



REMTECH EXPO

GEOSSIMICA

Early Warning Sismico per Reti Ferroviarie

Giulio Iervolino, professore di Ingegneria Sismica, Università degli Studi di Napoli Federico II

STATI GENERALI DELL'INGEGNERIA DEL TERRITORIO. DIAGNOSTICA,
MONITORAGGIO, RISCHIO IDROGEOLOGICO, OPERE IDRAULICHE, RISCHIO

IDRAULICO E RISCHIO SISMICO

19 settembre 2019

RemTech Expo 2019 (18, 19, 20 Settembre) FerraraFiere

www.remtechexpo.com

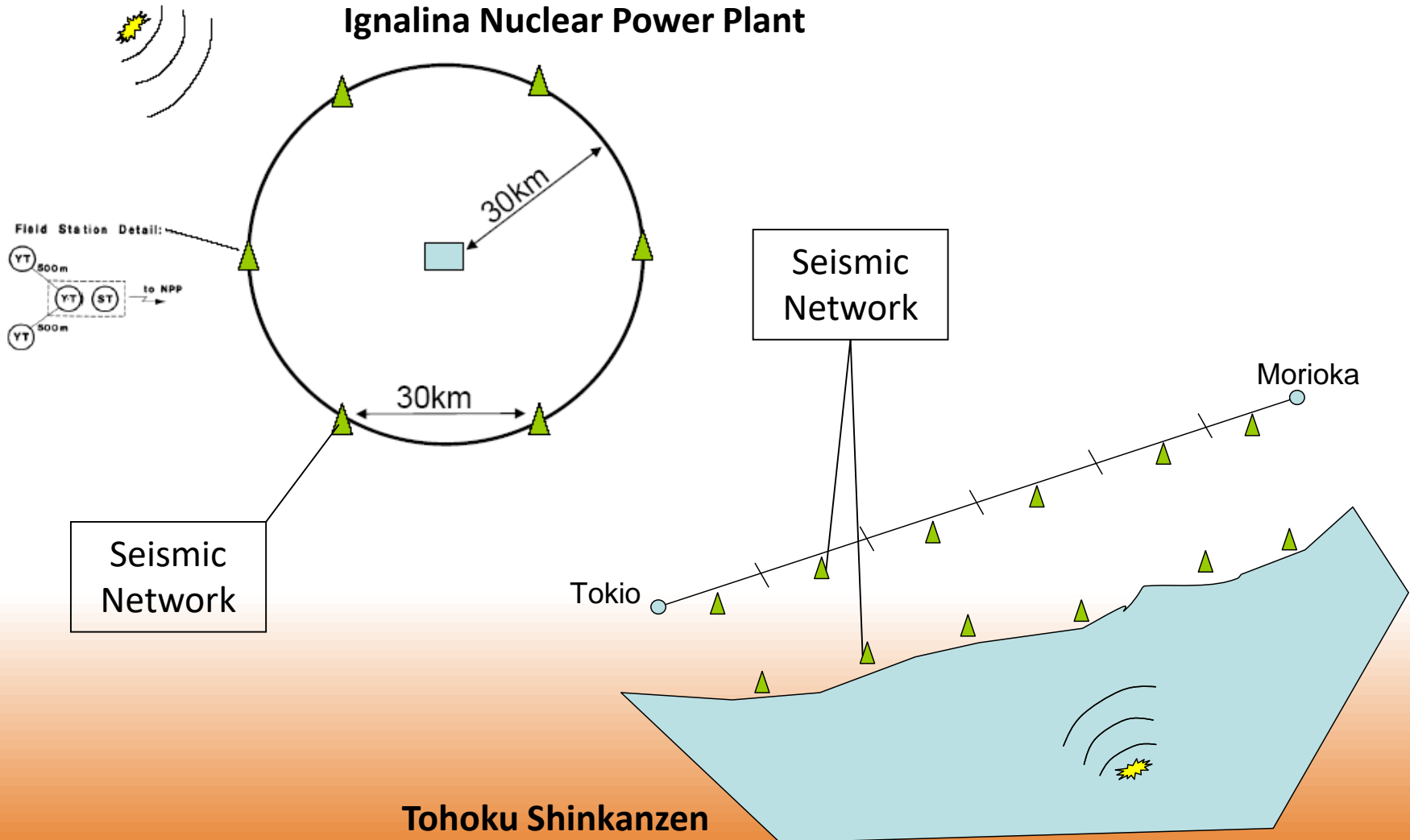


Potenzialità dei sistemi di EW per la riduzione in tempo reale del rischio sismico di infrastrutture

La lezione giapponese e le potenzialità dell'approccio alle conseguenze

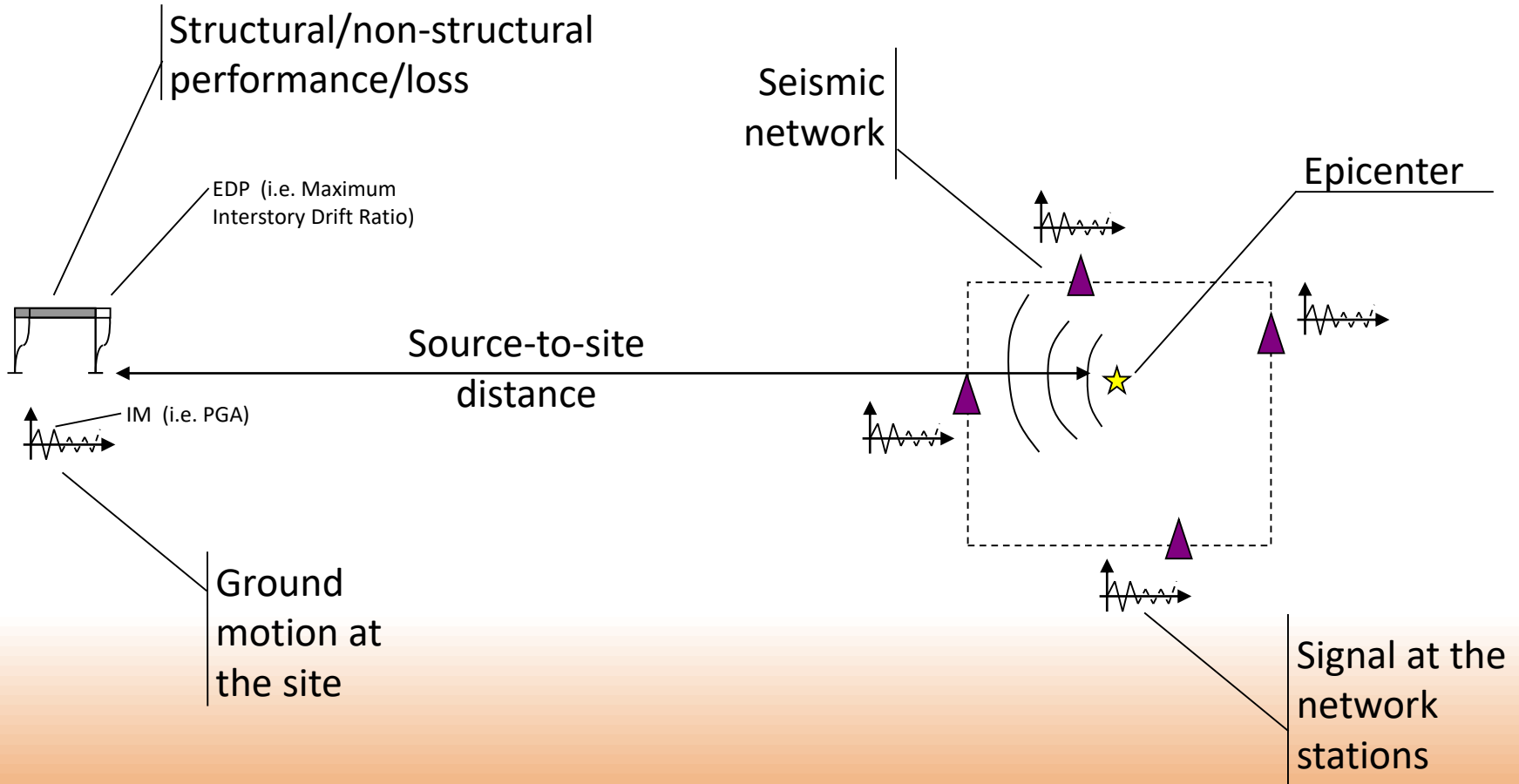


Sistemi di early warning a barriera



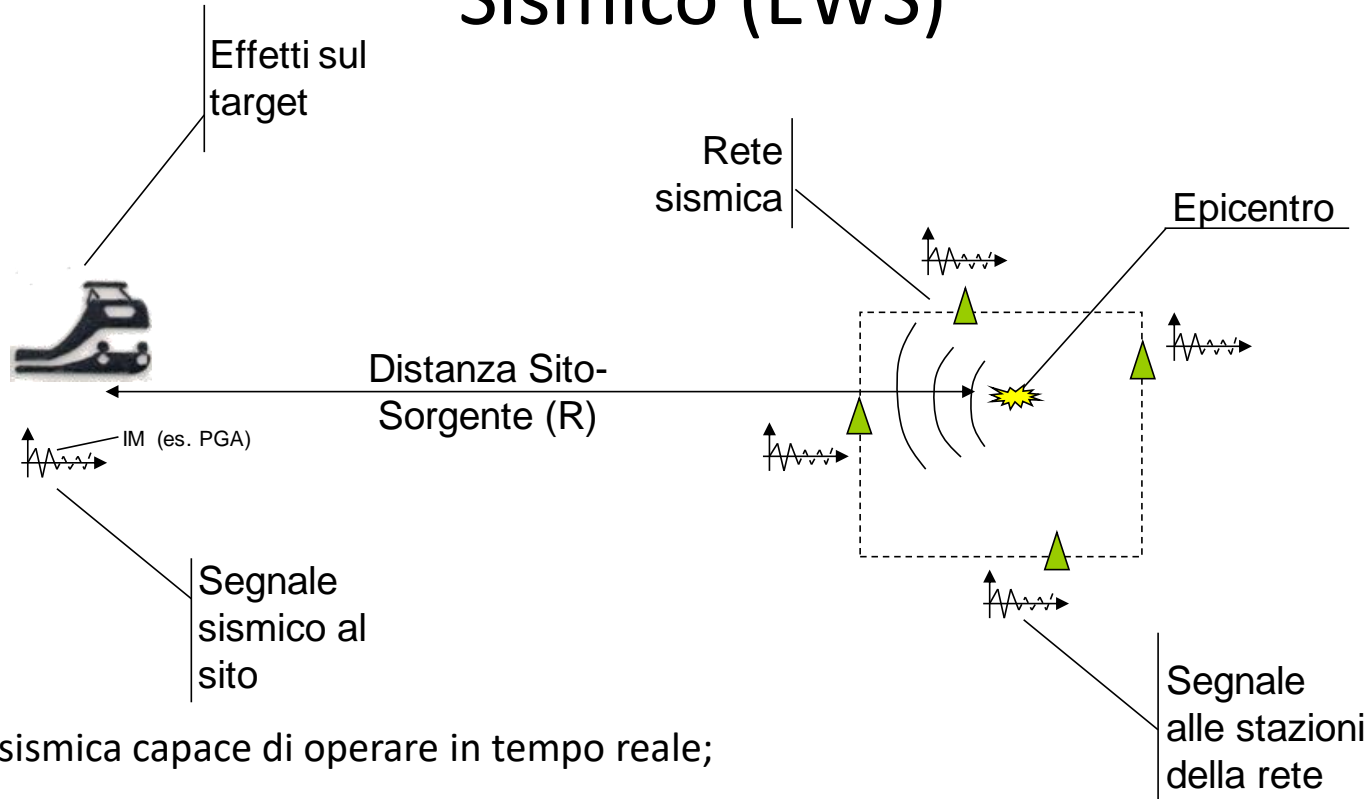


Sistemi di early warning basati su reti regionali



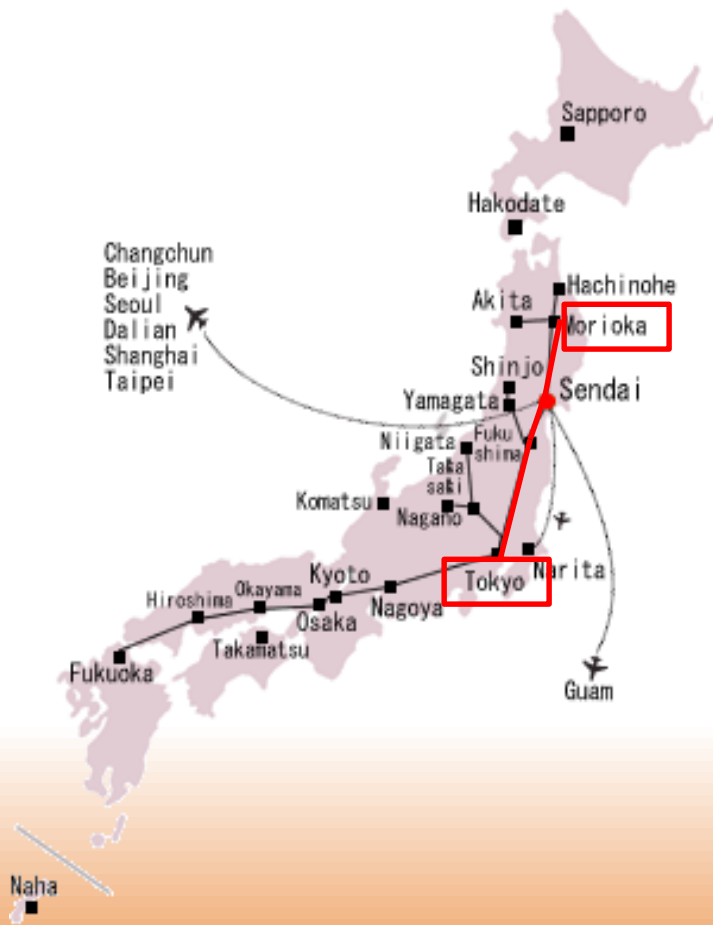


Componenti base di un sistema di Early Warning Sismico (EWS)



1. Una rete sismica capace di operare in tempo reale;
2. Un sistema automatico in grado di elaborare e fare inferenza sulle informazioni provenienti dalla rete;
3. Una infrastruttura di trasmissione;
4. Un sistema automatico di supporto alle decisioni per ridurre, in tempo reale, il rischio sismico di una struttura o infrastruttura da proteggere.

