



# GRUPPO NAZIONALE DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA

# 33° Convegno Nazionale Bologna

**Le analisi di risposta sismica locale nel contesto normativo  
e per gli studi di microzonazione  
Esperienze e possibili miglioramenti**



**Anna d'Onofrio e Francesco Silvestri**  
*Università degli studi di Napoli Federico II*



## **Risposta sismica e stabilità di centri abitati e infrastrutture**

Relazione Generale – Sessione "Analisi e gestione del rischio sismico"

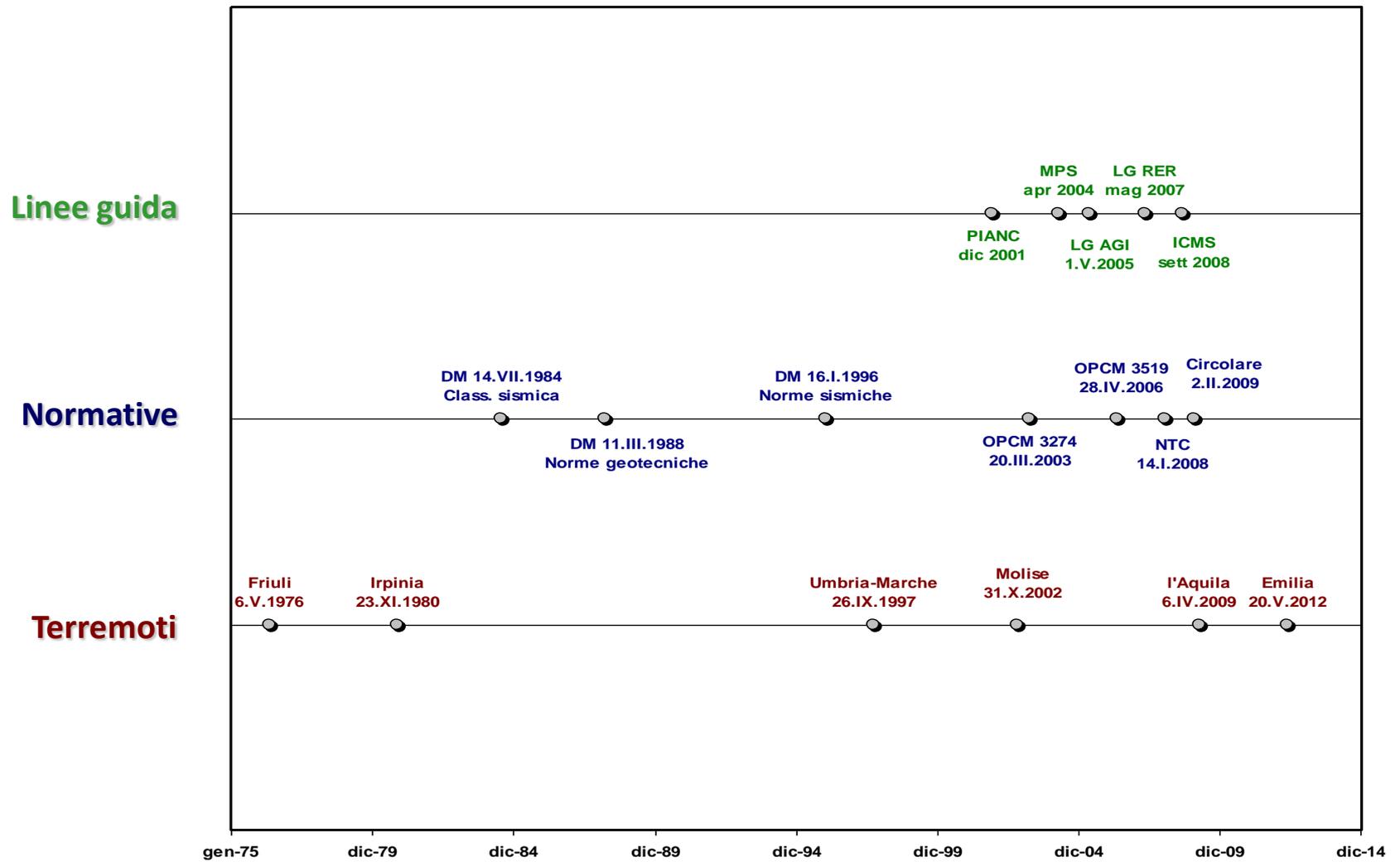


**Francesco Silvestri e Anna d'Onofrio**  
*Università degli studi di Napoli Federico II*



- 1. Obiettivi e contesto di riferimento**
2. La definizione del moto sismico di riferimento
3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo
4. L'affidabilità dei metodi d'analisi
5. Valutazione del danno
6. Conclusioni e prospettive





Aspetto	MS	NTC
<b>Finalità</b>	Identificazione e <b>perimetrazione</b> in un dato territorio di <b>zone omogenee</b> in relazione alla pericolosità sismica locale	Valutazione delle <b>azioni sismiche di progetto</b> /adeguamento manufatti e di verifica di stabilità del sito
<b>Scala</b>	<b>Urbana</b> , superiore a 1:10.000	<b>Manufatto</b>
<b>Soggetti responsabili</b>	Regioni e <b>enti locali</b>	<b>Progettista e committente</b>
<b>Tecnici ed esperti</b>	<b>Equipe</b> di Sismologi, Geologi, Ingegneri Geotecnici e Strutturali, Urbanisti	<b>Progettista e consulenti</b>
<b>Livelli di approfondimento dell'analisi</b>	Livello 1: zone suscettibili di effetti locali identificate su base qualitativa Livello 2: amplificazione quantificata in base a indagini speditive Livello 3: amplificazione quantificata in base ad analisi numeriche	Analisi di complessità crescente (metodi empirici, pseudo-statici, dinamici semplificati o avanzati) riferiti alla fase di progettazione ed all'importanza della costruzione
<b>Indagini sul sottosuolo</b>	Programmazione indagini sismiche <i>ad hoc</i> su <b>aree estese e in siti rappresentativi</b> di situazioni-tipo, ad integrare la compilazione di dati esistenti	Indagini <i>ad hoc</i> nel <b>sito del manufatto</b> , ad integrare quelle necessarie per la verifica statica e comunque sufficienti a consentire, nei casi più semplici, almeno la classificazione del sottosuolo e le verifiche di stabilità semplificate
<b>Valutazione della pericolosità e del moto sismico di riferimento</b>	Parametri sintetici del moto, spettri di sito o accelerogrammi, deducibili da <b>studi di pericolosità ad hoc</b> , in relazione al <b>livello</b> di approfondimento <b>della zonazione</b> ed al tipo di problema	Parametri sintetici del moto, spettri di sito o accelerogrammi, <b>compatibili con la MPS</b> in relazione al livello di approfondimento progettuale, allo <b>stato limite</b> ed al tipo di problema
<b>Prodotti</b>	Carte e sezioni intermedie a vari tematismi (indagini, geolitologia, geomorfologia, etc.) e <b>carte finali di microzone con gradi di amplificazione</b> riferiti ai diversi livelli	Relazioni sulle indagini e sul calcolo di azioni sismiche, quantificando il <b>livello di prestazione del manufatto ai diversi stati limite</b>

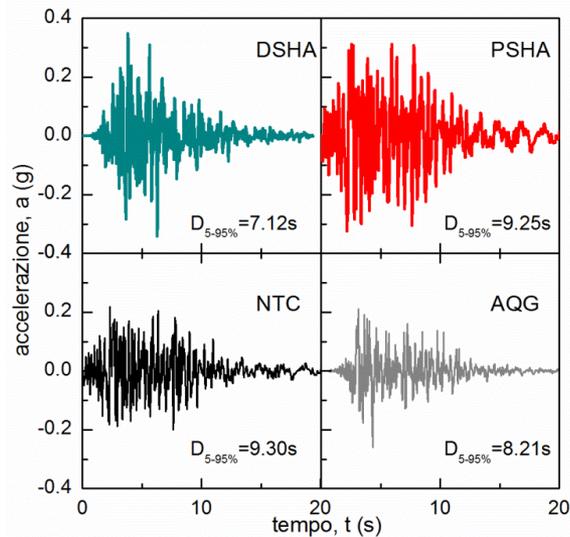
Metodo di analisi	Moto sismico di riferimento	Legame costitutivo	Indagini e prove geotecniche	Risultati tipici
Pseudo-statica Metodi empirici	<b>Accelerazione massima <math>a_{max}</math></b>	<b>Semplificato Elastico</b>	<b>Tradizionali in sito e lab. Misure di <math>V_s</math></b>	<b>Spettro di sito</b>
Dinamica semplificata	<b>Accelerogramma (-i) <math>a(t)</math></b>	<b>Mezzo monofase Lineare equivalente</b>	<b>c.s. più Prove cicliche/dinamiche in laboratorio</b>	<b>Accelerogrammi Spostamenti Tensioni totali Deformazioni</b>
Dinamica avanzata		<b>Mezzo polifase Elasto-plastico</b>		<b>c.s. più Pressioni interstiziali Tensioni efficaci</b>

raffinatezza e grado di dettaglio dei risultati  
proporzionali all'impegno di risorse sperimentali e mezzi di calcolo



1. Obiettivi e contesto di riferimento
- 2. La definizione del moto sismico di riferimento**
3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo
4. L'affidabilità dei metodi d'analisi
5. Valutazione del danno
6. Conclusioni e prospettive





accelerogramma naturale registrato il 6.IV.2009  
 su affioramento rigido in zona epicentrale (**AQG**)  
 vs.

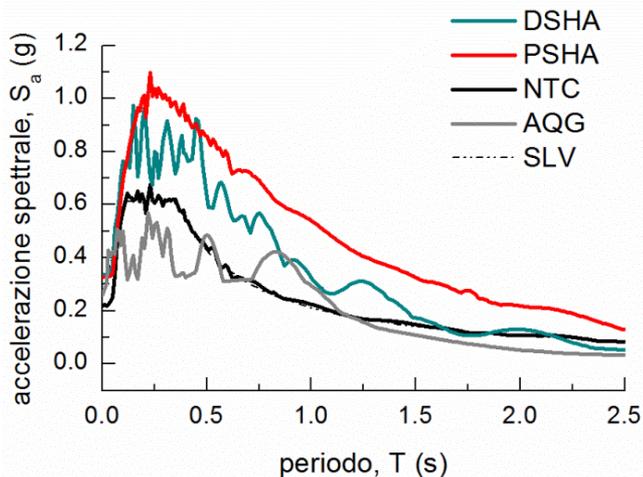
accelerogrammi artificiali generati con approcci:

- deterministico (**DSHA**)

- probabilistico (**PSHA**)

- compatibile con la pericolosità specificata dalle **NTC**

adoperati per gli studi di MS in Abruzzo (GdL MS-AQ, 2010)



vincolo di compatibilità spettrale esteso a  
 tutto il campo di periodi



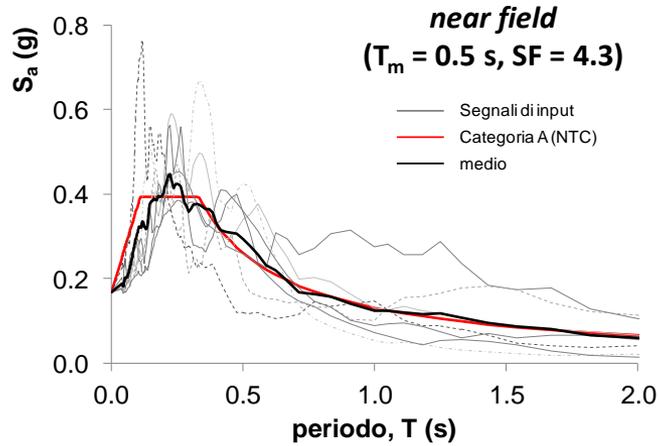
segnali artificiali caratterizzati da fase critica  
 di durata irrealisticamente elevata

