., Whitney J., Quittmeyer R., Abrahamson N., Toro G., Youngs R., Coppersmith K., Savy J., Sullivan T., and Yucca Mountain PSHA Project Members (2001) Probabilistic seismic hazard analysis for ground motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada, *Earthq. Spectra* **17**, 113-150

Schwartz D.P. and Coppersmith K.J. (1984) Fault Behavior and Characteristic Earthquake: Examples from Wasatch and San Andreas Faults, *Jour. Geophys. Res.* **89**, 5681-5698

Stirling M., Goded T., Berryman K., and Litchfield N. (2013) Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **103(6)**, 2993–3011

Takao M., Tsuchiyama J., Annaka T. and Kurita T. (2013) Application of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis in Japan, *Japan Association for Earthquake Engineering Proceedings* **13 no. 1**, 17-36

Toda S. (2015) Seismic and displacement hazard assessment on active faults in Japan, *10th Asian Regional Conference of IAEG*

Todorovska M.I., Trifunac M.D. and Lee V.W. (2007) Shaking hazard compatible methodology for probabilistic assessment of permanent ground displacement across earthquake faults, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **27**, 586-597

Vittori E., Di Manna P., Blumetti A. M., Comerci V., Guerrieri L., Esposito E., Michetti A. M., Porfido S., Piccardi L., Roberts G. P., Berlusconi A., Livio F., Sileo G., Wilkinson M., K. J. W. McCaffrey, Phillips R. J. and Cowie P. A. (2011) Surface Faulting of the 6 April 2009  $M_w$  6.3 L'Aquila Earthquake in Central Italy, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101 No. 4**, 1507–1530

Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1993) Likelihood of surface rupture as a function of magnitude, *Seismolol. Res. Lett.* **64**, 54

Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994) New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84**, 974-1002

Wells D.L. and Kulkarni V.S. (2014) Probabilistic and Deterministic Fault Displacement Hazard Analysis – Sensitivity Analyses and Recommended Practices for Developing Design Fault Displacements, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Conference in Earthquake Engineering*, Engineering Research Institute, Anchorage, AK

Wesnousky S.G. (2008) Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **98**, 1609-1632 10

Youngs, R.R. and K.J. Coppersmith (1985). Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.* **75 No.4**, pp. 939-964

Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., McCalpin J.P., Doser D.I., Fridrich, C.I., Swan F.H., Rogers A.M., Yount C.J., Anderson L.W., Smith K.D., Bruhn R.L. Knuepfer P.L.K., Smith R.B., dePolo C.M., O'Leary D.W., Coppersmith K.J., Pezzopane S.K., Schwartz D.P., Whitney J.W., Olig S.S. & Toro, G. R. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, 19, 191.

## Sitografia

[www.depositonazionale.it](http://www.depositonazionale.it)