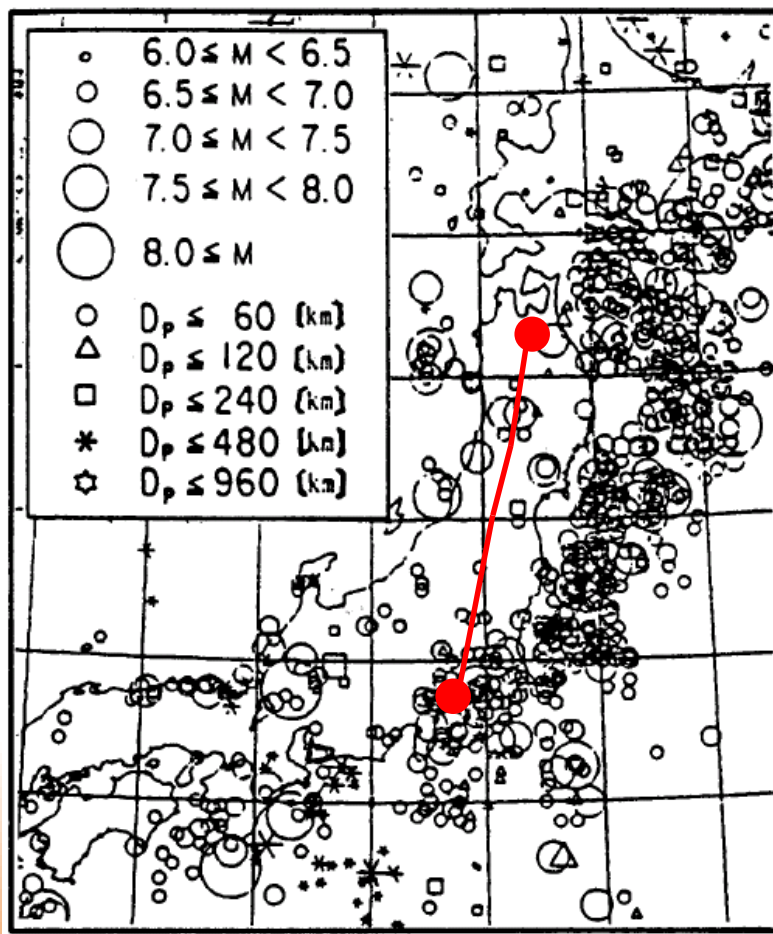
Lo SHINKANSEN Tokio-Morioka



- La linea ferroviaria è lunga circa 500 km;
- I treni sono in media lunghi 250 m ed hanno una velocità media di 200 km/h (250 km/h di crociera)
- La linea ferroviaria è per lo più costituita da viadotti e gallerie (115);
- Vista la frequenza dei treni, ad un generico istante il numero medio di treni sul tracciato è di 8 treni.



Rischio sismico per la linea ferroviaria



- La linea è esposta ai terremoti più intensi che hanno epicentro in mare, più forti e lontani (80% in proporzione);
- E' esposta ai terremoti che hanno epicentro a terra, più vicini ma meno intensi (20% in proporzione);
- Rischio in caso di terremoto: deragliamento a causa del passaggio del treno su di un tratto danneggiato dal terremoto (non c'è rischio di ribaltamento delle carrozze).

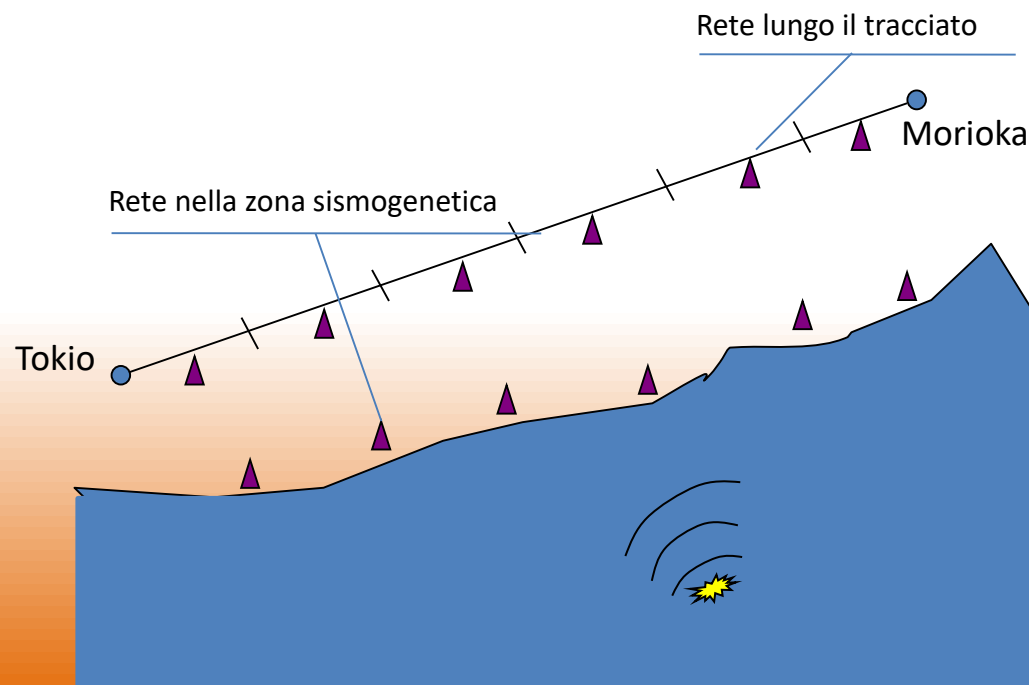
Sismicità storica della regione (ultimi 100 anni)

Il sistema di EWS per la linea

- Sono installate due reti di strumenti;
- Il tracciato è diviso in 26 segmenti;
- A ciascun accelerometro è associato un segmento;

• Quando l'accelerazione del sistema costiero supera una certa soglia di accelerazione il treno sul tratto corrispondente è fermato automaticamente;

• Quando l'accelerazione ad un accelerometro sul tracciato supera una certa soglia i treni nei tracciati adiacenti vengono frenati.





Prestazioni del sistema di EW

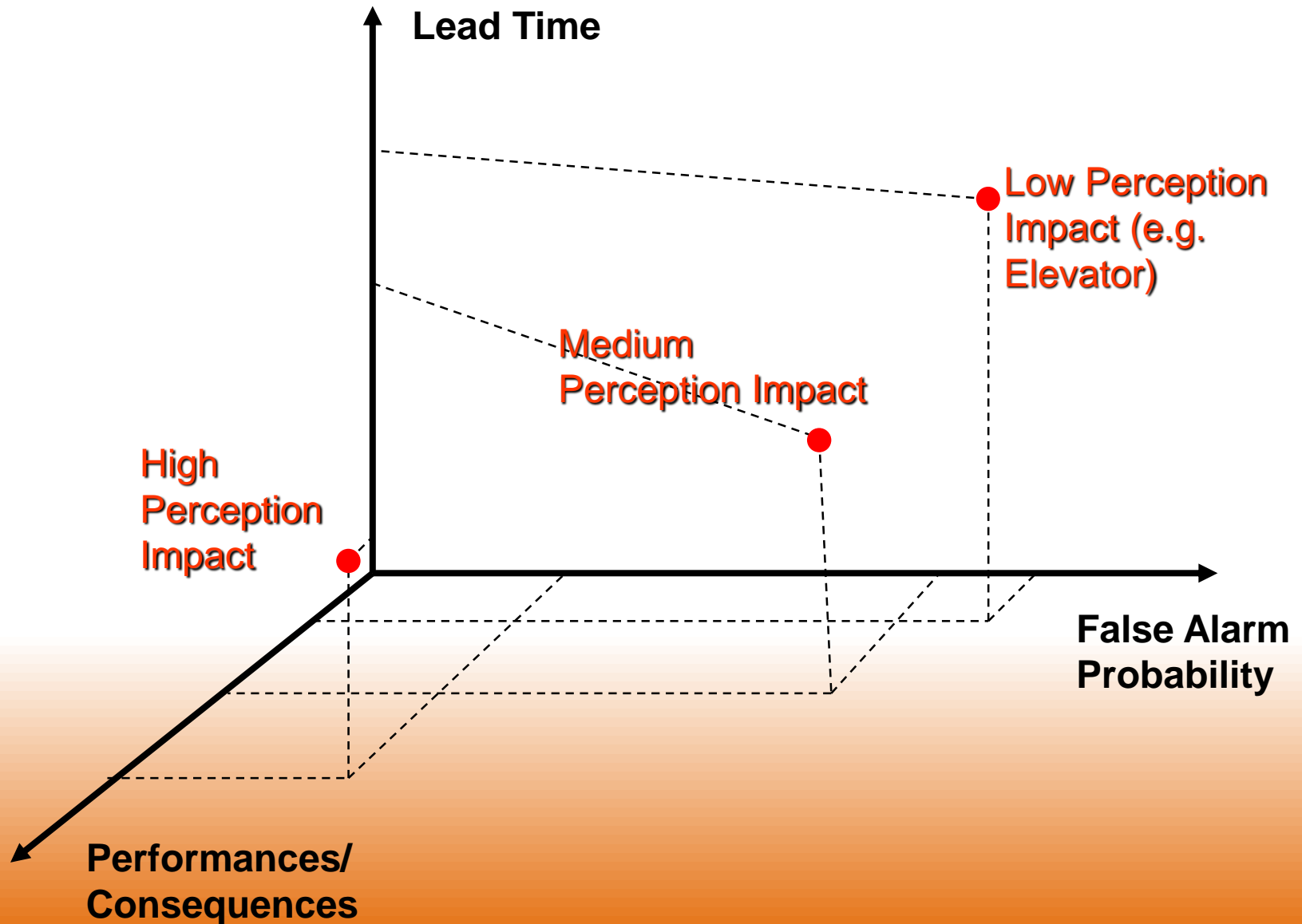
- Il sistema è stato fortemente messo in discussione in relazione alla sua efficienza operativa, anche se nessun incidente durante il periodo d'uso è stato provocato dal terremoto sulla linea (bassa probabilità di mancato allarme), perché:
 1. mediamente 3 treni/anno sono stati fermati perché si era resa necessaria una ispezione del tracciato;
 2. mediamente 73 treni/anno sono stati frenati senza che il terremoto avesse creato alcune conseguenza al tracciato (falsi allarme). I ritardi causati dai falsi allarme sono stati considerati inaccettabili;
 3. Il sistema fornisce un tempo di warning molto basso.



Cause

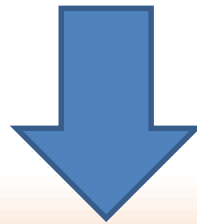
- Il sistema opera a soglia di accelerazione deterministica;
- La soglia di allarme non è stata calibrata sugli effetti (strutturali e geotecnici) del terremoto ed è solo debolmente legata al rischio di incidente;
- La soglia di allarme non è stata calibrata tenendo conto delle “perdite” anche legate ai falsi allarme.

Più costa il falso allarme più precisa deve essere la valutazione



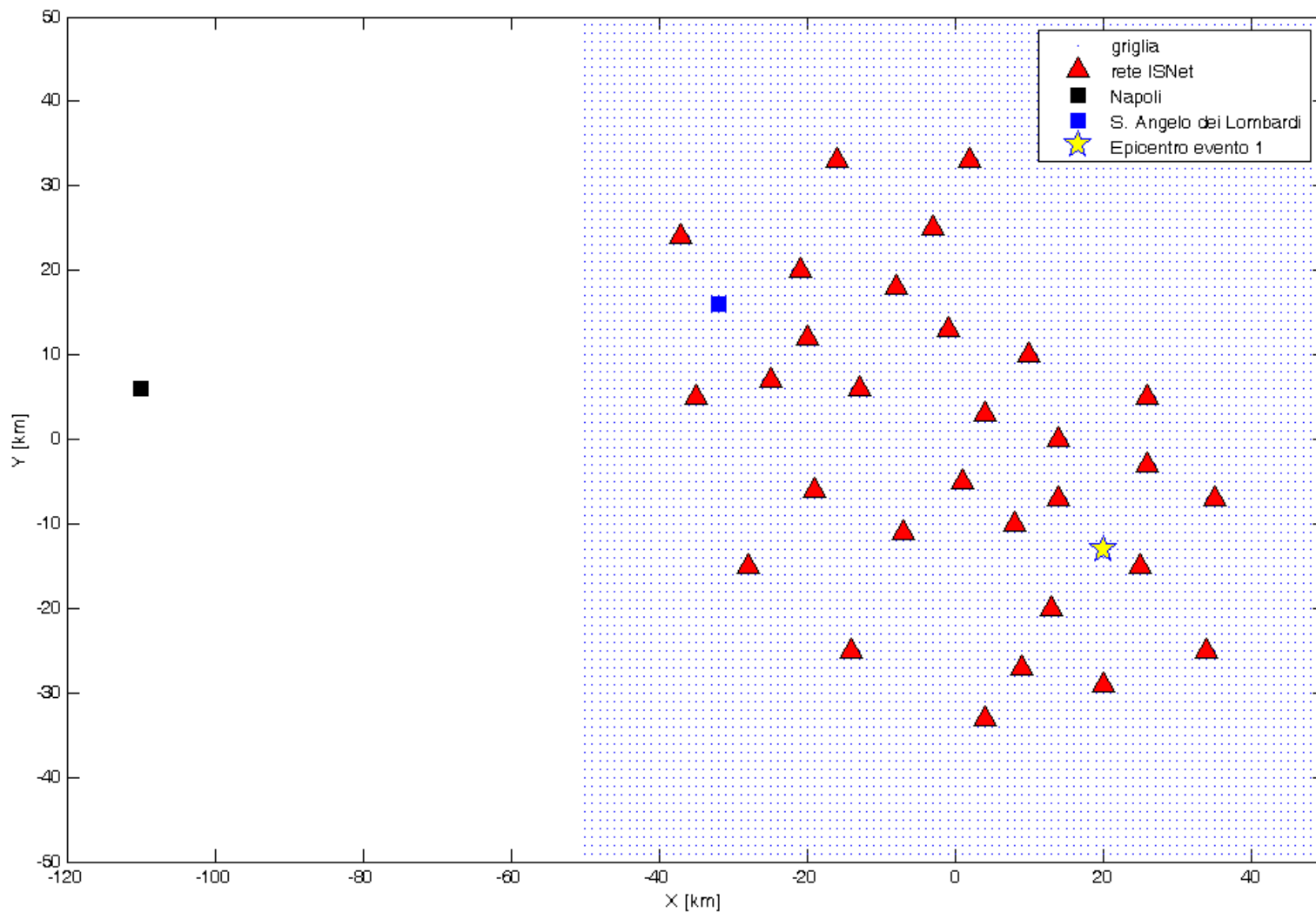
Fattori critici di successo per sistemi di EWS per la riduzione del rischio