<b>SIGLA CATALOGO</b> <u>Sito Web</u> <i>Ente responsabile</i>	<i>Database</i>
<b>ITACA</b> <a href="http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/">http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/</a> <i>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)</i>	Registrazioni italiane 1972 – 2013
<b>SISMA</b> <a href="http://sisma.dsg.uniroma1.it/searchPanel.do">http://sisma.dsg.uniroma1.it/searchPanel.do</a> <i>UniRoma1-UCLA/PEER</i>	101 registrazioni di 89 eventi italiani 1972 - 2002
<b>PEER</b> <a href="http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/site">http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/site</a> <i>University of California, Berkeley</i>	Regioni mondiali inclusa l'Italia 1952 - 2003
<b>ESD</b> <a href="http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm">http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm</a> <i>Commissione europea in collaborazione con EAGE (European Association for Earthquake Engineering)</i>	Regioni europee inclusa l'Italia ed asiatiche 1933 – 2005
<b>VDC</b> <a href="http://www.strongmotioncenter.org/vdc/scripts/default.plx">http://www.strongmotioncenter.org/vdc/scripts/default.plx</a> <i>Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS)</i>	Regioni extraeuropee + Grecia 1934 – 2014
<b>K-NET</b> <a href="http://www.kyoshin.bosai.go.jp/">http://www.kyoshin.bosai.go.jp/</a> <i>NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)</i>	Giappone 1996 – 2014

la selezione può essere 'parametrizzata' indicando intervalli di

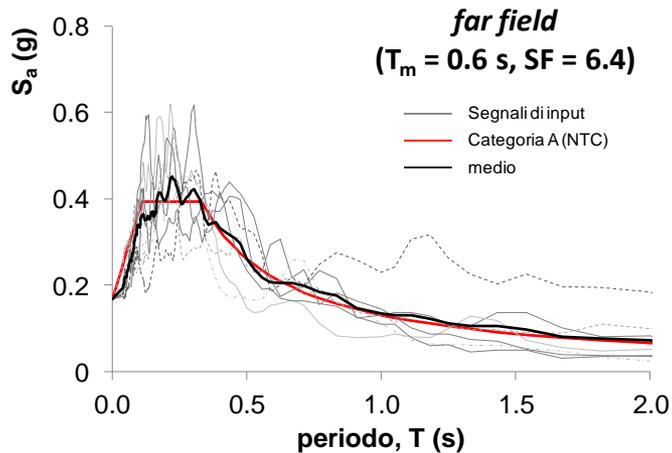
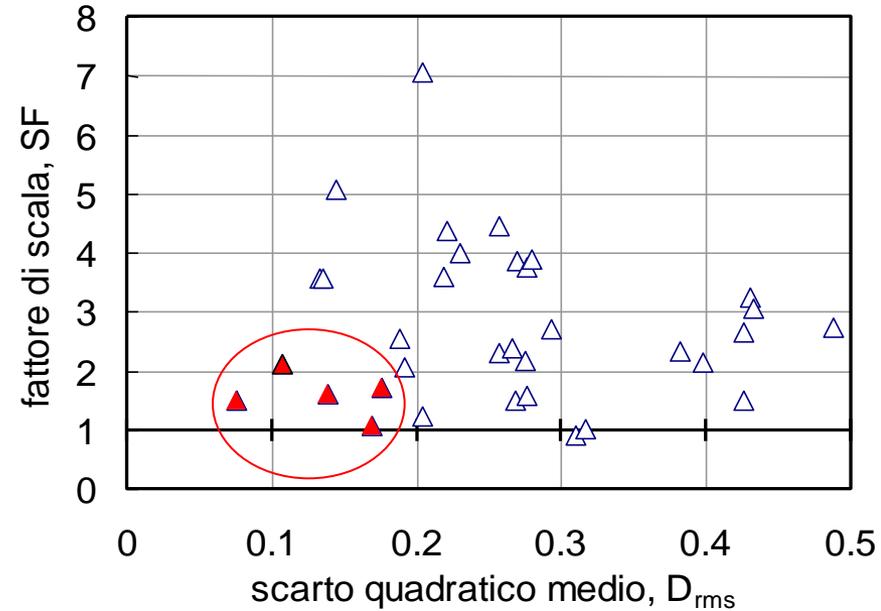
- magnitudo, M
  - distanza, R
  - accelerazione massima,  $a_{\max}$
  - classe di sottosuolo
- ed altre opzioni

Ricerca automatica



$$SF = \frac{a_{sc}}{a_r}$$

Ricerca manuale

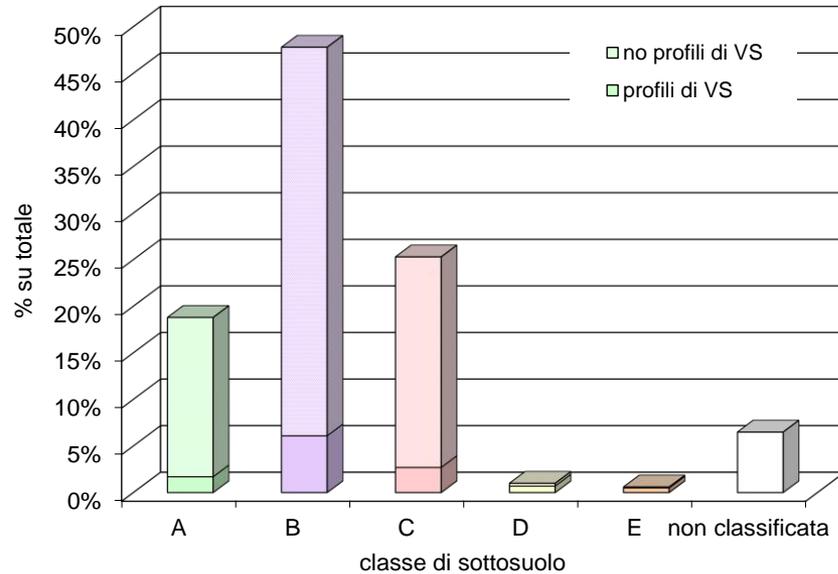


$$D_{rms} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{S_a T_i}{a_g} - \frac{S_{ar} T_i}{a_r} \right)^2}$$

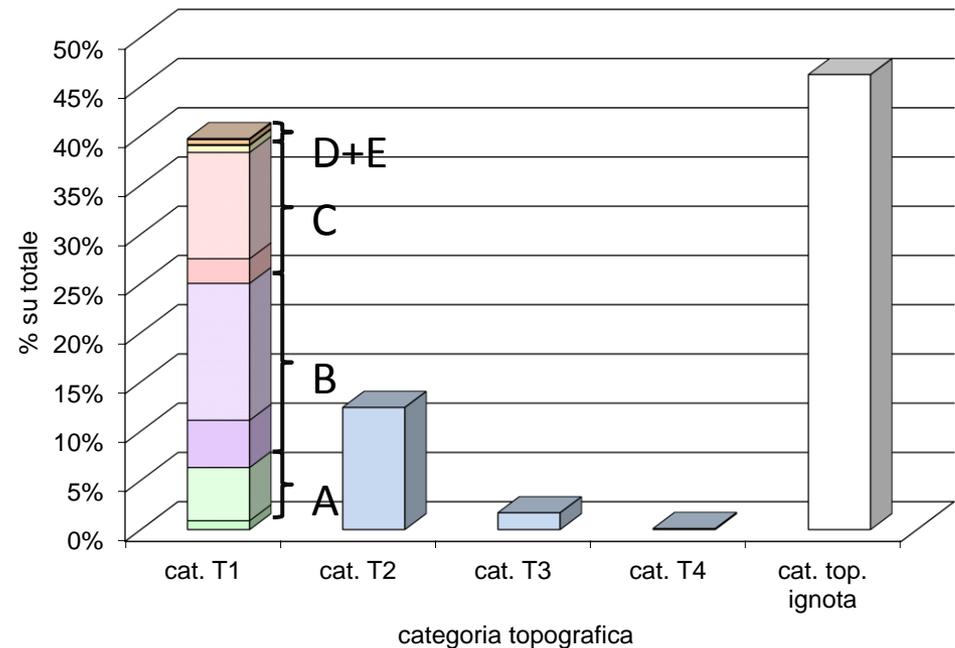
Napoli  
SLV:  $a_g = 0.16g$ ,  $T_R = 475$  anni  
Selezione con il codice REXEL  
(Iervolino et al., 2009)

Diga sul fiume Melito (CZ)  
SLC:  $a_g = 0.50g$ ,  $T_R = 2475$  anni  
Selezione da database ITACA e PEER  
(Costanzo et al., 2011)

# 967 stazioni *database* nazionale ITACA

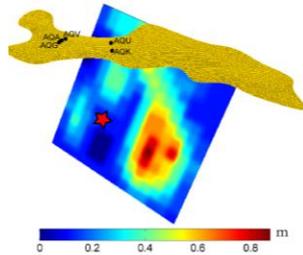


- La gran parte delle stazioni (48%) è su sottosuolo di classe B-B\*
- Solo il 12% delle stazioni è caratterizzato da un profilo di  $V_s$

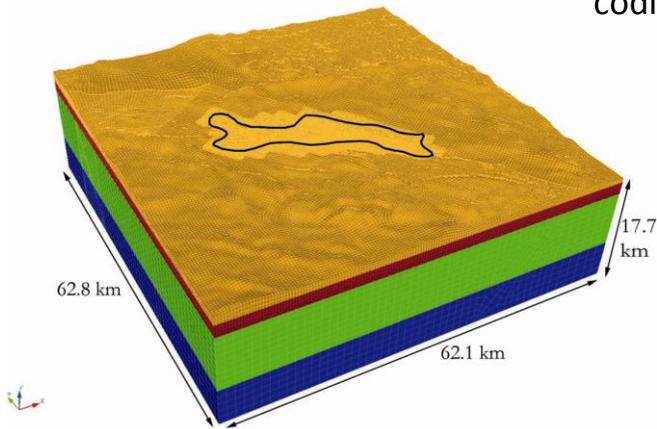


- Solo 1% delle stazioni è installato su affioramento rigido (A) sub-orizzontale (T1)
- Massima accelerazione registrata su sito di riferimento (A+T1) pari a 0.24g

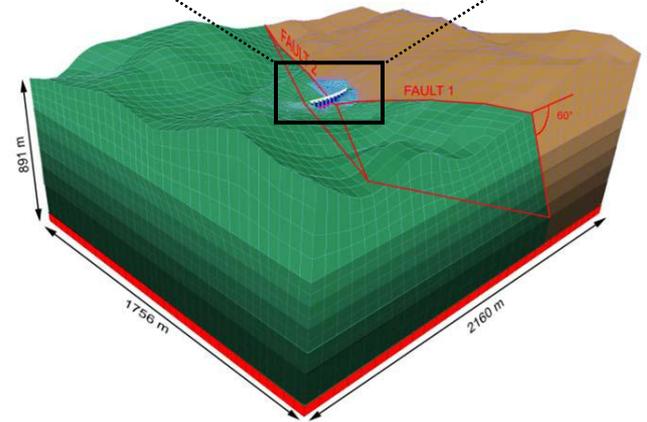
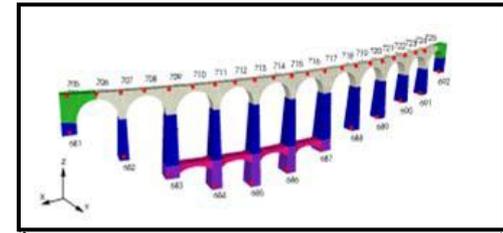
Simulazioni (DSHA) del moto sismico a larga scala integrando sorgente e mezzo di propagazione



codice agli elementi spettrali SPEED  
(Paolucci et al, 2014)



bacino dell'Aterno (Abruzzo)

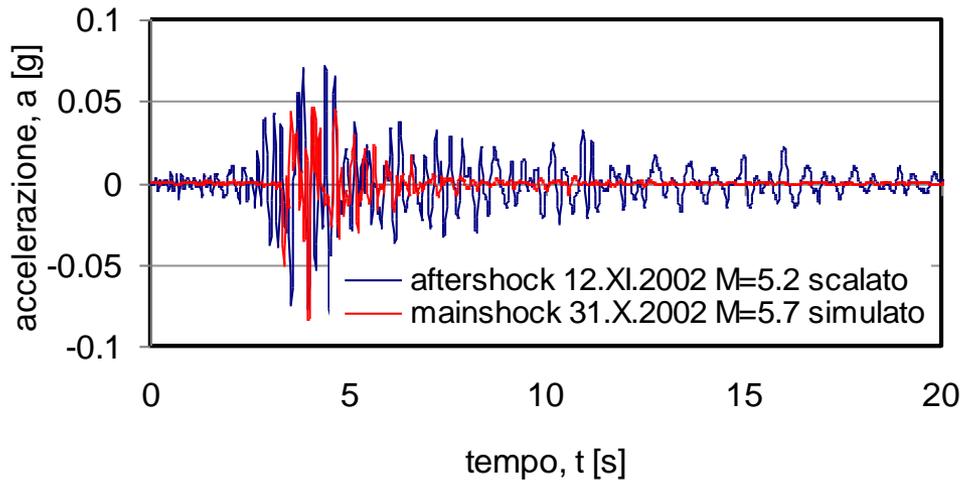


viadotto ferroviario di Acquasanta (Liguria)

Necessarie competenze interdisciplinari e risorse sperimentali/computazionali fuori dal comune

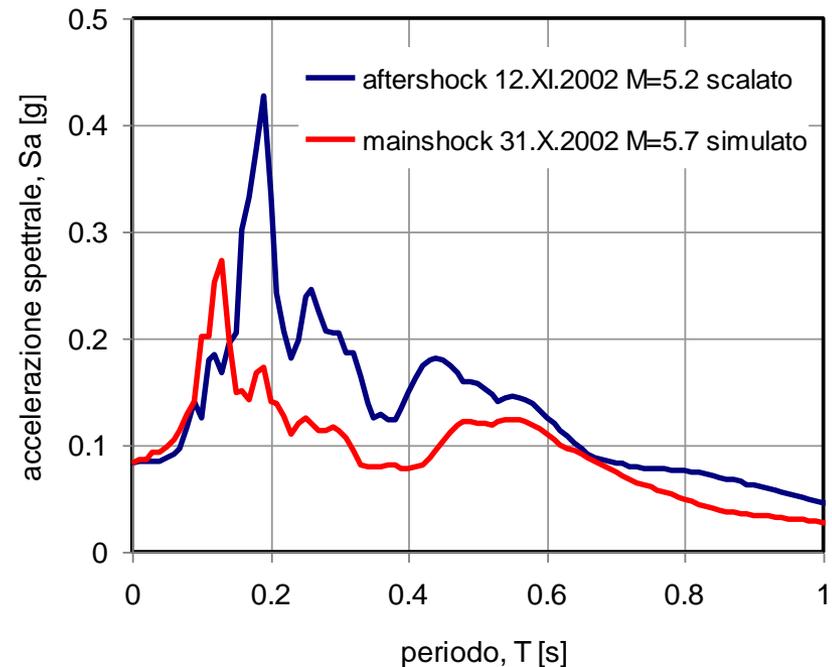
- ☺ considerevole estensione dei domini d'analisi  $\Rightarrow$  scarsa risoluzione alle frequenze più elevate
- ☹ in grado di simulare effetti di campo vicino (*near fault*) e non-sincronismo