- Il sistema deve essere in grado, in tempo reale, di stimare le perdite legate all'allarme di una specifica applicazione;
- La decisione di allarme deve essere dipendente dal tempo nel senso che deve tenere conto del trade-off tra l'accuratezza delle informazioni sul terremoto e del costo di mancato e falso allarme;

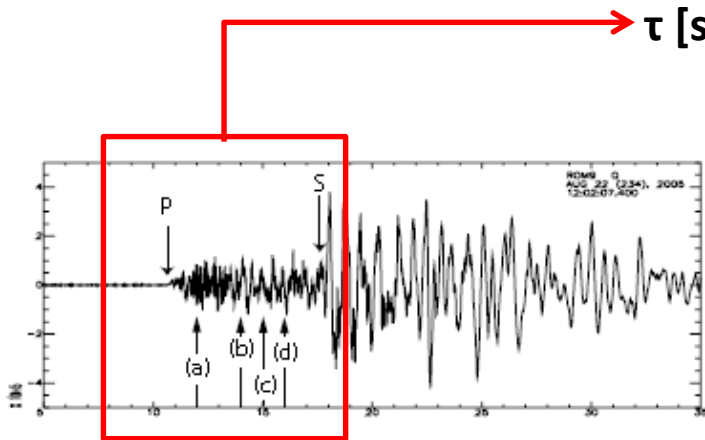


Progettazione basata sulle conseguenze

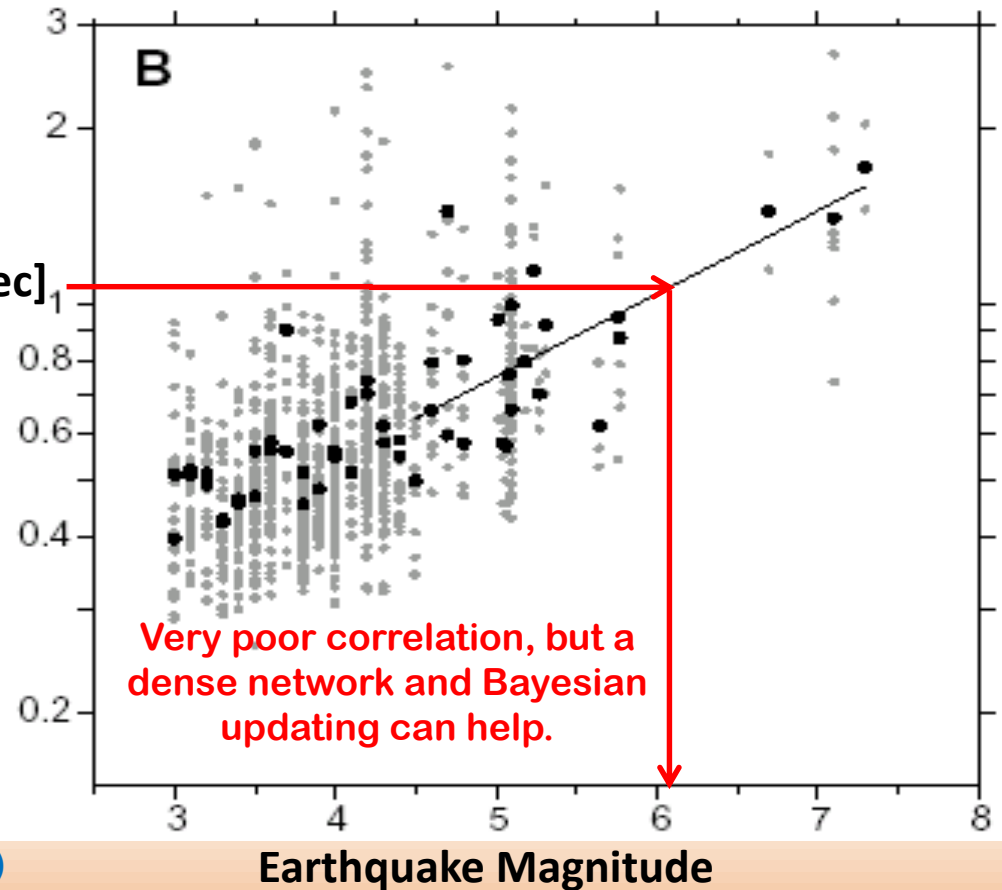
Esempio: il sistema campano



RTS: Rapid estimation of event magnitude

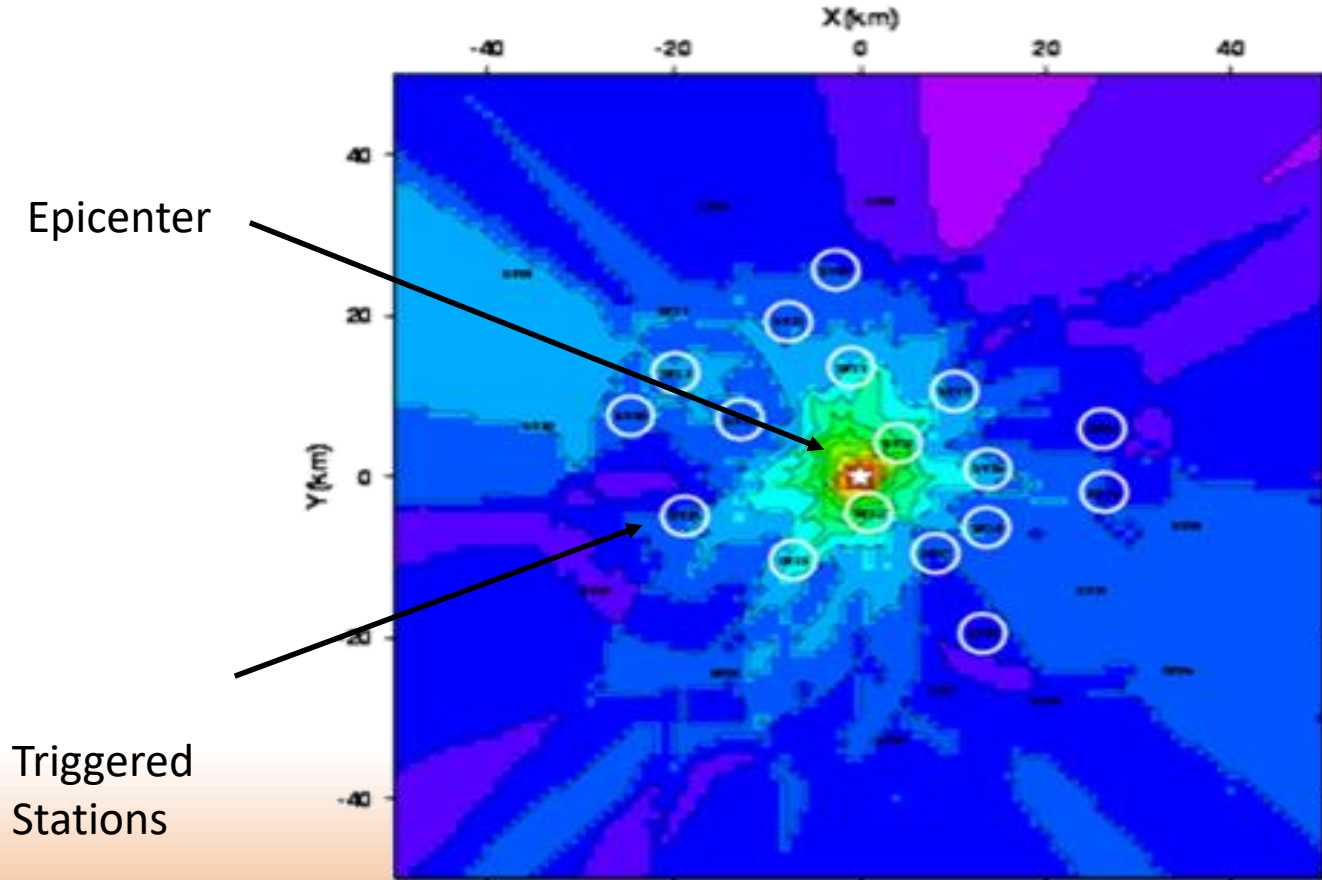


Seismologists* claim it is possible to estimate the magnitude from the first (4) seconds of the P-wave velocity recording

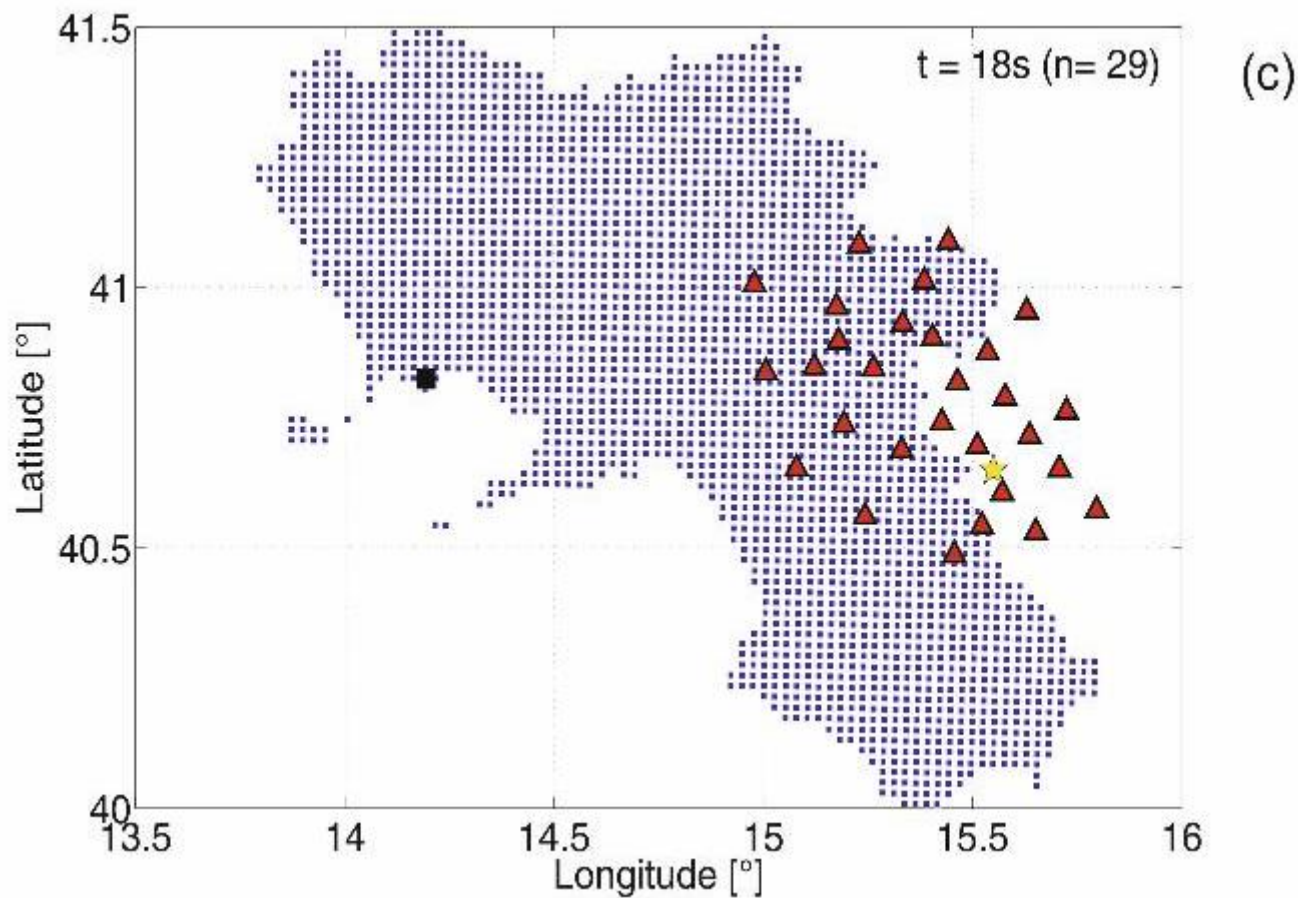


RTS: Rapid estimation of event location

depth=12__tnow=4.00__sigma=0.50

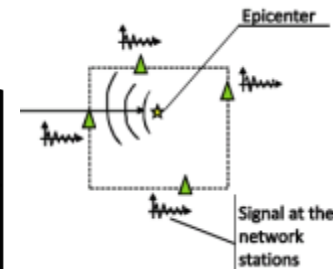


Making use of real-time information to quantify uncertainty on earthquake magnitude: Bayesian updating (1)

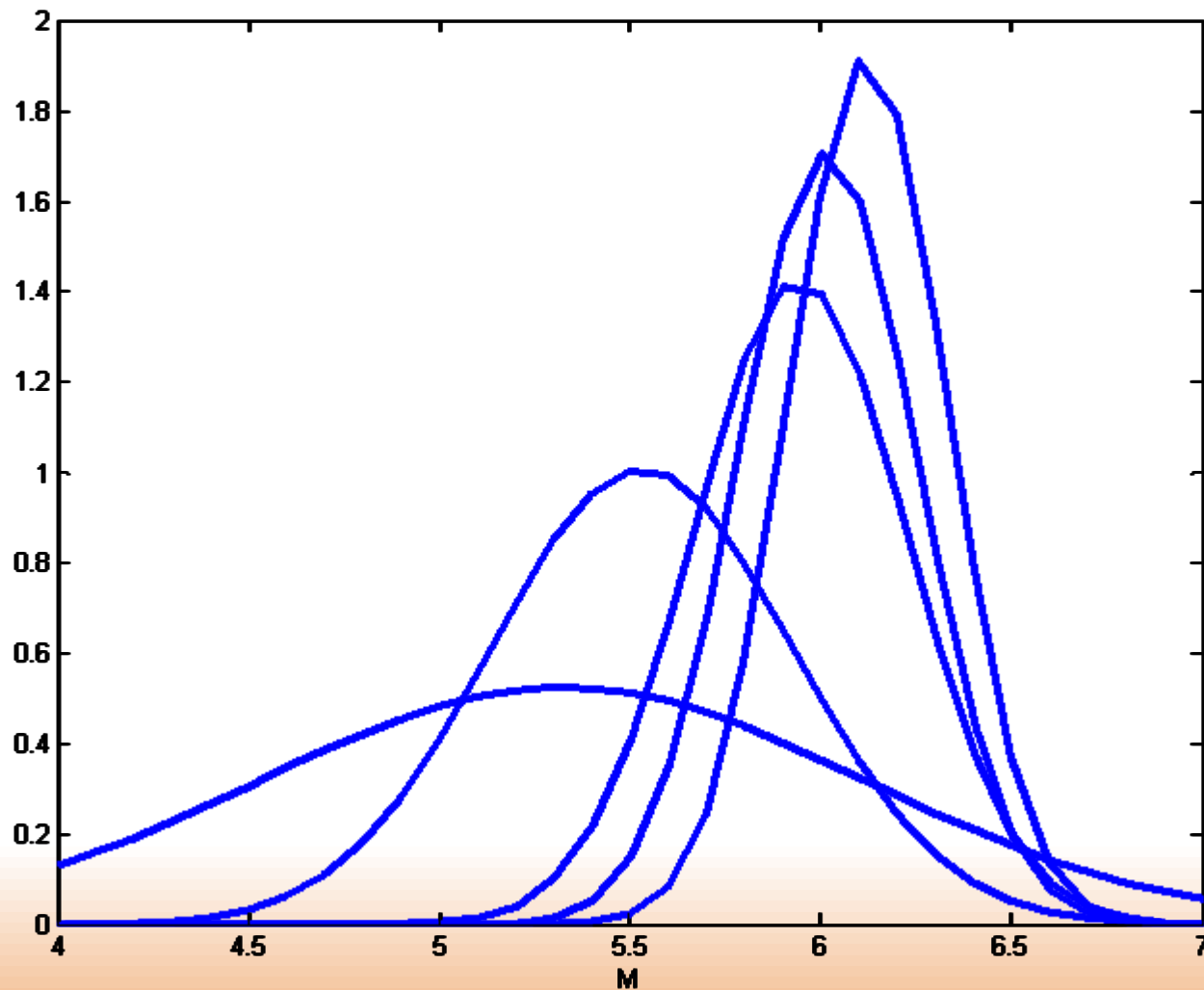


▲ = τ available

M 6 event simulation



$$f_{M|\hat{t}}(m)$$



$\hat{t} \equiv 0.2s$

30 stations

Analisi Probabilistica di Pericolosità in Tempo-Reale

Relazione
(Legge) di
Attenuazione

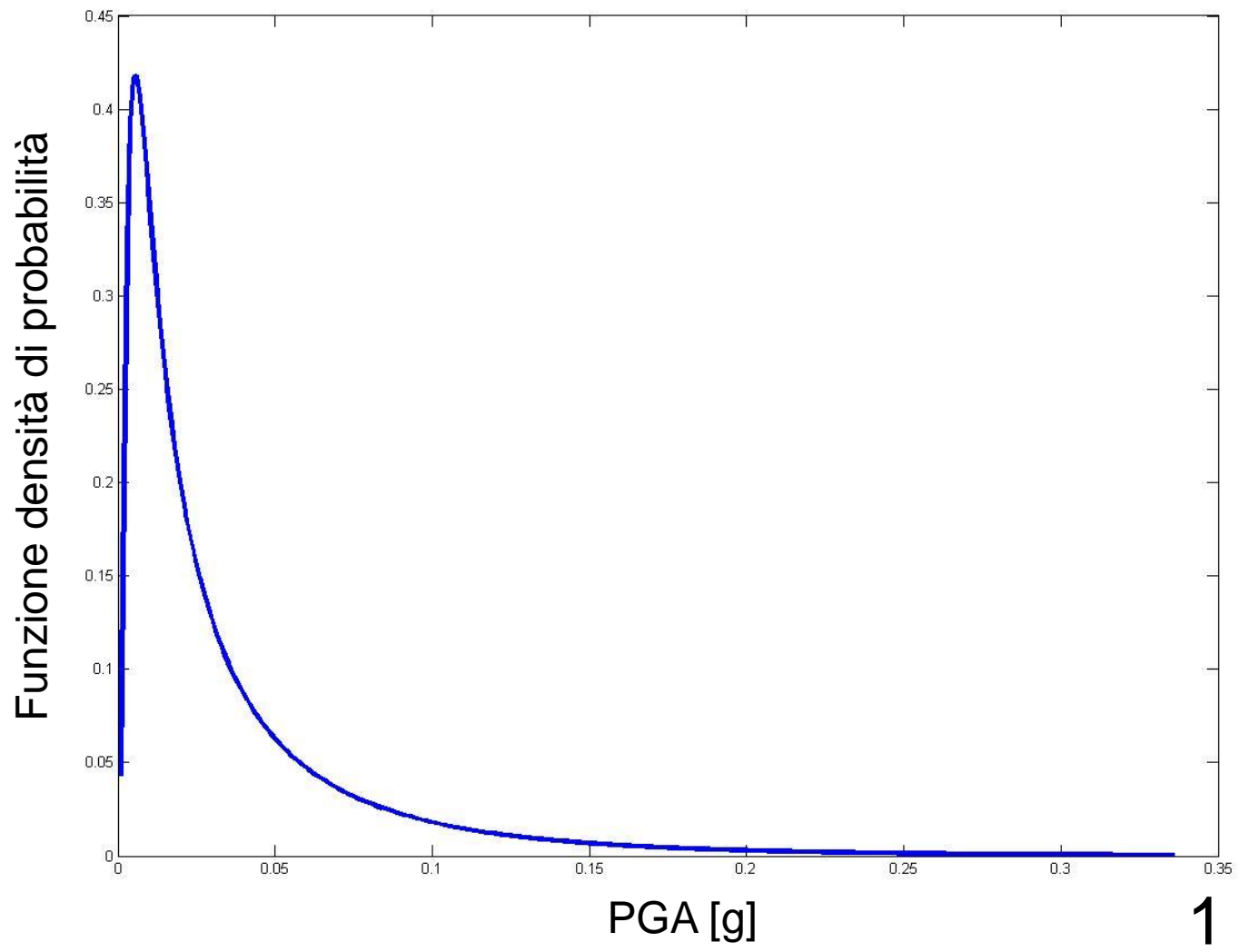
PDF della distanza condizionata
alla sequenza di stazioni
triggerate

$$f_v(PGA) = \int_M \int_R f[PGA | m, r] f_{M|\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_v}(m | \bar{\tau}_v) f_{R|v_1, v_2, \dots, v_v}(r | \bar{v}) dr dm$$

Distribuzione della
PGA al sito
condizionata alle
misure degli strumenti
sismici (stazioni)

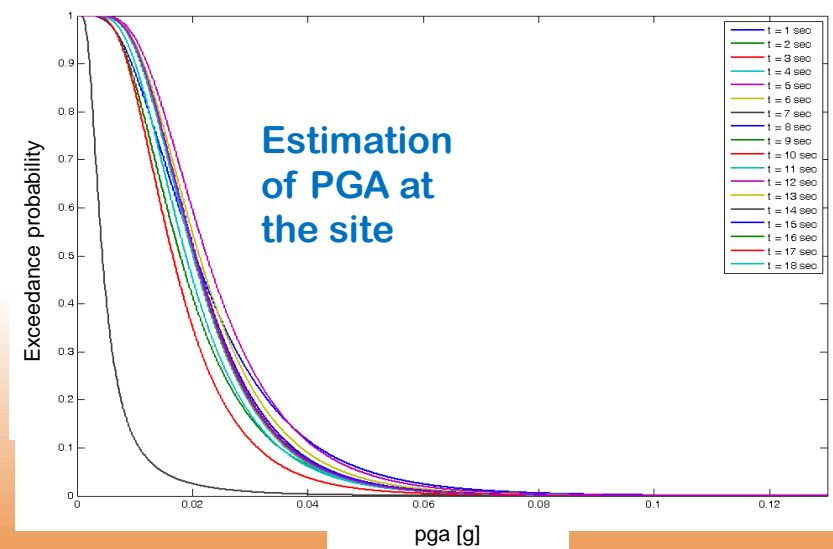
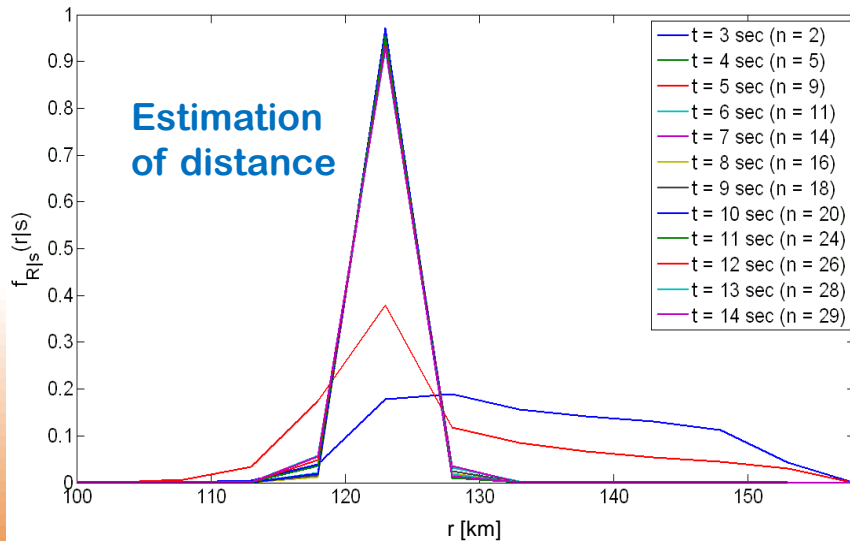
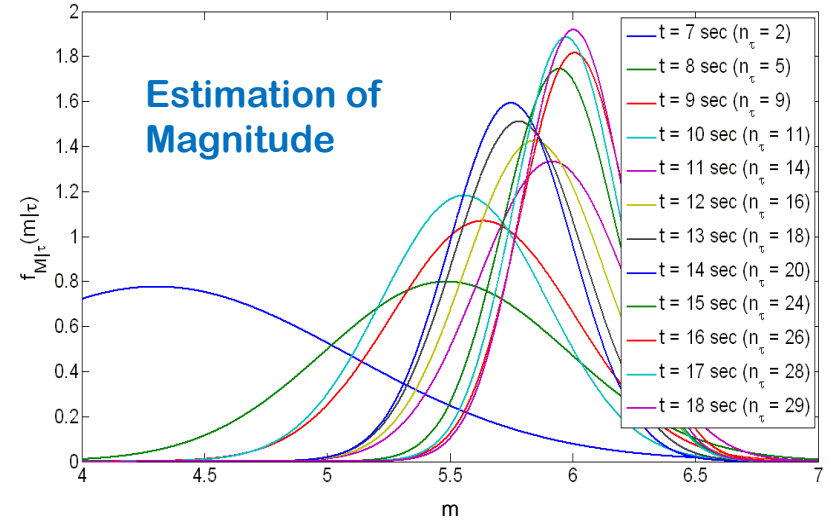
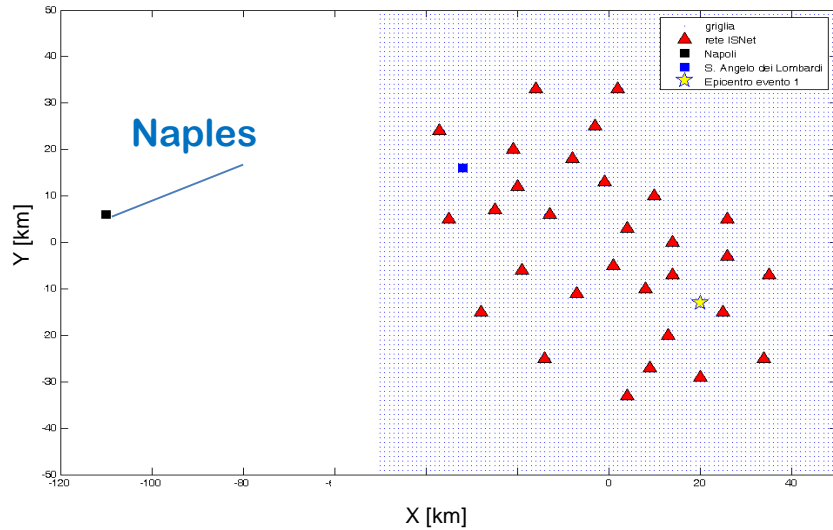
PDF della
magnitudo
condizionata alle
misure degli
strumenti sismici
(stazioni)