Simulazione del *mainshock* del terremoto del Molise a S. Giuliano di Puglia (*Franceschina et al., 2006*): confronto tra un **segnale sintetico** e un **aftershock scalato** alla stessa ampiezza massima



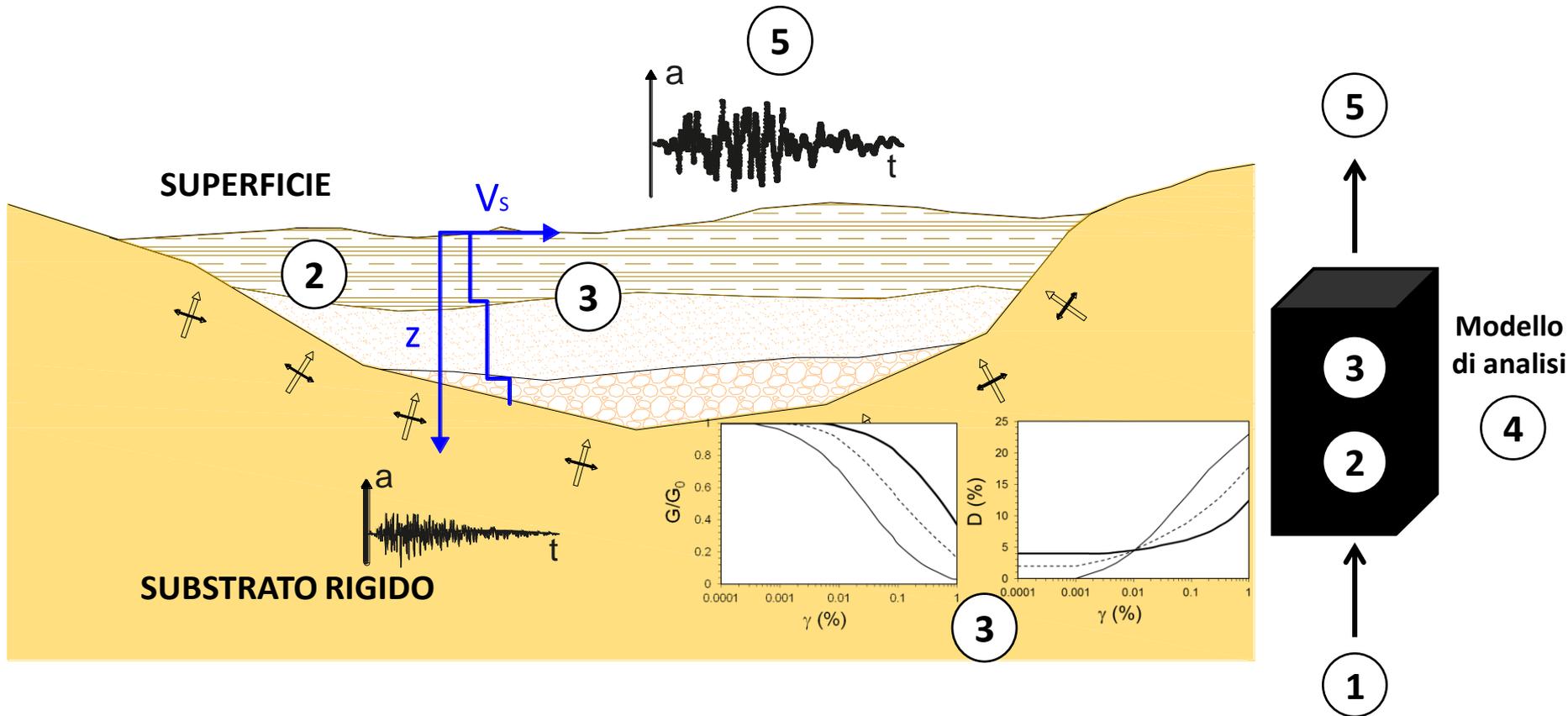
☹ durata degli accelerogrammi piuttosto diversa

😊 analogia tra contenuti in frequenza  $\Rightarrow$  forme spettrali



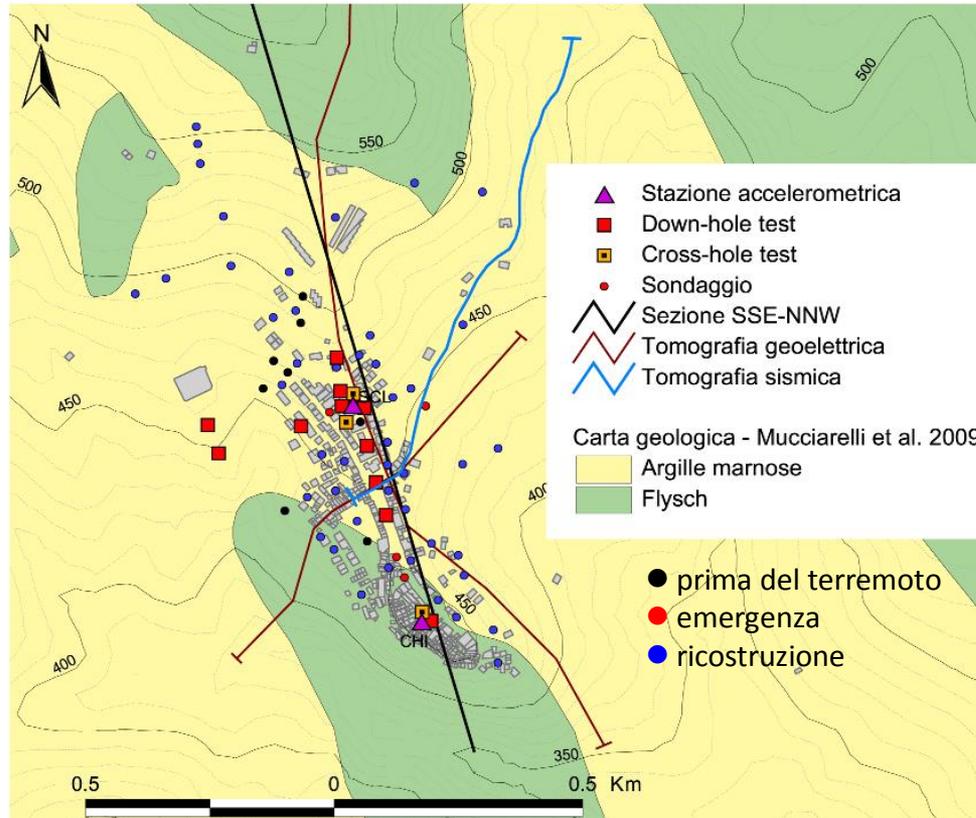
1. Obiettivi e contesto di riferimento
2. La definizione del moto sismico di riferimento
- 3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo**
4. L'affidabilità dei metodi d'analisi
5. Valutazione del danno
6. Conclusioni e prospettive





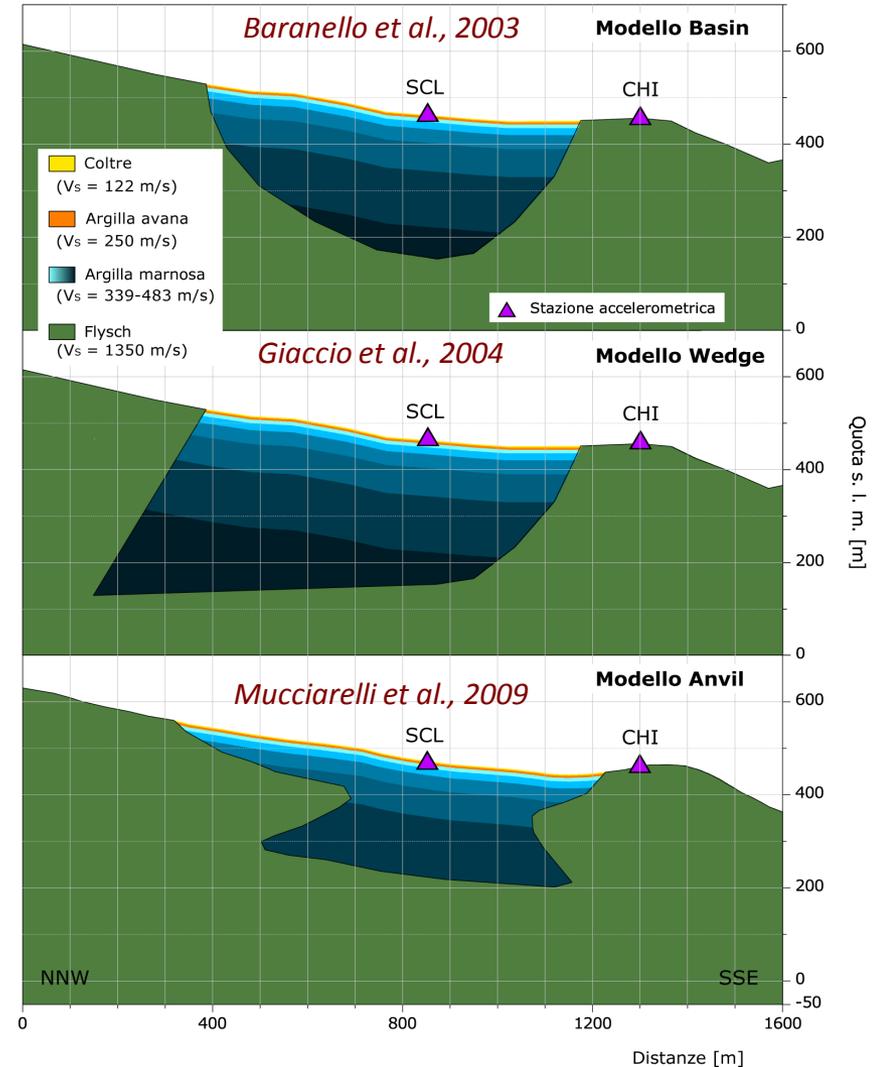
- ① definizione del **moto sismico di riferimento** (accelerogramma)
- ② **modello geometrico di sottosuolo** (stratigrafia, morfologia superficiale e sepolta)
- ③ determinazione sperimentale e modellazione **proprietà meccaniche non lineari**
- ④ **analisi numerica non lineare** della risposta sismica di profili e sezioni
- ⑤ rappresentazione **moto in superficie** mediante accelerogrammi, spettri di risposta etc.

## Carta geologica e distribuzione indagini



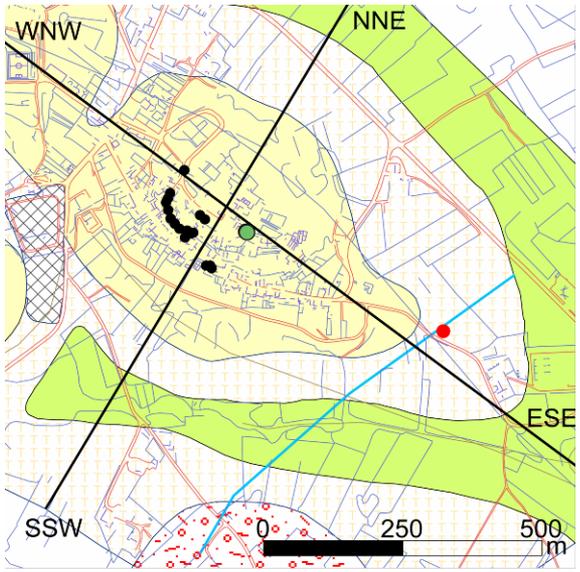
75 sondaggi/km<sup>2</sup> !  
nessuno però raggiunge il substrato (*Puglia, 2008*)