Simulazione evento magnitudine 6



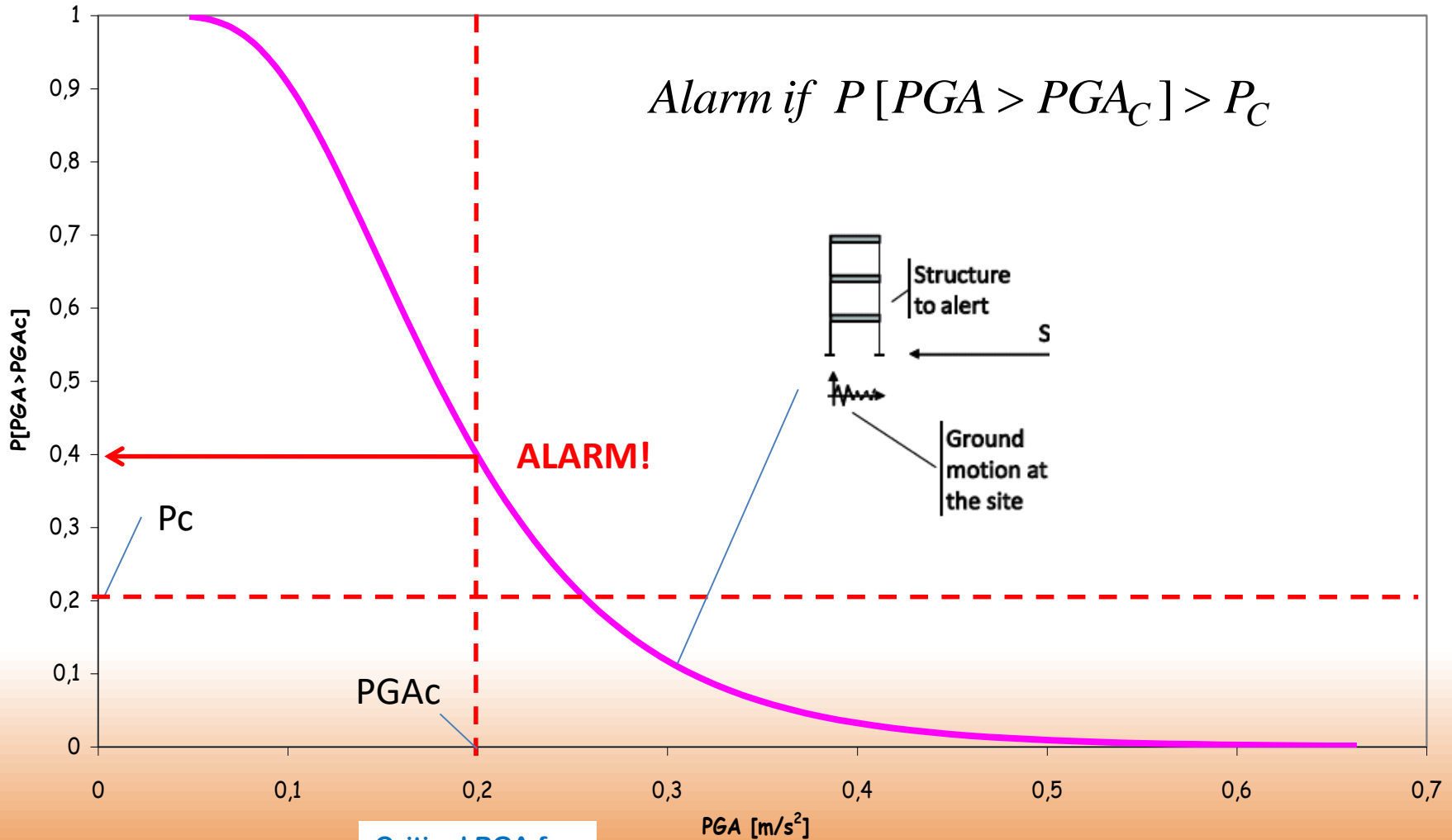
1 stazione

RTPHSA for a M 6 event simulation*



*Iervolino, I., Giorgio, M., Galasso, C., Manfredi, G. (2009) Uncertainty in early warning predictions of engineering ground motion parameters: what really matters? *Geophysical Research Letters*, DOI:10.1029/2008GL036644.

When to activate security measures?



Critical PGA for the Structure*

*Iervolino, I., Convertito, V., Giorgio, M., Manfredi, G., Zollo, A. (2006). Real-time risk analysis for hybrid earthquake early warning systems. *Journal of earthquake Engineering*, 10, 867–885.

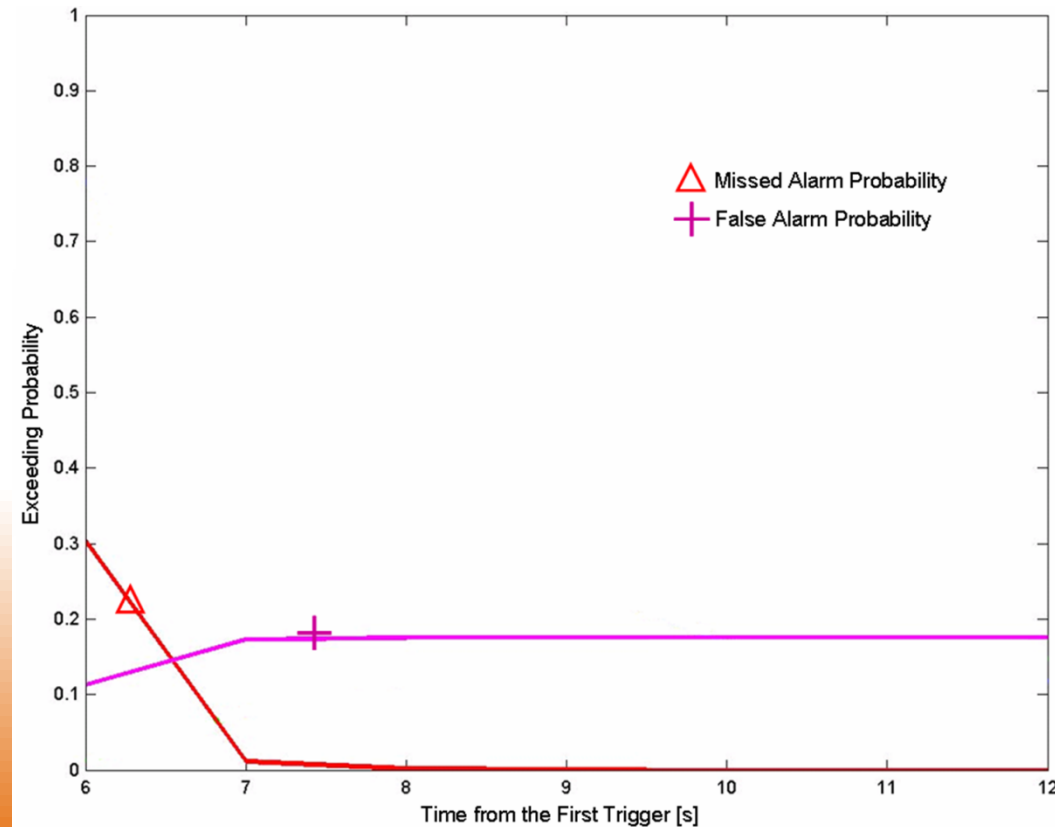
Quando lanciare l'allarme?

Una possibile regola decisionale è allarmare quando la probabilità che la PGA superi un valore critico (PGA_C) è troppo alta in relazione alla vulnerabilità della linea.

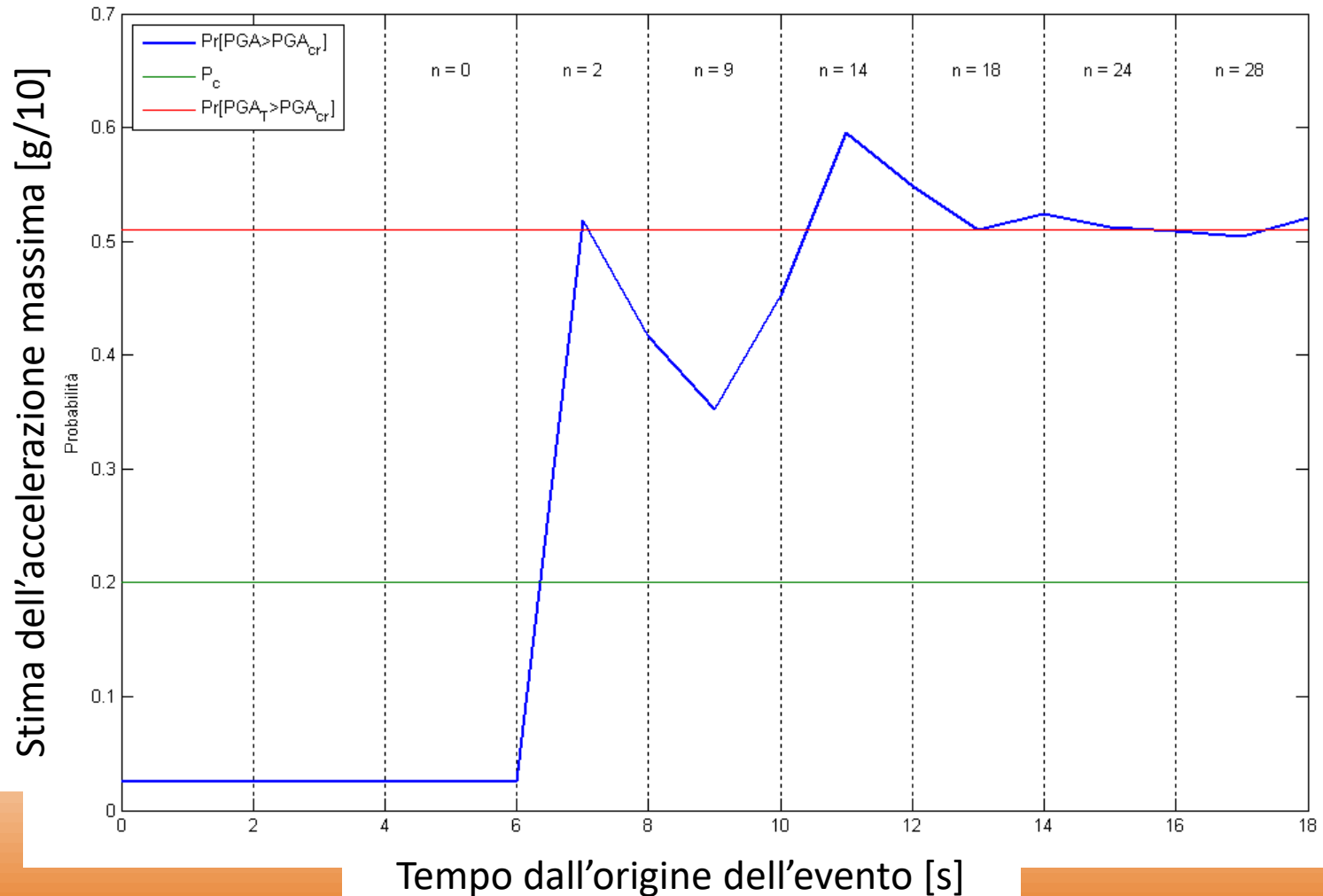
$$\text{Allarme } P[PGA > PGA_C] \geq \text{soglia}$$

Dalla analisi di fragilità sismica della linea

$$\left\{ \begin{array}{l} MA : \{ no \ Alarm \cap PGA_{True} > PGA_C \} \\ FA : \{ Alarm \cap PGA_{True} \leq PGA_C \} \end{array} \right.$$

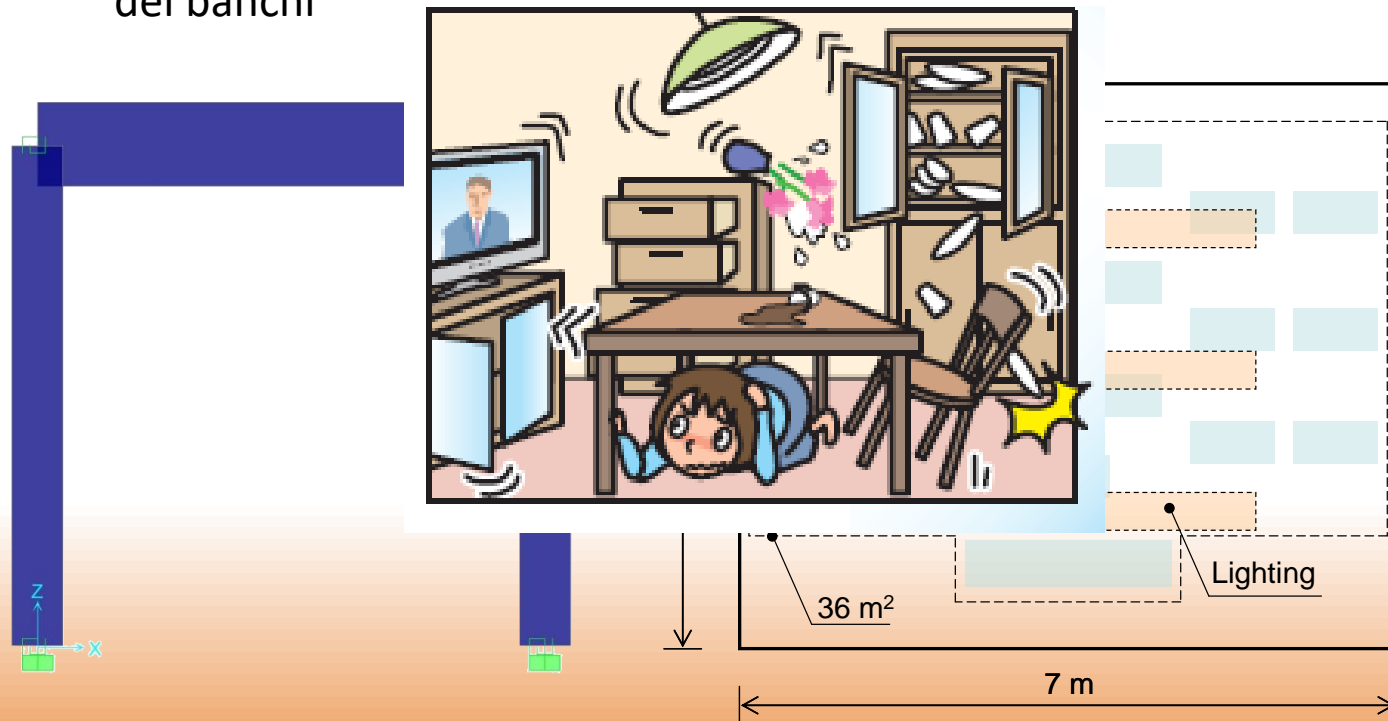


Calcolo del tempo ottimo di allarme



Come fissare la soglia di allarme sulla base della perdita attesa: esempio di una aula scolastica

- Consideriamo una aula scolastica i cui occupanti siano soggetti al rischio di collasso delle lampade (non-strutturale) e al collasso della struttura)
- Azione di riduzione del rischio seguente l'allarme: protezione al di sotto dei banchi

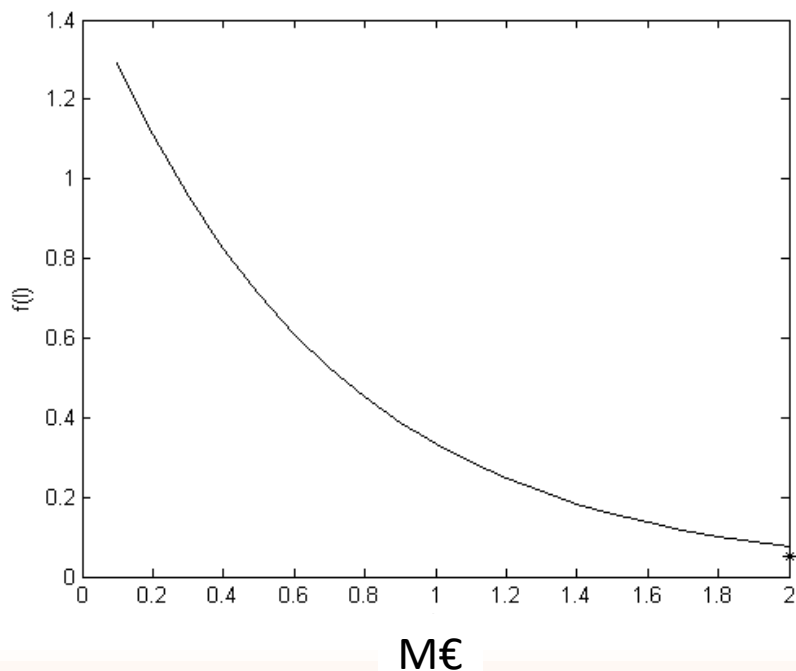




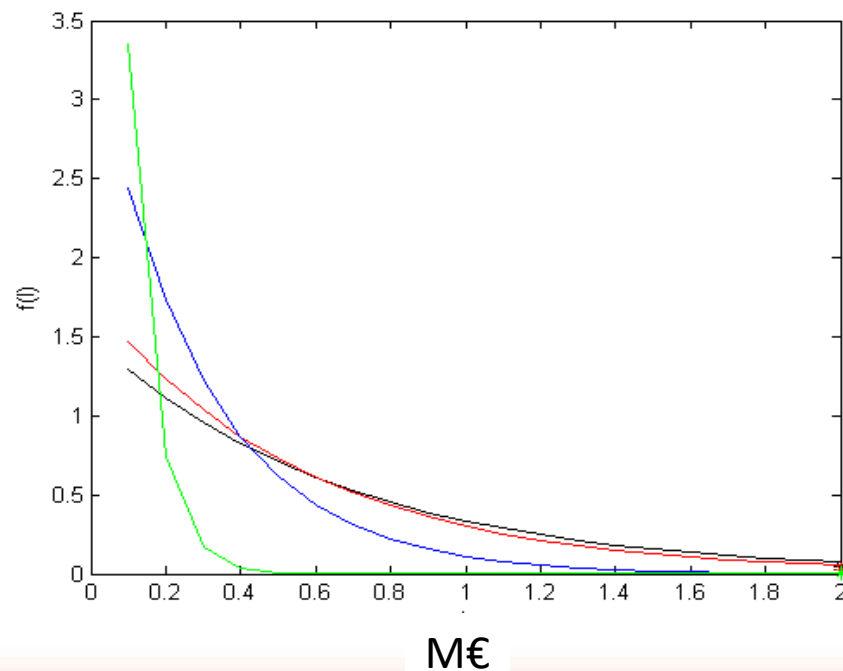
Cosa causa perdite?

- a) Collasso della struttura;
- b) La struttura non crolla, ma a causa delle forze d'inerzia lampade o armadi feriscono delle persone;
- a) La struttura non crollasse e neanche gli elementi strutturali subiscono danni, sebbene l'allarme sia stato lanciato (perdita dovuta al falso allarme)

1. Funzioni di Perdita nel Caso di Allarme e non



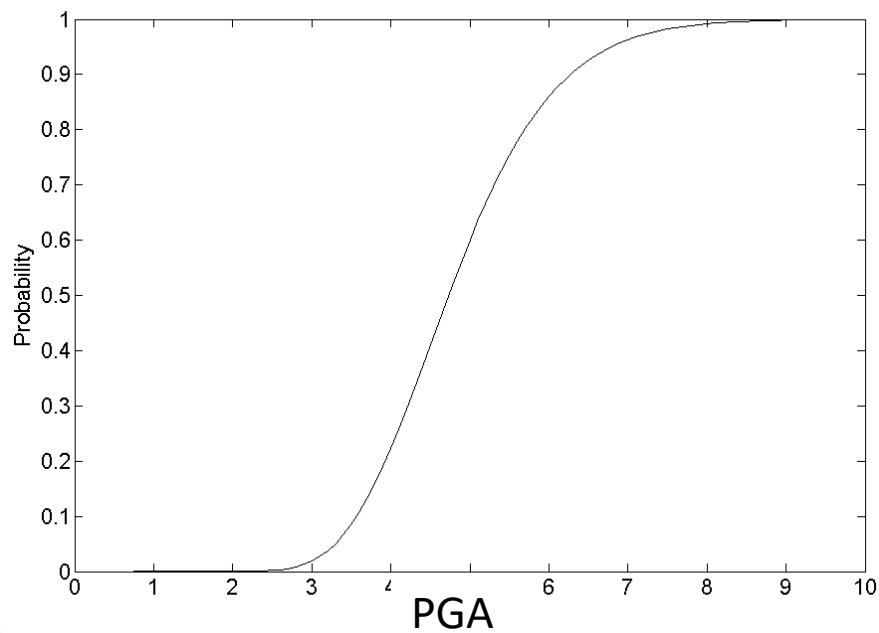
Distribuzione della perdita economica nel caso di non Allarme (funzione perdita)



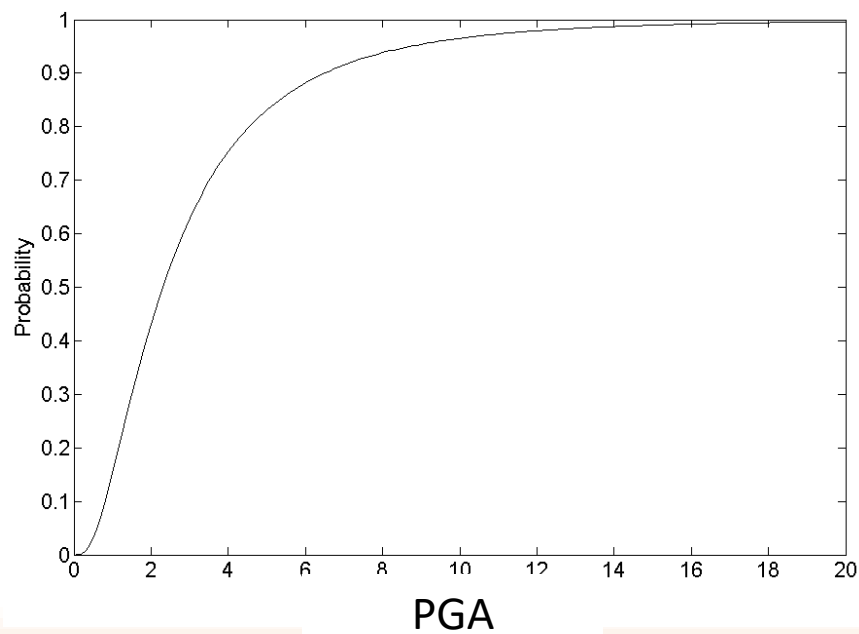
Funzione perdita in caso di allarme (ridotta per procedura sicurezza)

2. Fragilità per danno di Danno Strutturale e Non

Strutturale (collasso della struttura)



Non-strutturale (collasso lampade)



Stima delle Perdite Attese Condizionata ai Dati Provenienti in Tempo-Reale dalla Rete

Estendendo l'approccio descritto per la pericolosità si può determinare la perdita attesa condizionata alle misure della rete ed alla eventuale azione di protezione seguente l'allarme.

$$E[L] = \int \int \int \int \int \int \int \int \int \int l f(l|d, g(\tau)) f(d|edp) f(edp|im) f(im|g(\tau)) dL dD dEDP dIM$$