## Ipotesi sulla morfologia del substrato

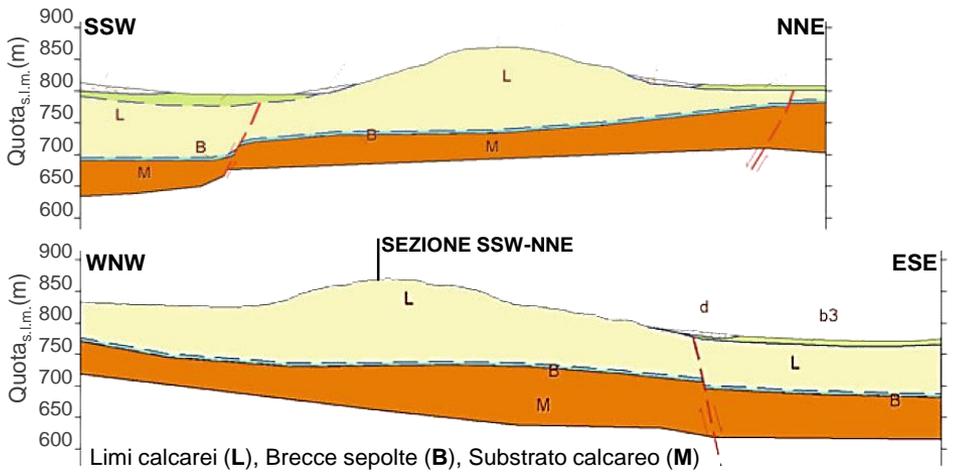


Geometria del substrato ricostruita attraverso indagini geofisiche profonde 'postume'

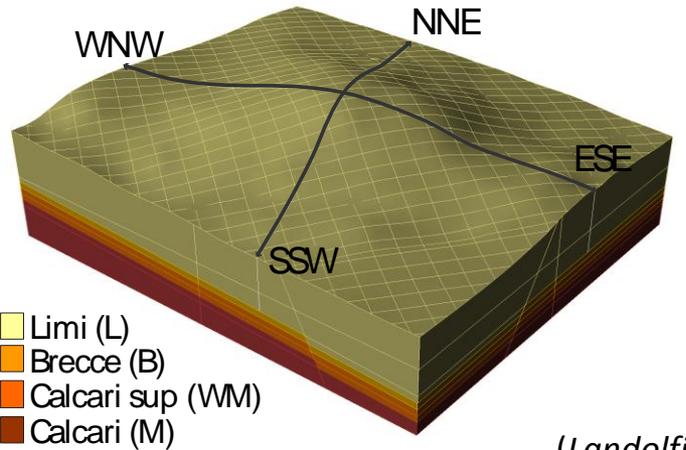
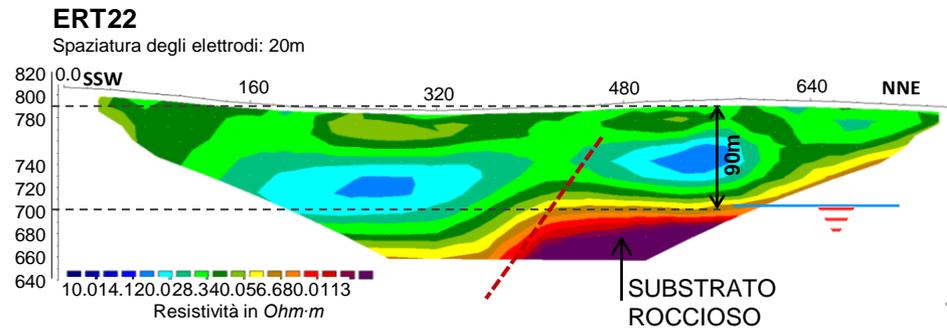
# Morfologia e profondità del *bedrock* - Castelnuovo



- Riporto
- Sondaggi Pre (MS, 2004)
- Cataclasi
- Sondaggi (MS, 2009)
- Sabbie
- HVSr (MS, 2009)
- Limi
- ERT (MS, 2009)
- Alluvioni
- Sezioni (MS, 2009)



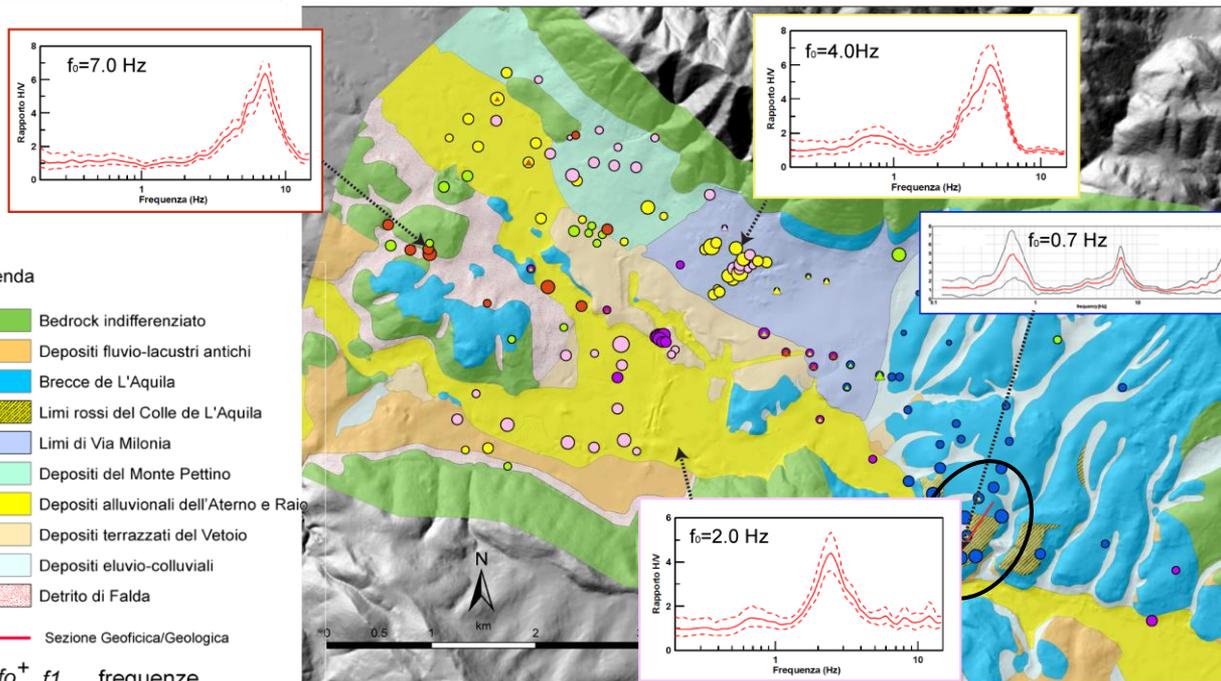
(Lanzo et al., 2011)



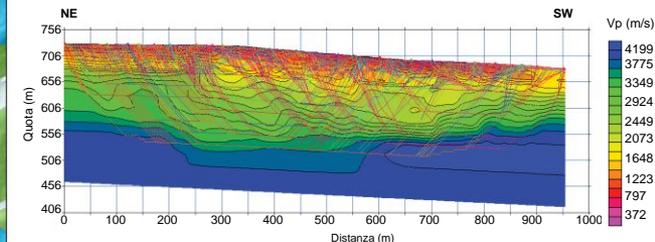
- Limi (L)
- Brecce (B)
- Calcari sup (WM)
- Calcari (M)

(Landolfi, 2013)

Geometria del substrato ricostruita attraverso tomografia geoelettrica profonda (ERT) eseguita per la MS ma un solo sondaggio con prova DH....

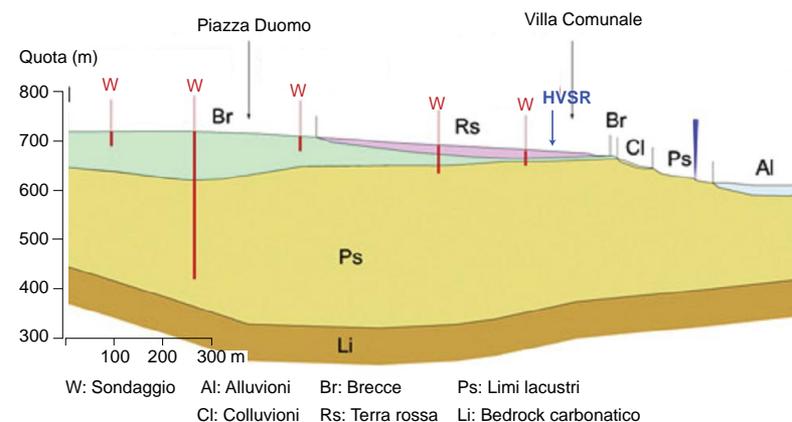


(Gruppo di lavoro MS-AQ, 2010)

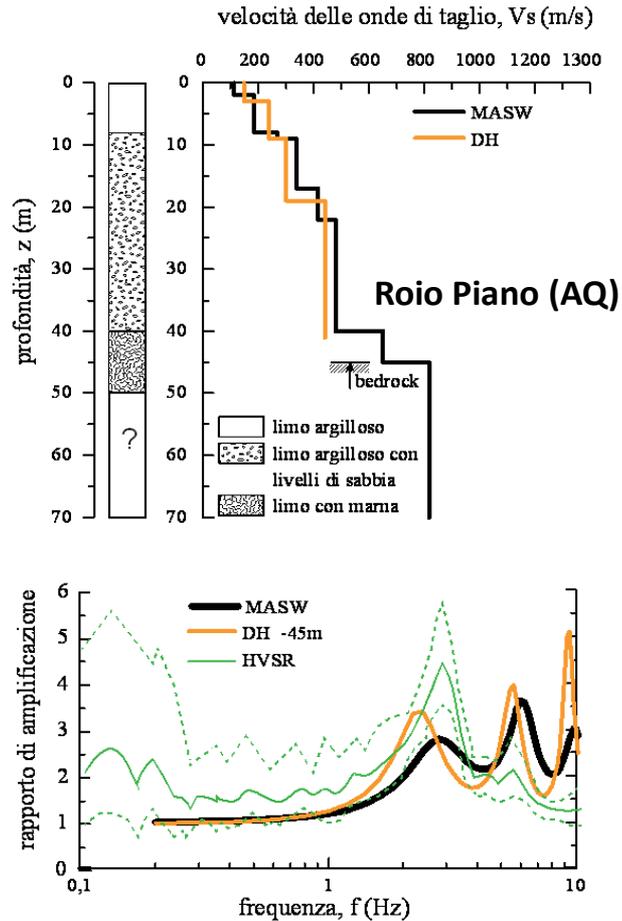


Sezione ricostruita integrando i risultati di:

- Poche indagini geofisiche in foro (CH, SDMT)
- 1 sismica a rifrazione in onde P
- Diffuse misure di rapporti spettrali H/V

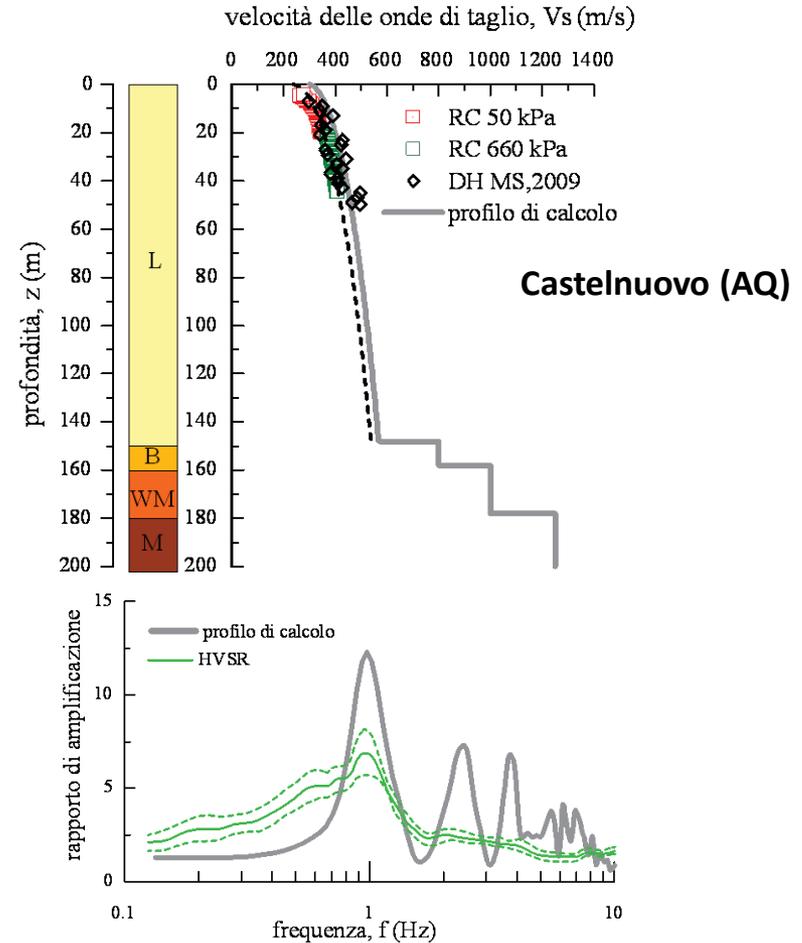


Confronto tra rapporti spettrali H/V  
e funzioni di amplificazione da analisi RSL lineari  
basate su profili di velocità DH e MASW



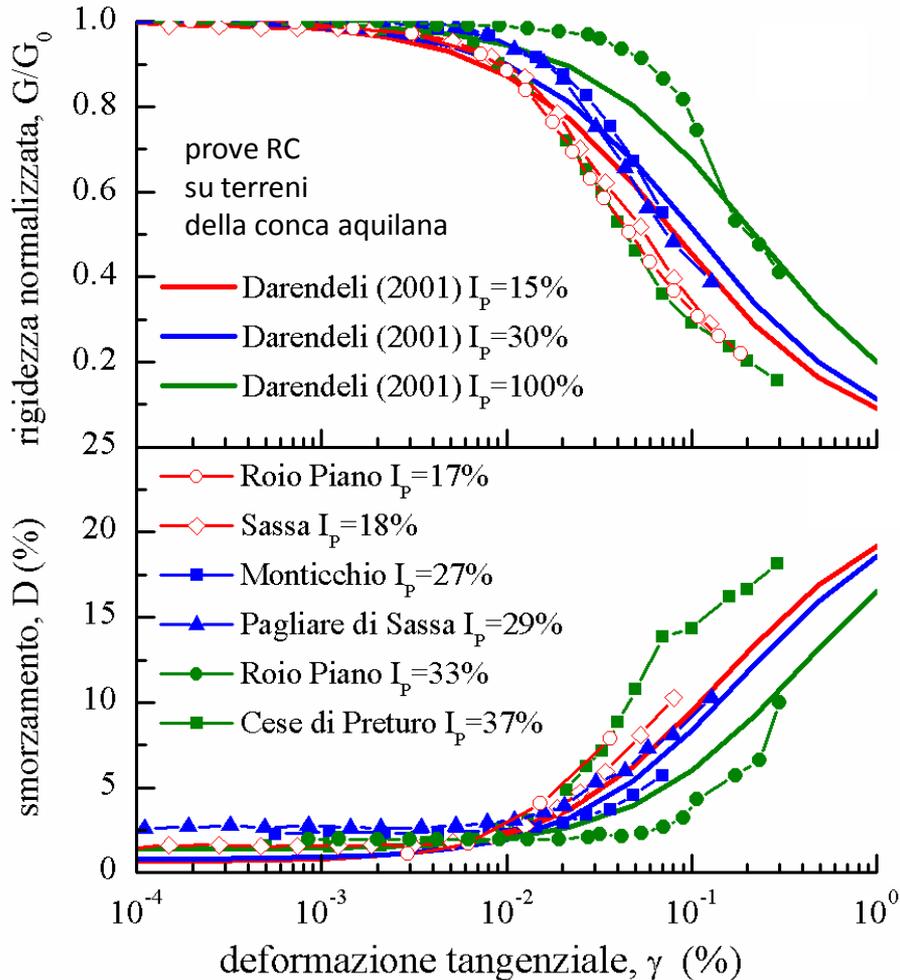
Determinazione profondità del *bedrock*  
e validazione profilo di velocità  
(Santucci de Magistris et al., 2013)

Estrapolazione delle misure in sito  
adottando la legge di variazione  $G_0:p'$   
misurata nelle prove di laboratorio

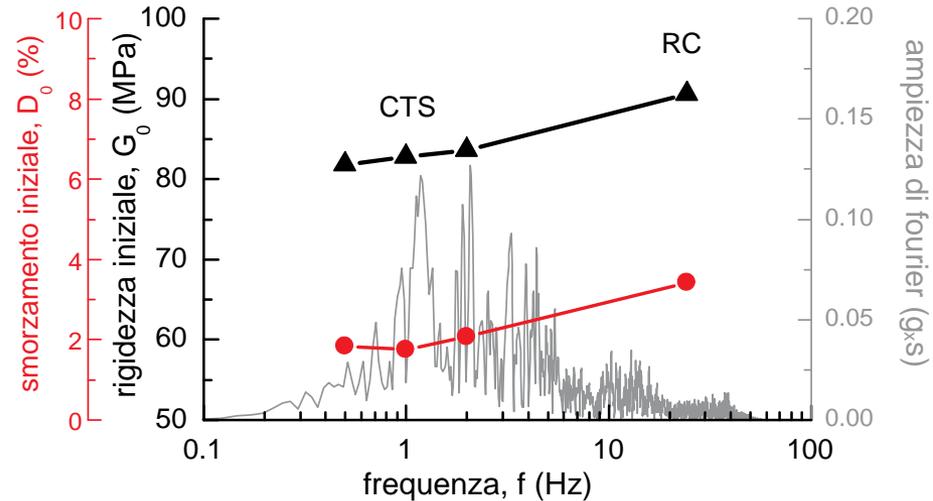


Validazione modello di velocità  $V_s:z$  con HVSr  
(Landolfi, 2013)

Curve  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  di letteratura non sempre riescono a descrivere con attendibilità la varietà e la complessità del comportamento non lineare e dissipativo dei terreni naturali



Rigidezza e smorzamento a basse deformazioni dipendono significativamente dalla frequenza di applicazione dei carichi



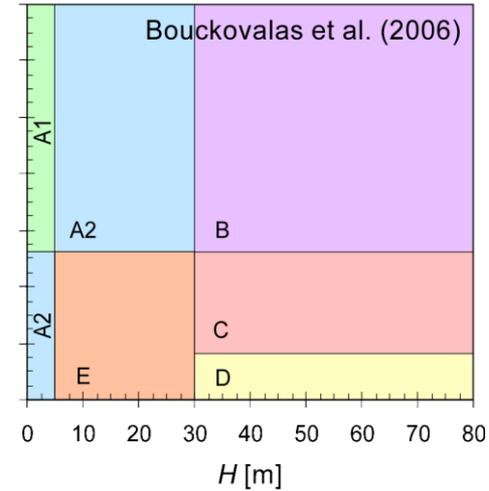
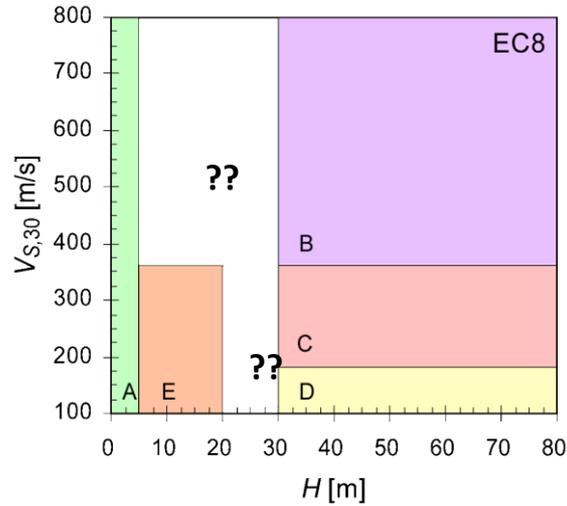
Questa dipendenza non dovrebbe essere trascurata nelle analisi di risposta locale!

1. Obiettivi e contesto di riferimento
2. La definizione del moto sismico di riferimento
3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo
- 4. L'affidabilità dei metodi d'analisi**
5. Valutazione del danno
6. Conclusioni e prospettive

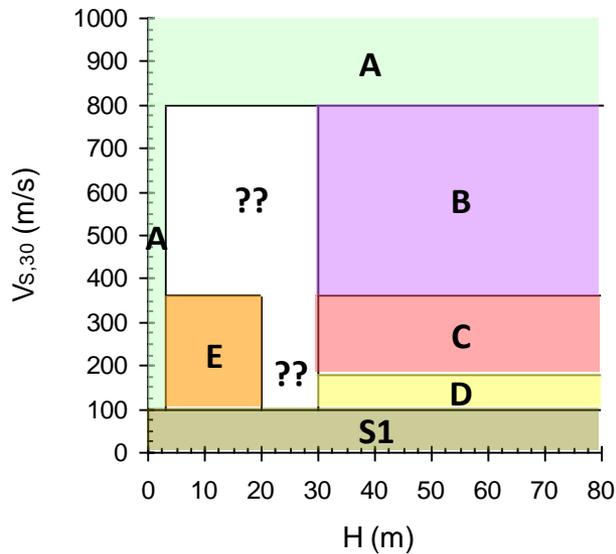


# Analisi semplificata dell'amplificazione locale

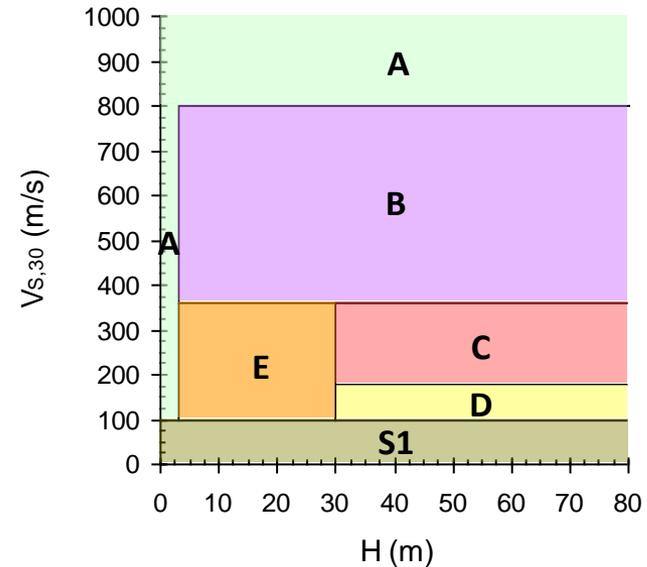
classificazione del sottosuolo mediante  $V_{s,30}$  e profondità del *bedrock*



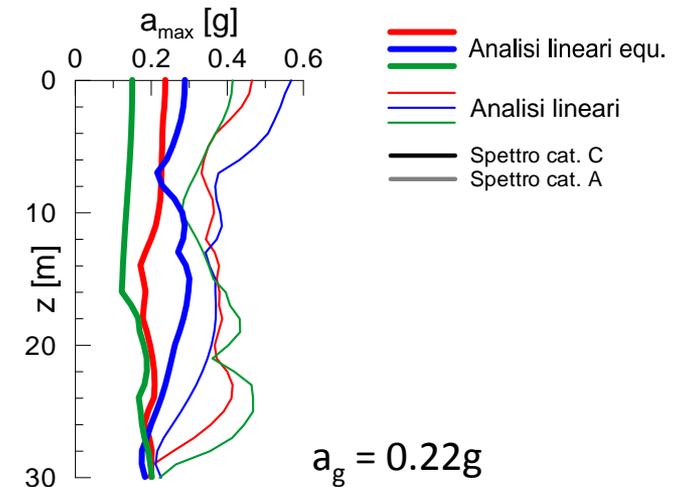
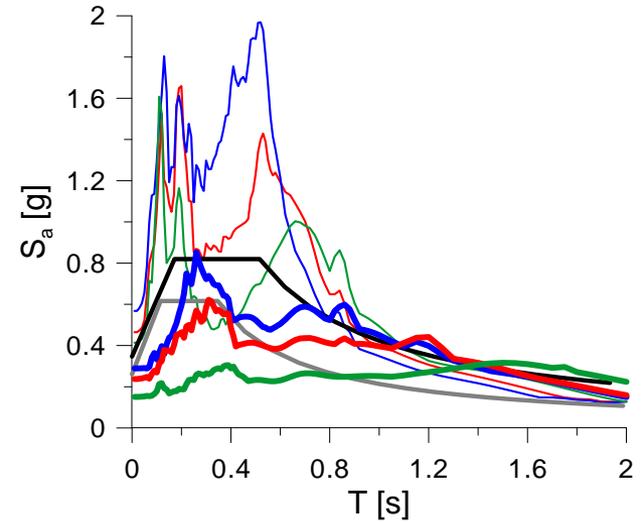
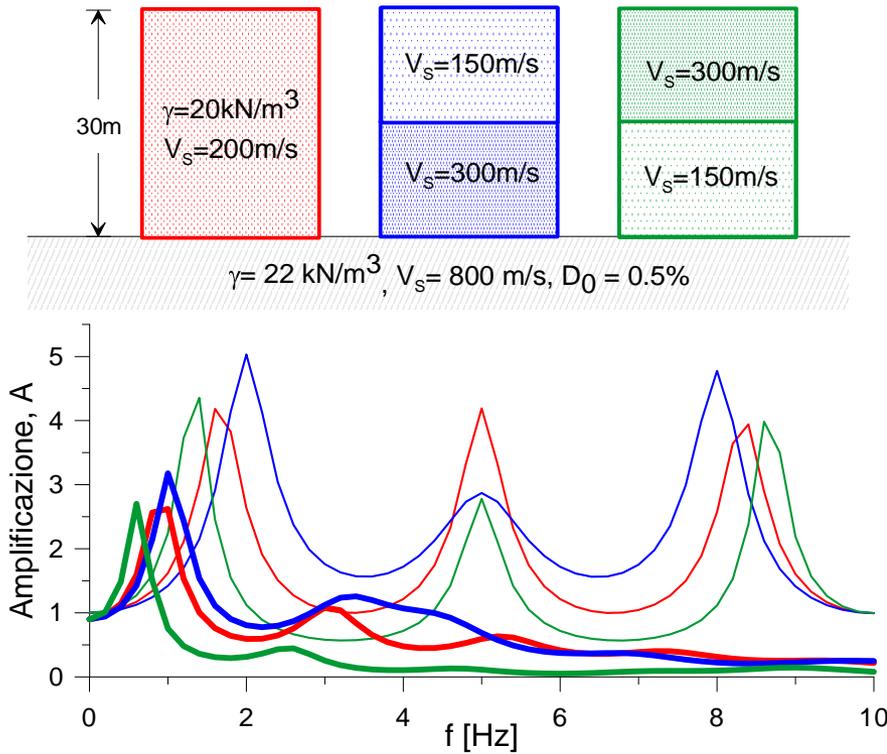
## NTC 2008