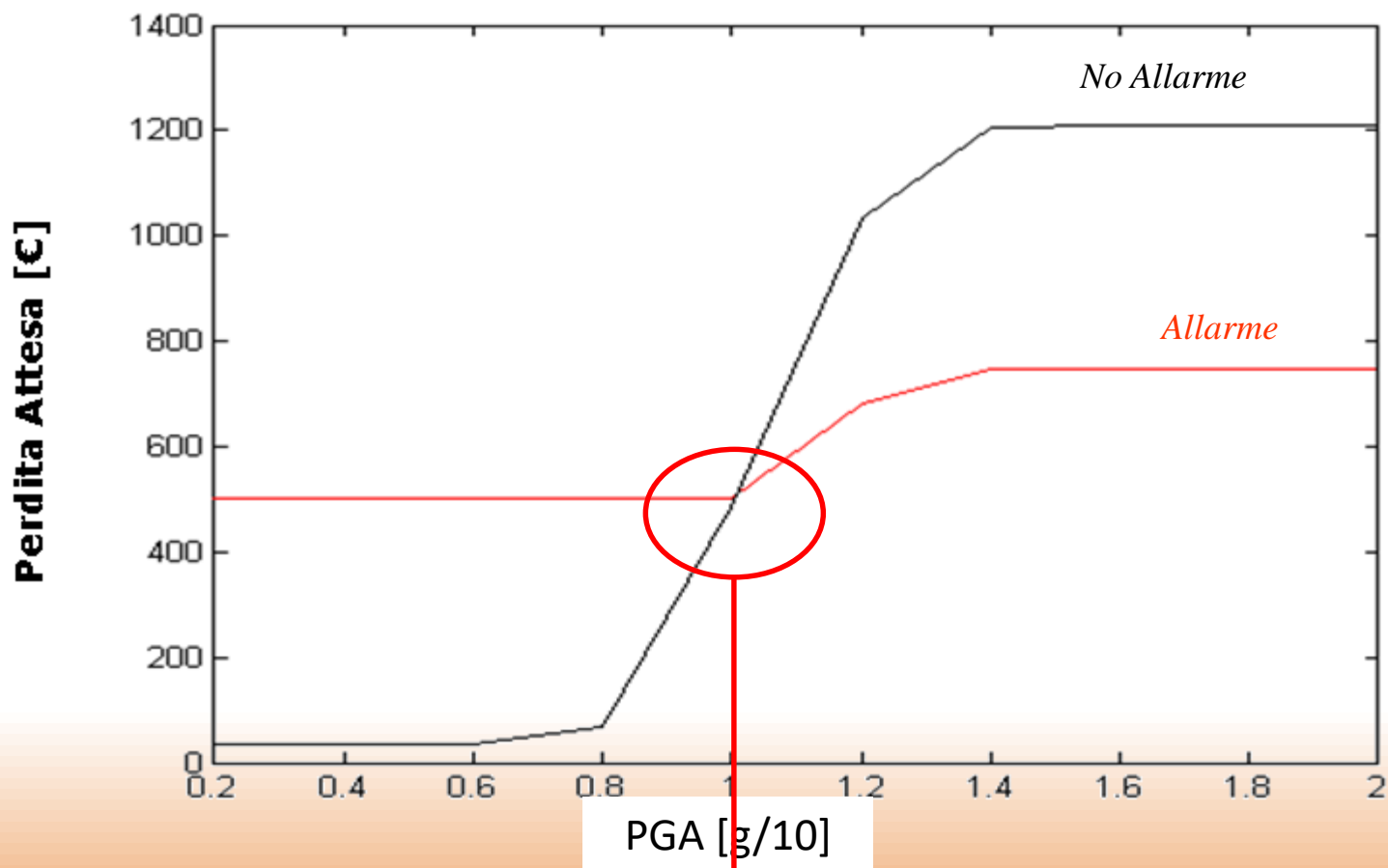
Perdita attesa per l'evento corrente

1. Distribuzione della perdita dipendente dalla decisione di allarmare o meno

2. Vulnerabilità al danno strutturale e non-strutturale condizionata alla risposta strutturale

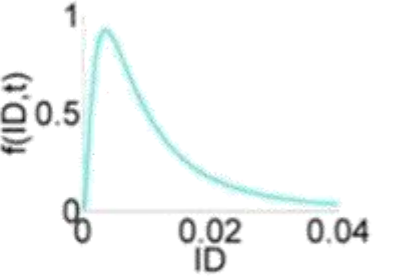
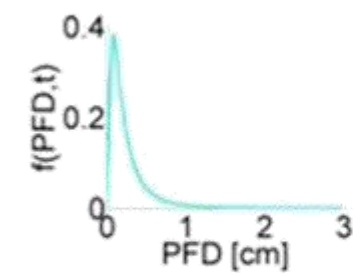
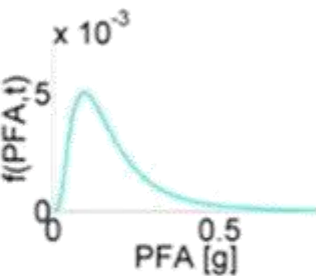
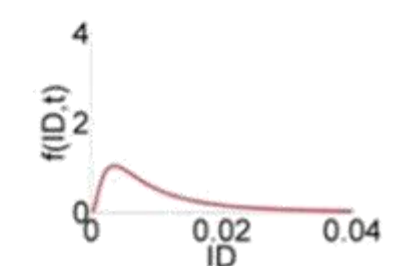
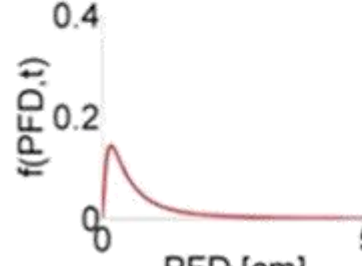
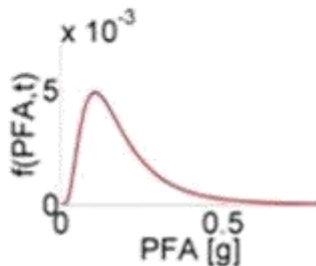
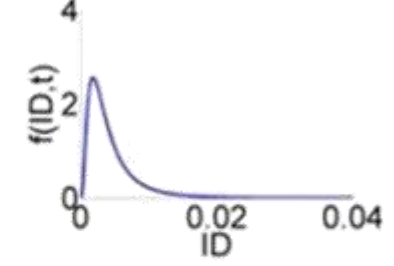
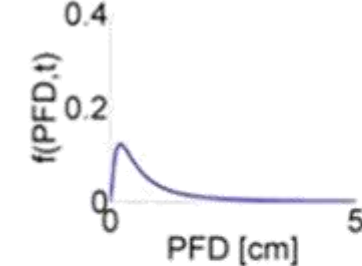
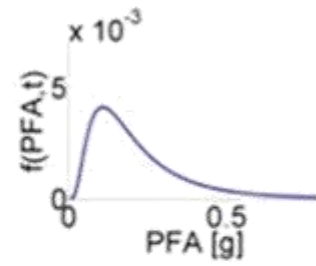
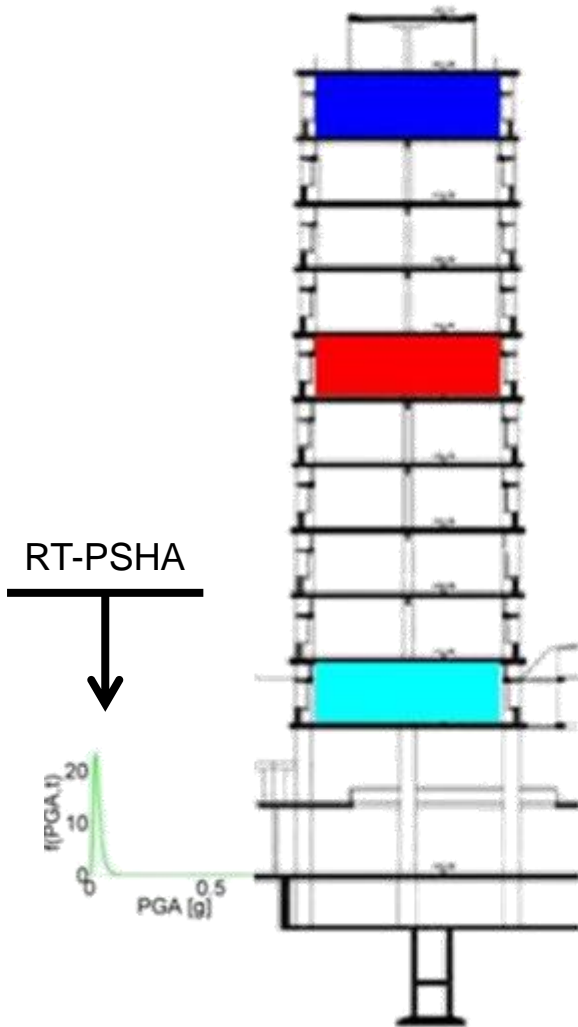
4. Analisi di Pericolosità in Tempo-Reale (stima della PGA)

Perdita attesa in funzione della misura media proveniente dalle stazioni



Soglia di Allarme Ottima

$$f_{EDP|\tau}(edp) = \int_{im} f_{EDP|IM}(edp) \cdot f_{IM|\tau}(im) \cdot d(im)$$



Il prototipo di sistema di EW per Magneti Marelli (gruppo FCA)

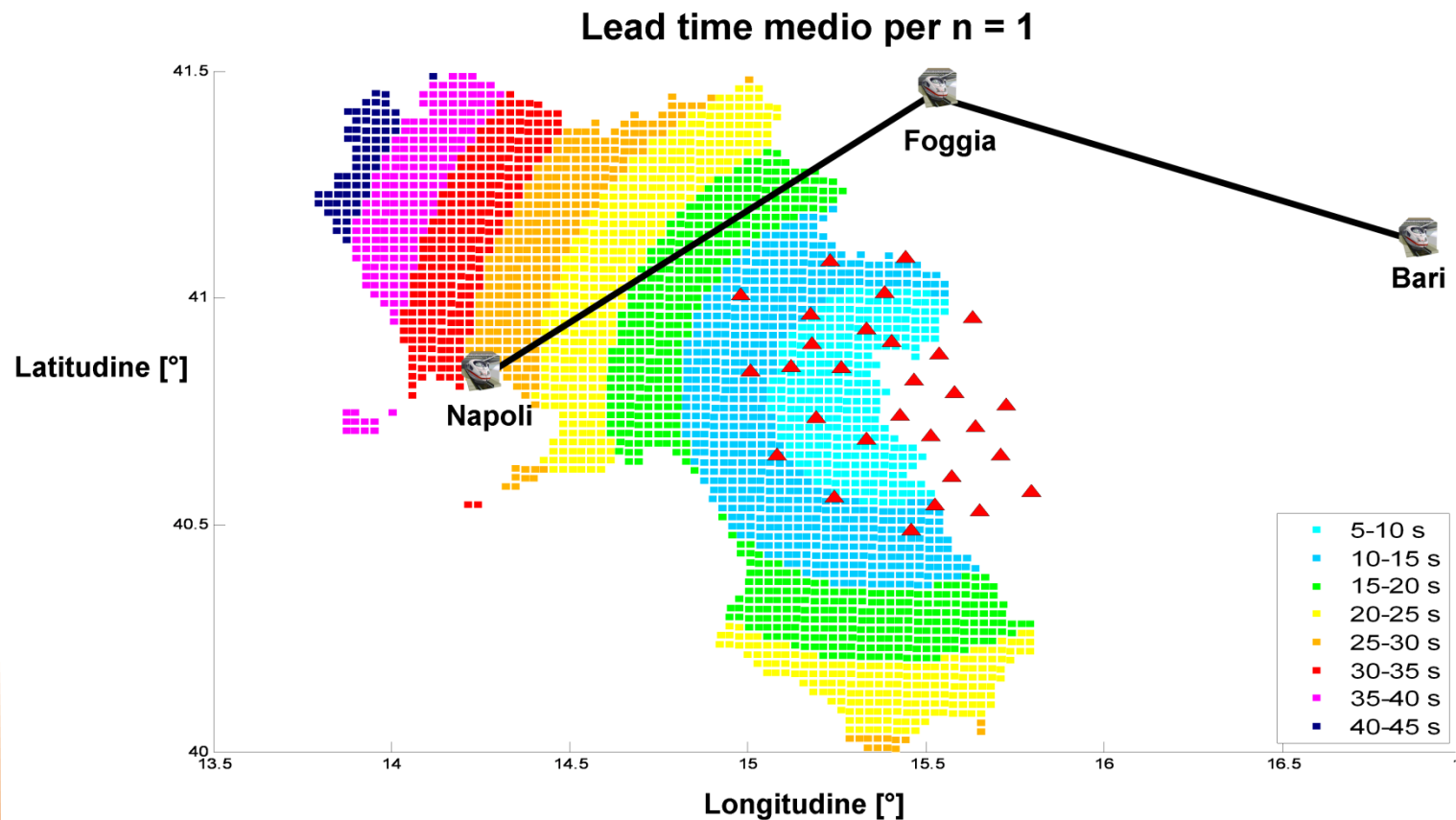




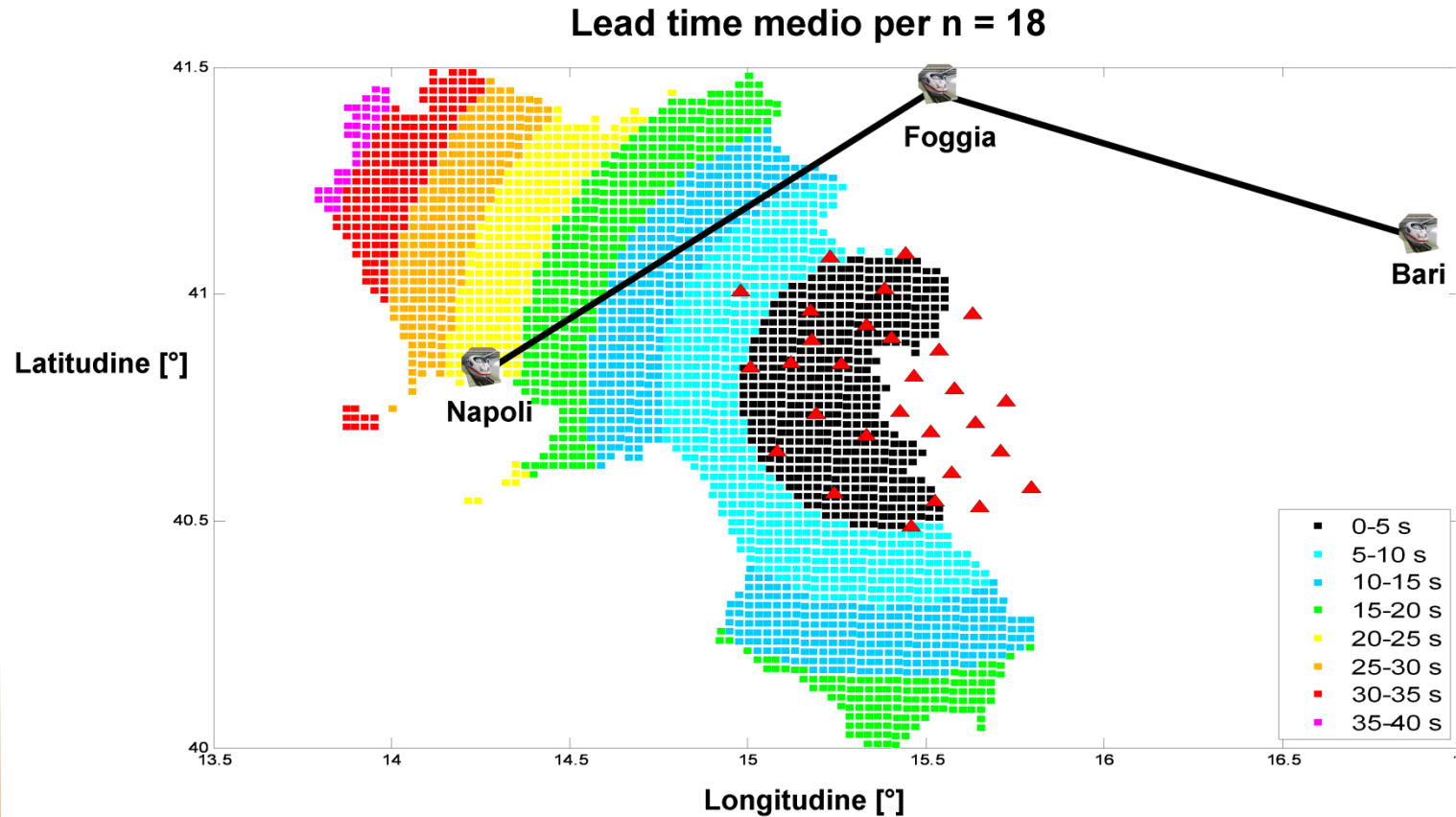
Come si potrebbe progettare un EWS per un sistema ferroviario con approccio alle conseguenze?

- Calcolo del rischio (es.) di svio indotto dal terremoto in funzione della magnitudo e della localizzazione epicentrale: calcolo della probabilità che un treno sulla linea incontri un tratto danneggiato dal terremoto;
- Molto importante è l'aspetto geotecnico: frane sismo-indotte, liquefazione, lateral spreading
- Calcolo dei costi del falso allarme come costo legato ai ritardi provocati sulla linea.