## Revisione NTC?

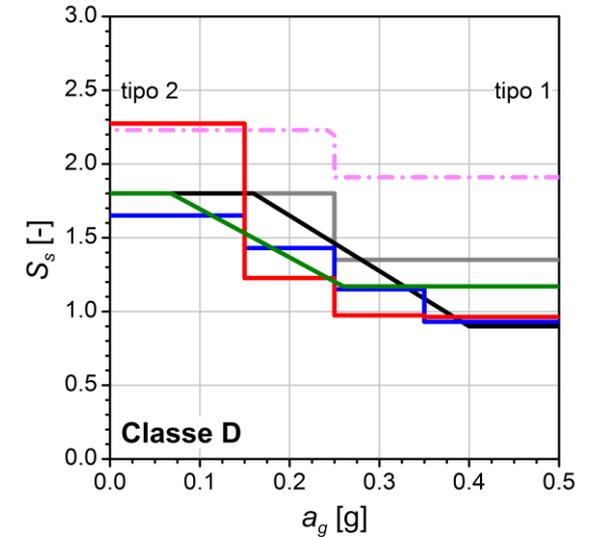
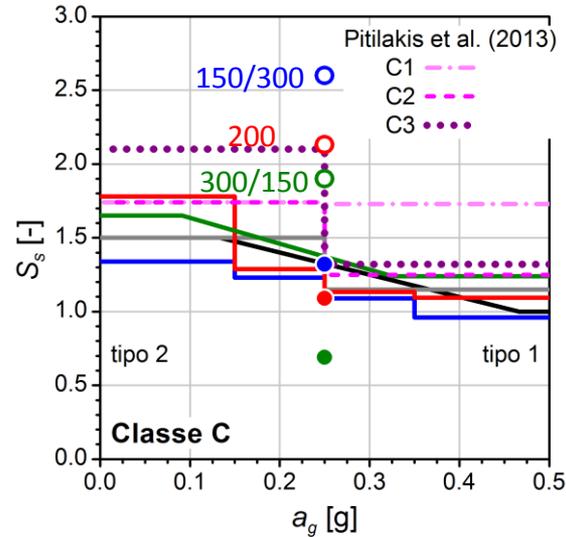
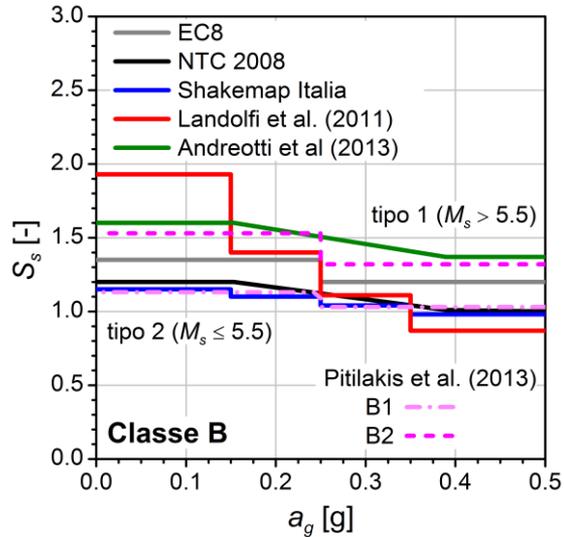


Profili con pari  $V_{S30} = 200 \text{ m/s} \Rightarrow$  classe C

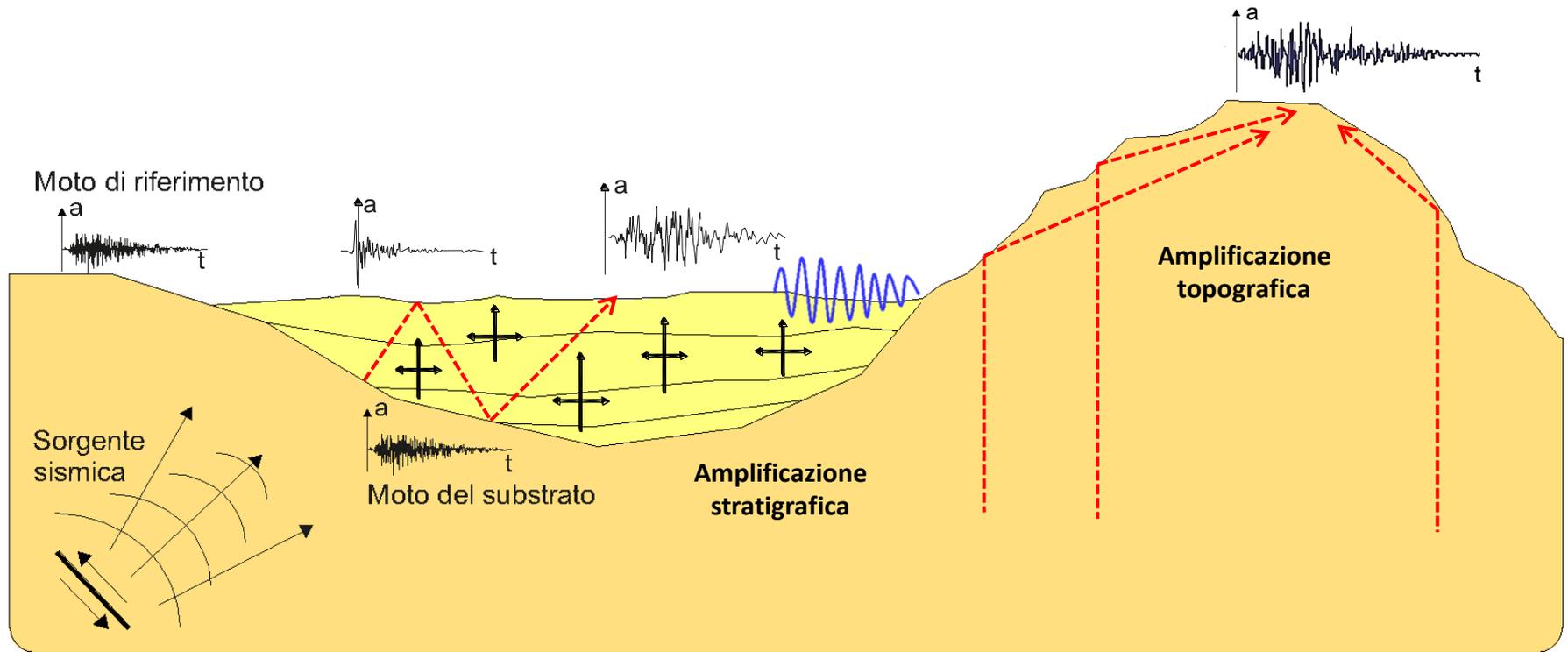


Modello $V_s$	$S_S$ NTC	$S_S$ non lineari
200		1.09
150/300	1.33	1.32

Aumento effetti non lineari  $\Rightarrow$  coefficienti e spettri RSL meno cautelativi rispetto a NTC in misura diversa a seconda della geometria del profilo di  $V_s$



- In ognuno degli approcci è portato in conto l'effetto della non-linearità
- Gli studi più aggiornati indicano  $S_s$  superiori vs gli approcci codificati (EC8, NTC, Shakemap)
- Proposte di classificazioni basate su ( $V_s$ ,  $H$ ,  $f_0$ ) → effetti non lineari?



Effetti geometrici 2D e 3D proporzionali al **fattore di forma H/L**

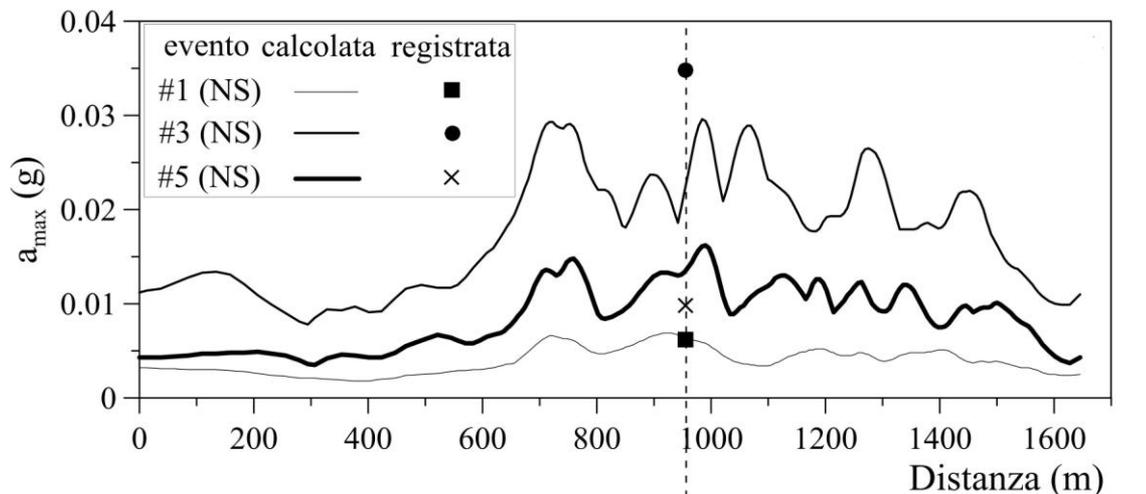
Amplificazione stratigrafica:

- **riflessioni** multiple e **diffrazione**
- **conversione** di onde di volume in onde di superficie

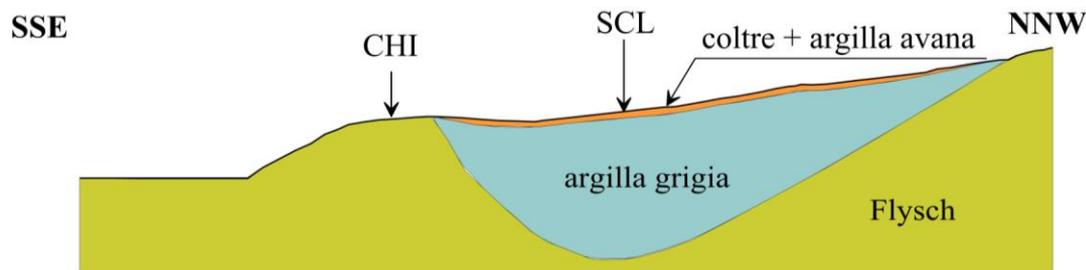
Amplificazione topografica:

- **focalizzazione** di onde incidenti e riflesse
- **risonanza** del rilievo

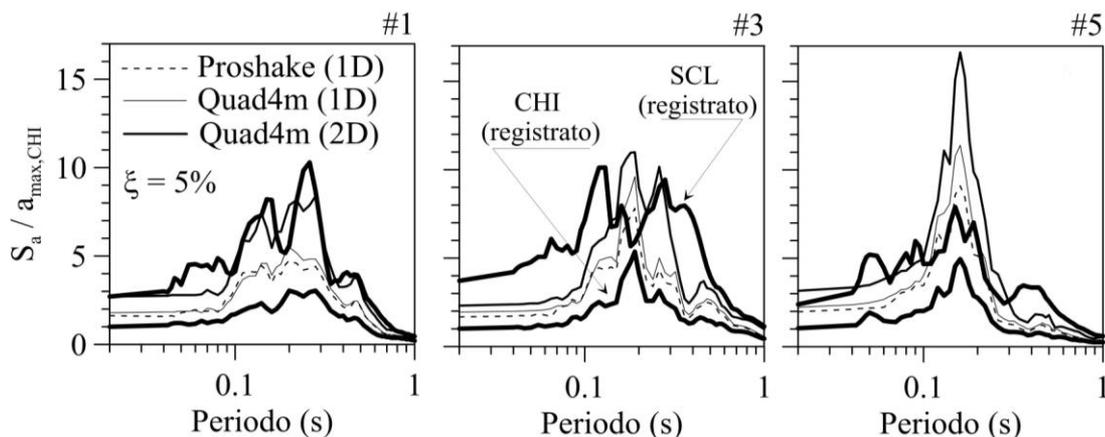
In genere: **aumento di ampiezza e durata** rispetto alla propagazione 1D



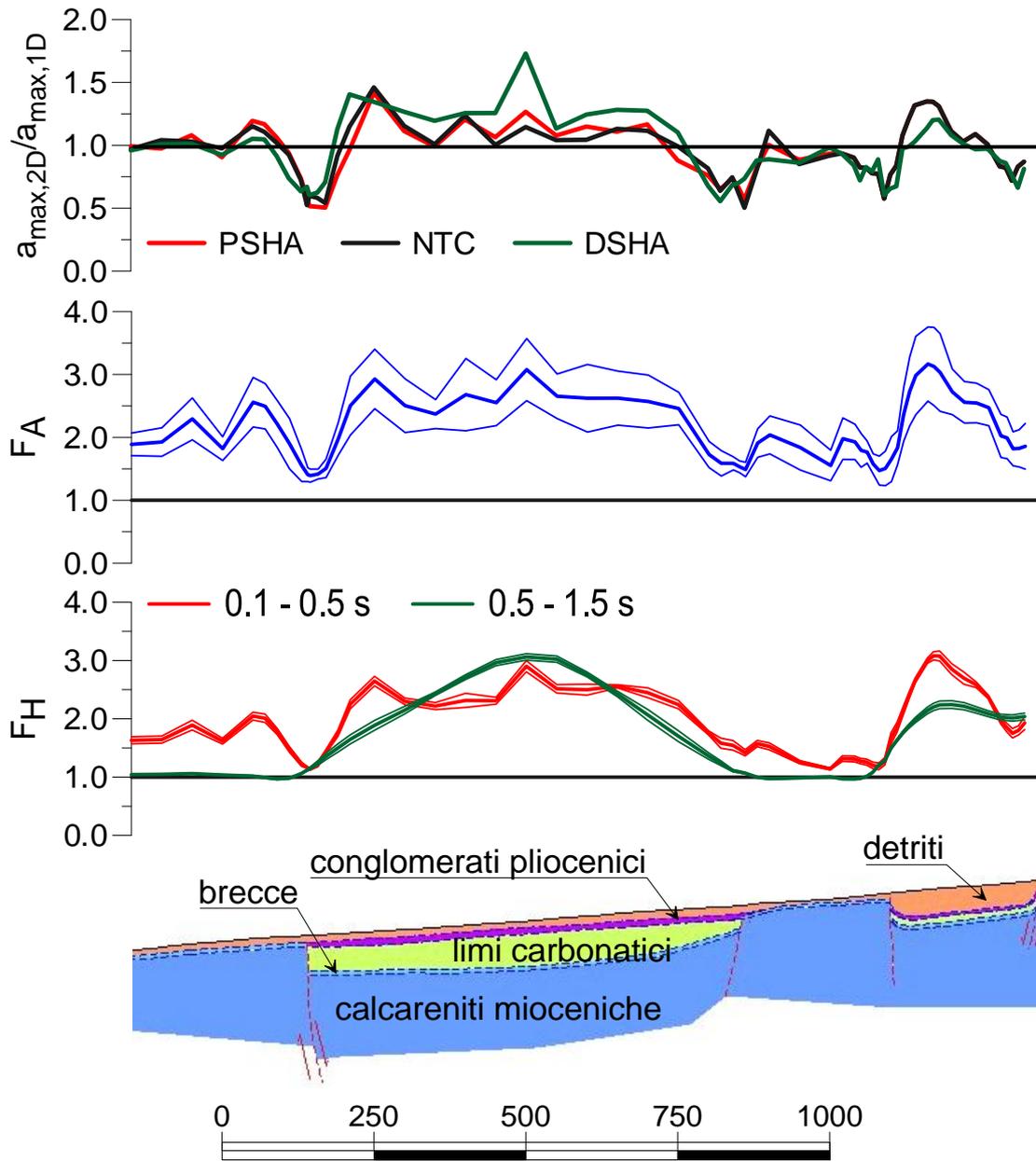
validazione analisi 2D:  
registrazioni *aftershocks*  
stazione SCL



moto di riferimento:  
registrazioni *aftershocks*  
stazione CHI



effetti 2D di bacino  
non colti dalle analisi 1D

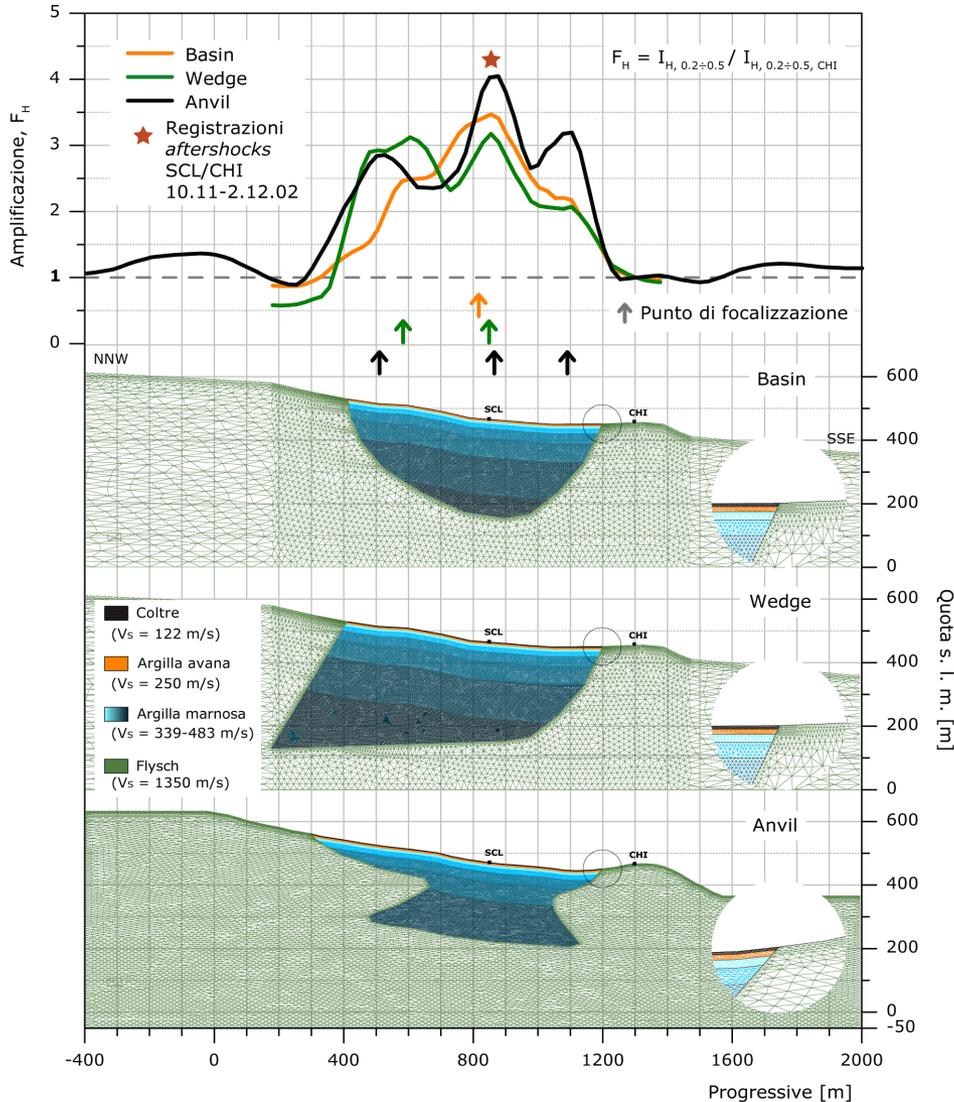


Effetti 2D più marcati  
in corrispondenza di depressioni *bedrock*  
e contatti subverticali

Fattori amplificazione  $a_{\max}$   
dipendenti dal moto di riferimento

Fattori amplificazione  $I_H$   
indipendenti dal moto di riferimento  
e variabili con intervalli di periodo

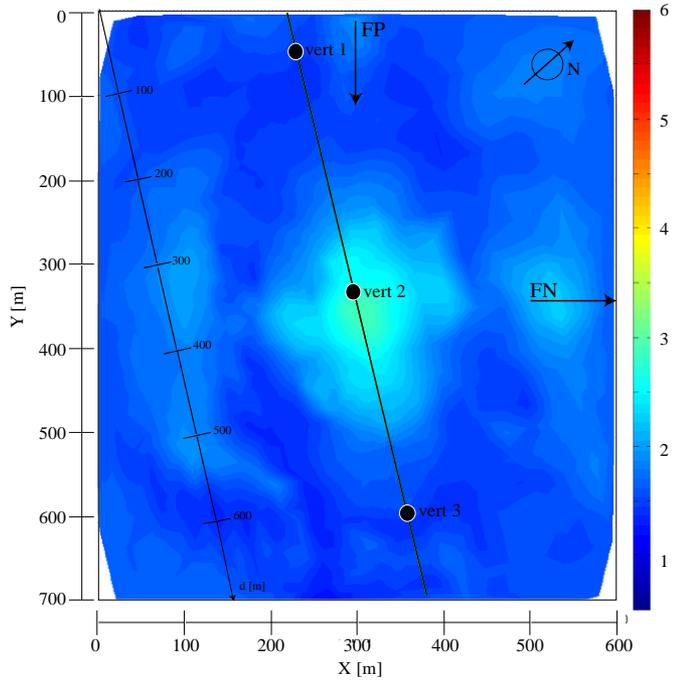
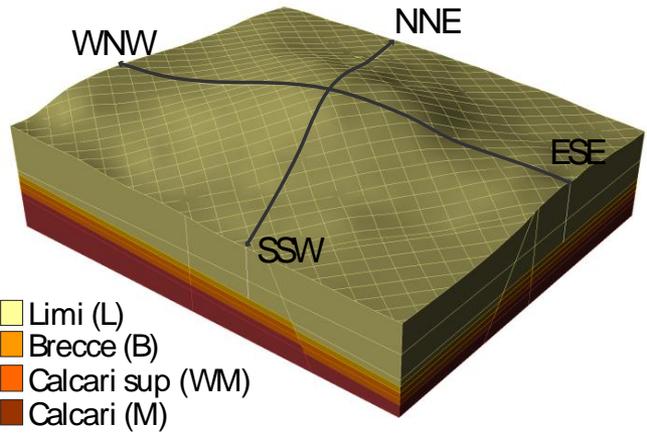
## Influenza della morfologia del *bedrock* sulla risposta in superficie



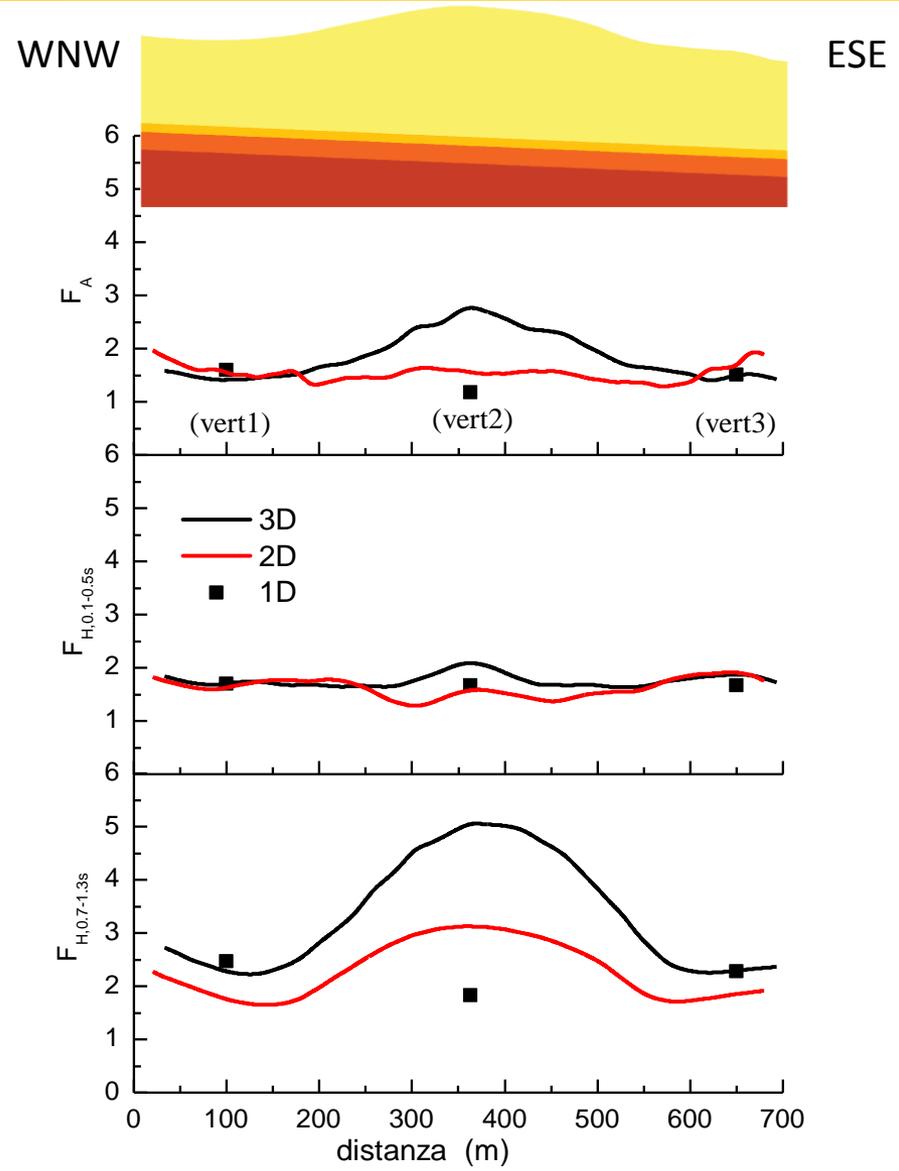
Moto di riferimento:  
registrazioni *aftershocks* stazione CHI

Validazione modello FEM 2D  
su registrazioni *aftershocks* stazione SCL

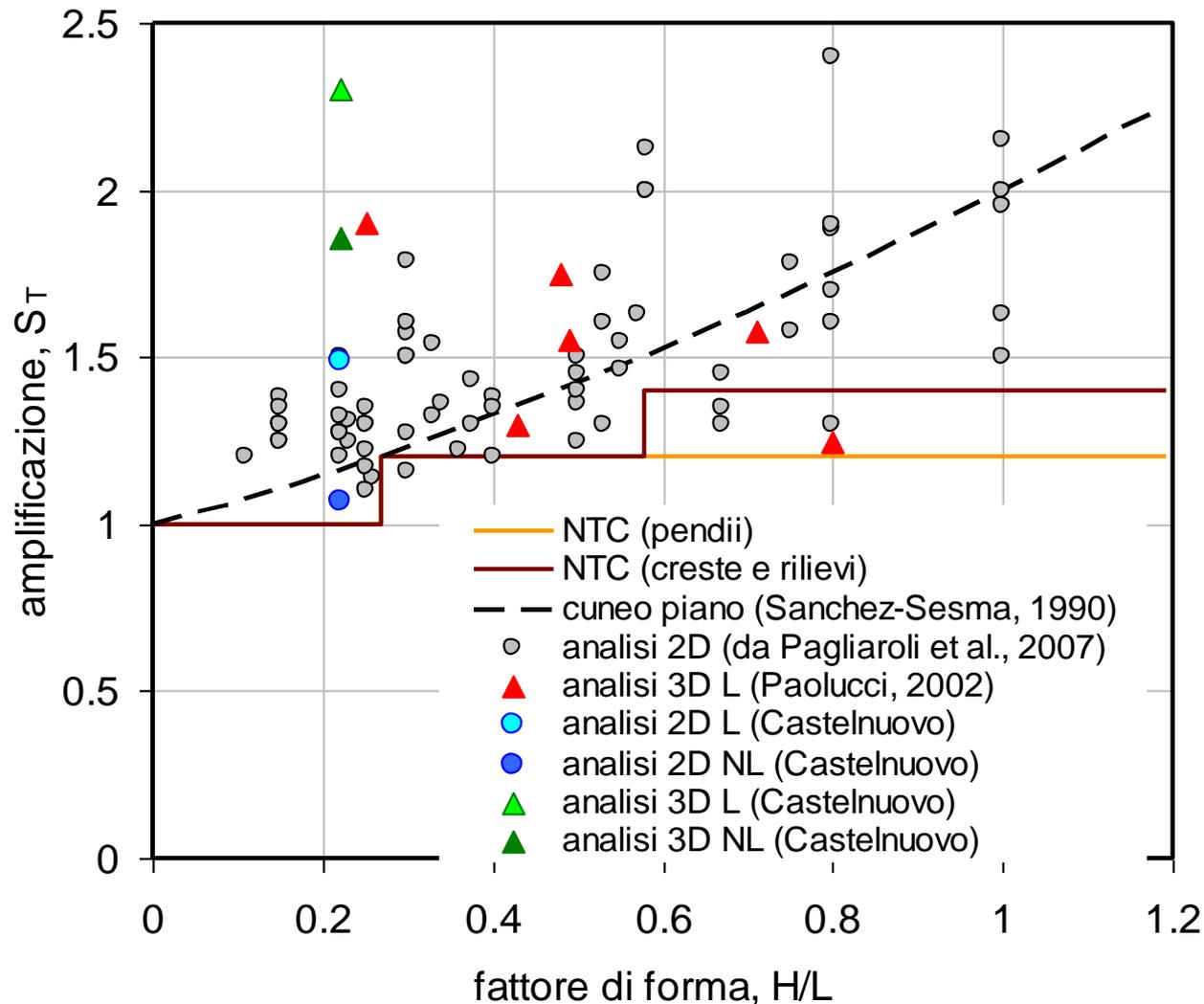
Geometria <i>bedrock</i>	focalizzazione
Basin:	1 punto
Wedge:	2 punti
Anvil:	3 punti



Contour di  $F_A$  da analisi 3D non lineari



Amplificazione 3D > 2D > 1D e funzione del campo di frequenza



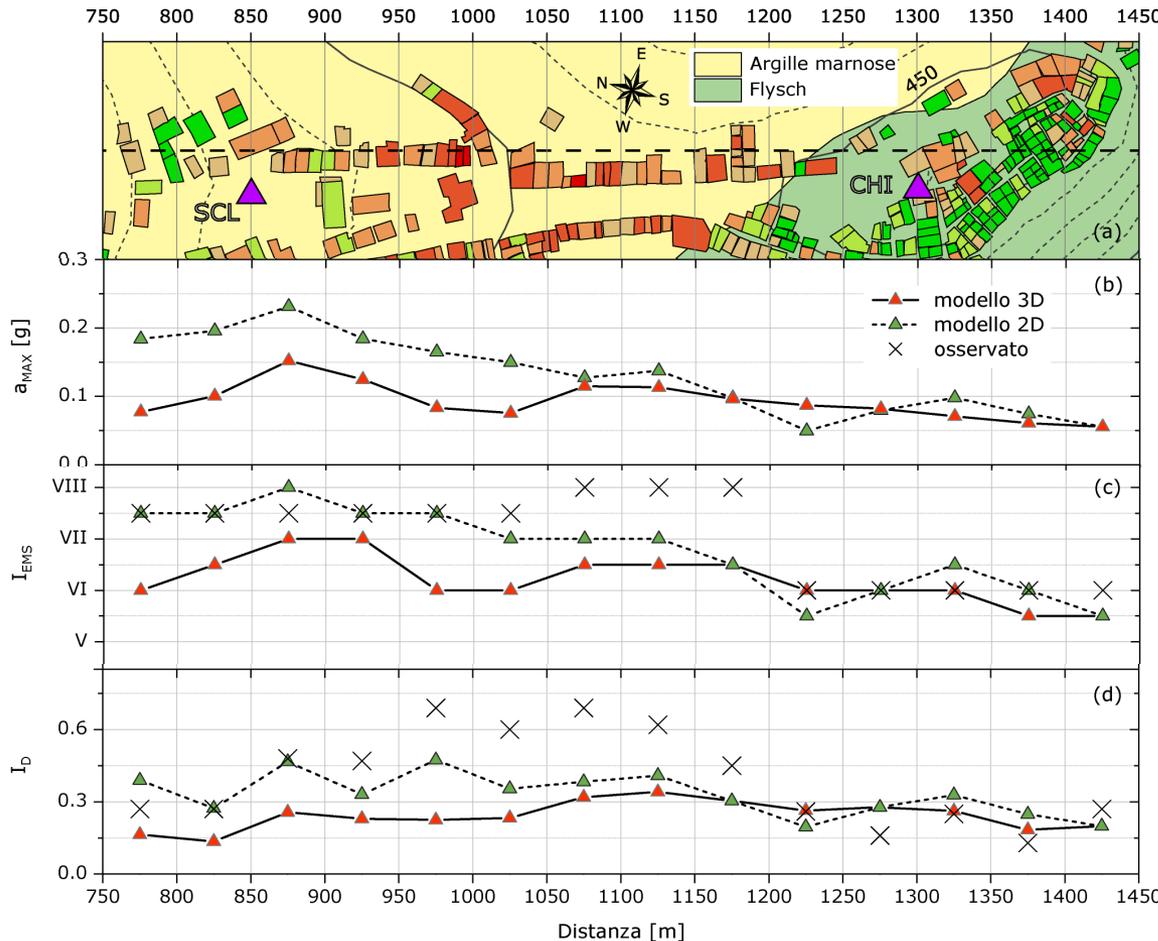
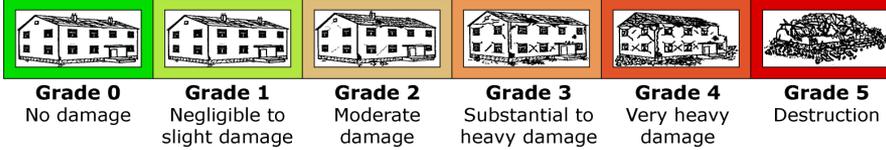
- Coefficienti  $S_T$  di NTC (e EC8) poco cautelativi rispetto a modelli e dati di letteratura
- Amplificazioni 3D più disperse perché dipendenti da fattori geometrici più complessi
- Analisi lineari eccessivamente cautelative

1. Obiettivi e contesto di riferimento
2. La definizione del moto sismico di riferimento
3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo
4. L'affidabilità dei metodi d'analisi
- 5. Valutazione del danno**
6. Conclusioni e prospettive



## San Giuliano di Puglia: interpretazione scenario di danno edifici (terremoto del 31.X.2002, $M_w=5.7$ )

EMS98 damage



Distribuzione danni osservati  
(classifica EMS98)

Accelerazioni massime simulate  
da analisi con modelli 2D e 3D



$$I_{EMS} = f(a_{max})$$



Confronto tra  $I_{EMS}$  osservata e prevista



$$I_D = f(I_{EMS}, DPM)$$



Confronto tra  $I_D$  osservato e previsto  
(DPM = matrici di probabilità di danno)

1. Obiettivi e contesto di riferimento
2. La definizione del moto sismico di riferimento
3. Criticità nella definizione del modello di sottosuolo
4. L'affidabilità dei metodi d'analisi
5. Valutazione del danno
6. **Conclusioni e prospettive**



### Parametri sintetici del moto

- Le **ampiezze del moto** fornite dalle MPS ( $a_g, S_a(T)$ ) sono sufficienti per le **sole analisi pseudo-statiche**

### Accelerogrammi

- Le **banche dati nazionali** per la selezione di **accelerogrammi registrati** sono penalizzate dalla **scarsità di stazioni** su **siti di riferimento** e/o adeguatamente caratterizzati
- Le **banche dati internazionali** arricchiscono il *database* disponibile per procedure automatiche di estrazione di **segnali naturali spettrocompatibili**, ma è opportuno sottoporre le selezioni a ulteriori verifiche di **compatibilità con i parametri integrali**
- Gli **accelerogrammi simulati** con modelli a larga scala, utili per tener conto di effetti *near-fault* e del non-sincronismo, andrebbero validati dal confronto con segnali registrati in eventi analoghi

### Indagini in sito

- Le indagini dirette (**sondaggi**) sono uno strumento necessario a garantire l'**accuratezza del modello**, ma non sufficiente a definirlo con **completezza**, soprattutto per la **morfologia profonda** (*bedrock*)
- A tal fine, le **indagini geofisiche profonde** (sismica, gravimetrica, magnetometrica, geoelettrica), tendenzialmente a carico delle amministrazioni locali o dei gestori di grandi infrastrutture, potrebbero costituire **database locali accessibili** ad altri soggetti pubblici e privati
- I **rapporti spettrali empirici** (es. HVSR) contribuiscono a **completare e validare il modello di sottosuolo** ma non sono di per sé sufficienti a definirlo

### Prove di laboratorio

- Impossibile prescindere dalle **prove di laboratorio** per qualunque **analisi dinamica di RSL!**

## Modelli di analisi

- L'analisi semplificata della RSL (classificazione stratigrafica e topografica) può essere basata su **indicatori più articolati** di quelli attualmente previsti da NTC e EC8
- La combinazione tra **amplificazione stratigrafica e topografica** risulta particolarmente complessa, dipendente da **frequenza** e da **non linearità**, fattori solo parzialmente considerati da NTC e EC8. I coefficienti  $S_S$  e  $S_T$  si dimostrano spesso **poco cautelativi!**

## Nuove frontiere

- Includere nelle **analisi di scenario** la **stima affidabilistica del danno** attraverso modelli razionali o empirici ('**curve di fragilità**') purché 'fisicamente basati' e suffragati da **osservazioni su prototipi o modelli fisici**

**GRAZIE** alla 'compagna di banco' **Anna d'Onofrio** nonchè a:

- I dottori di ricerca:

**Antonio Costanzo** (INGV-CS)

**Lorenza Evangelista** (CNR-IAMC)

**Augusto Penna** (UniNa)

**Rodolfo Puglia** (INGV-MI)

**Giuseppe Tropeano** (UniCa)

- Le dottorande:

**Anna Chiaradonna**

**Filomena de Silva**

**Valeria Licata**

# WORKSHOP ON VOLCANIC ROCKS & SOILS

24-25 Settembre 2015 Ischia



Organizzato da



Con il patrocinio di



[www.wvrs-ischia2015](http://www.wvrs-ischia2015)

# WORKSHOP ON VOLCANIC ROCKS & SOILS

24-25 Settembre 2015 - Ischia

## TEMI

**Caratterizzazione geotecnica in campo statico e ciclico/dinamico, con particolare attenzione alla relazione con i caratteri strutturali alle diverse scale:**

- classificazioni tecniche
- caratteri microstrutturali
- caratterizzazione in laboratorio e in sito
- materiali da costruzione

**Aspetti geotecnici del rischio da eventi naturali:**

- stabilità dei pendii
- rischio sismico**
- stabilità di fianchi di vulcani attivi

**Problemi geotecnici di opere di ingegneria:**

- fondazioni
- rilevati e dighe
- scavi e opere di sostegno
- gallerie

# WORKSHOP ON VOLCANIC ROCKS & SOILS

24-25 Settembre 2015 - Ischia

## Date da ricordare

Invio dei sommari:	<b>8 dicembre, 2014</b>
--------------------	-------------------------

Accettazione dei sommari:	<b>Fine 2014</b>
---------------------------	------------------

Invio delle note:	<b>15 Marzo, 2015</b>
-------------------	-----------------------

Accettazione delle note:	<b>30 Aprile, 2015</b>
--------------------------	------------------------