Una stazione a rilevato il terremoto (2)

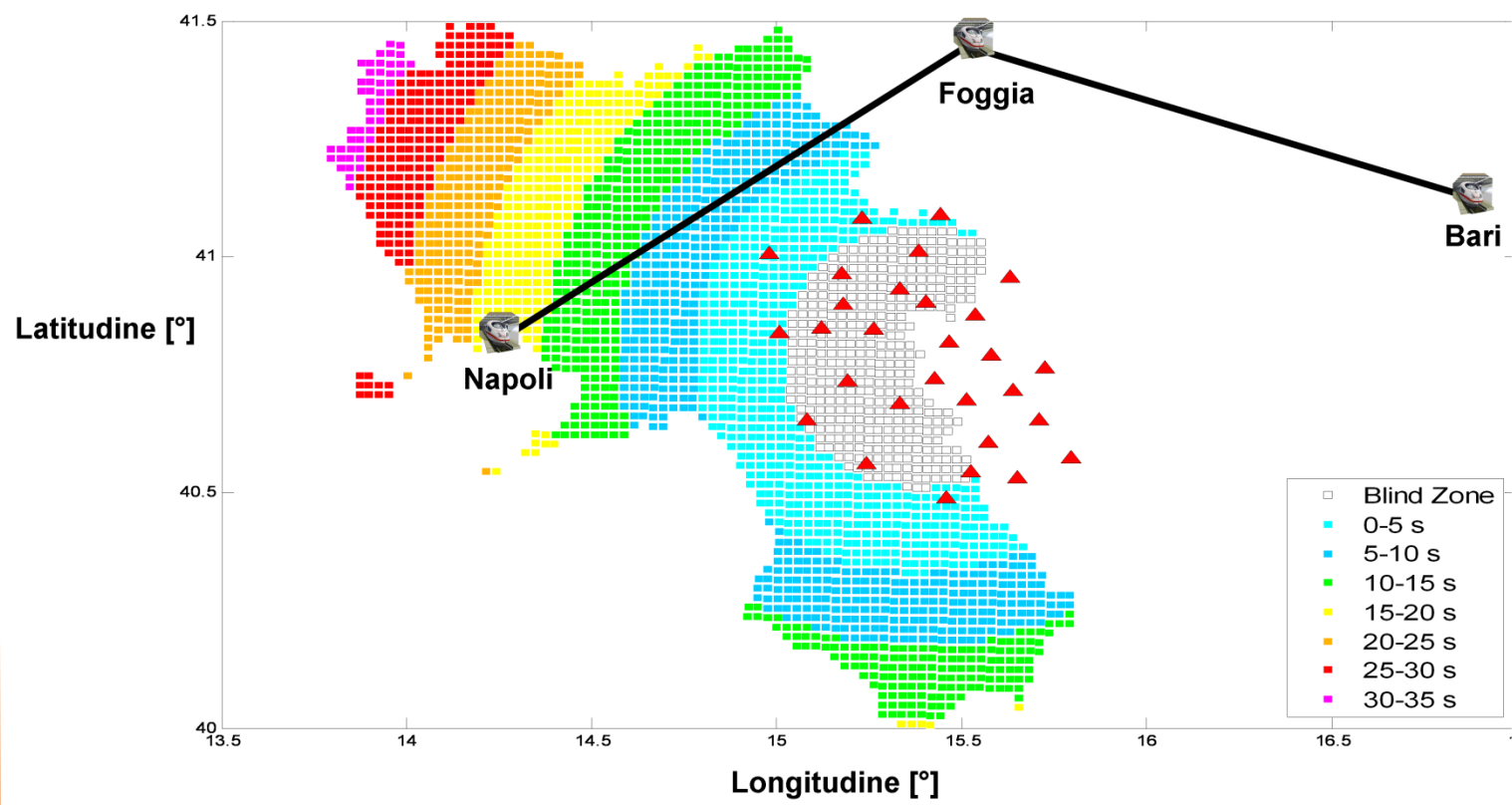


Stima della pericolosità a regime



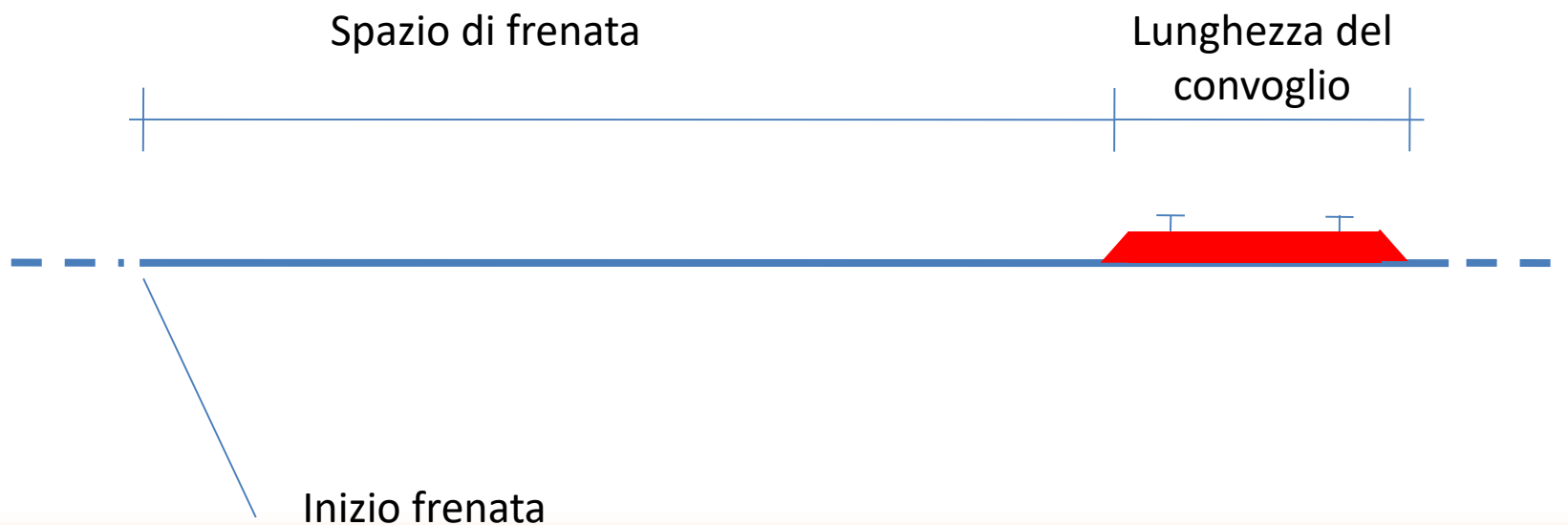
Tutte le stazioni hanno rilevato il terremoto

Lead time medio per n = 29



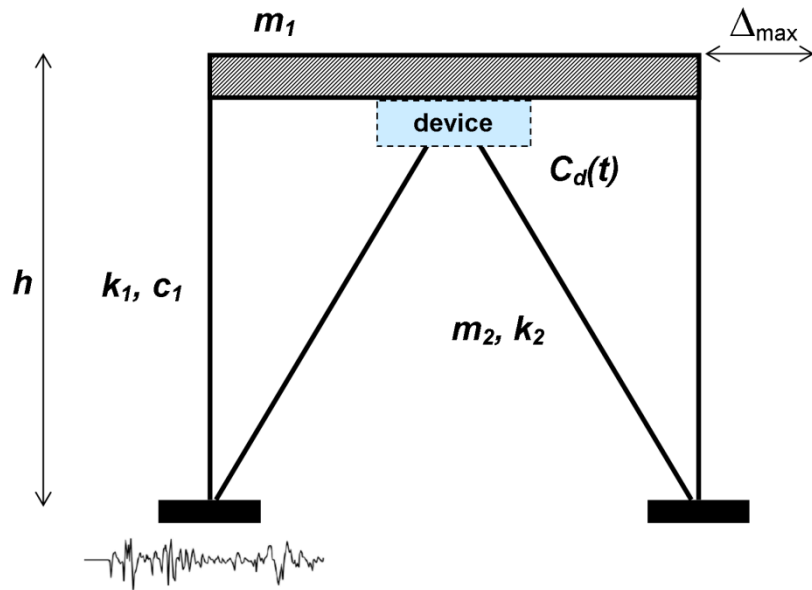
Come prendere la decisione di allarmare nel caso di treni

- Per i treni che si trovano nel tratto a rischio la probabilità di svio per evento sismico è la probabilità che il treno durante la frenata incontri un tratto danneggiato (per effetti strutturali o geotecnici).



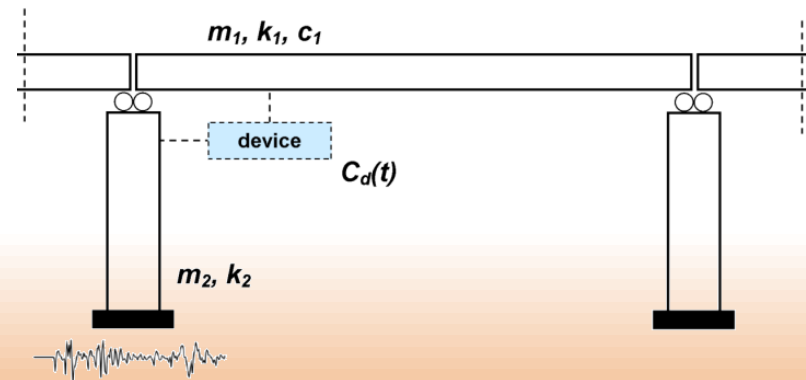
Per gli eventi in cui non si può stimare magnitudo e distanza o sono troppo vicini bisogna calibrare le soglie in accelerazione sulla base della vulnerabilità della linea e usare gli accelerometri lungo il tracciato per definire se necessario ispezionare il tratto di competenza

E' possibile addirittura pensare a sistemi di controllo strutturale semi-attivo attivati dal sistema di EW



$$f_d = -C_d(t) \left(\dot{x}_1 - \dot{x}_2 \right)$$

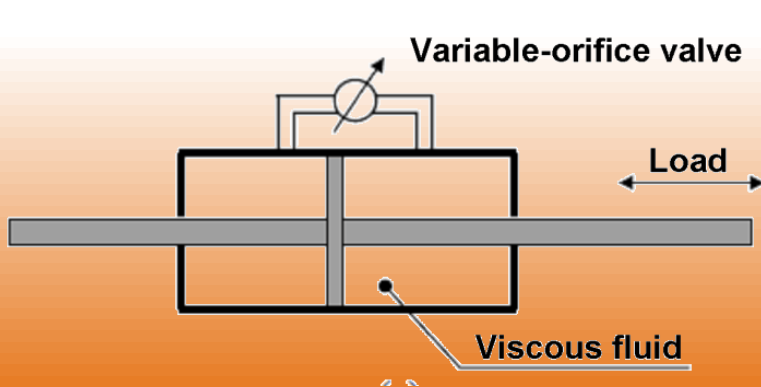
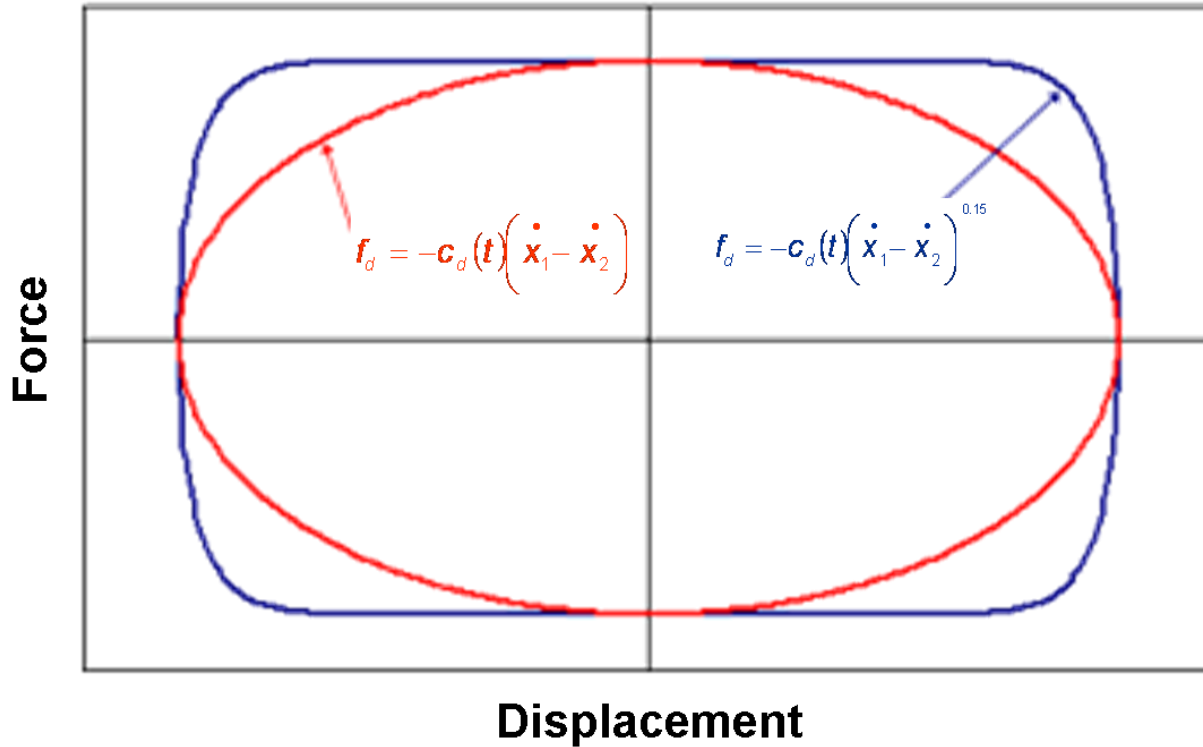
This model may be used to study other systems...



$$c_d(t) = c_{d,min} \Rightarrow \text{damping ratio } \xi = 3\%$$

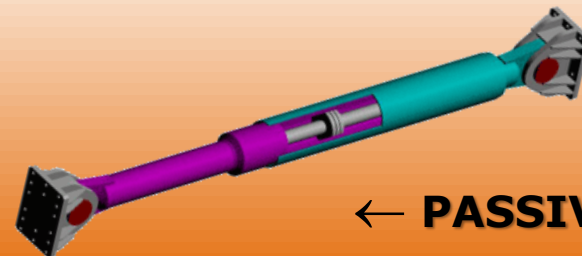
$$c_d(t) = c_{d,max} \Rightarrow \text{damping ratio } \xi = 10\%$$

Variable-Orifice Viscous Dampers



valve closed $\Leftrightarrow c_d(t) = c_{d,\min}$ (PASSIVE DEVICE)

valve open $\Leftrightarrow c_d(t) = c_{d,\max}$ (SA DEVICE)



← PASSIVE DEVICE

Real-Time performance analysis

$$Device\ ON\ or\ OFF \begin{cases} ON\ if\ P[EDP_{uncontrolled} > EDP_c | \tau] \geq P_c \\ OFF\ if\ P[EDP_{uncontrolled} > EDP_c | \tau] < P_c \end{cases}$$

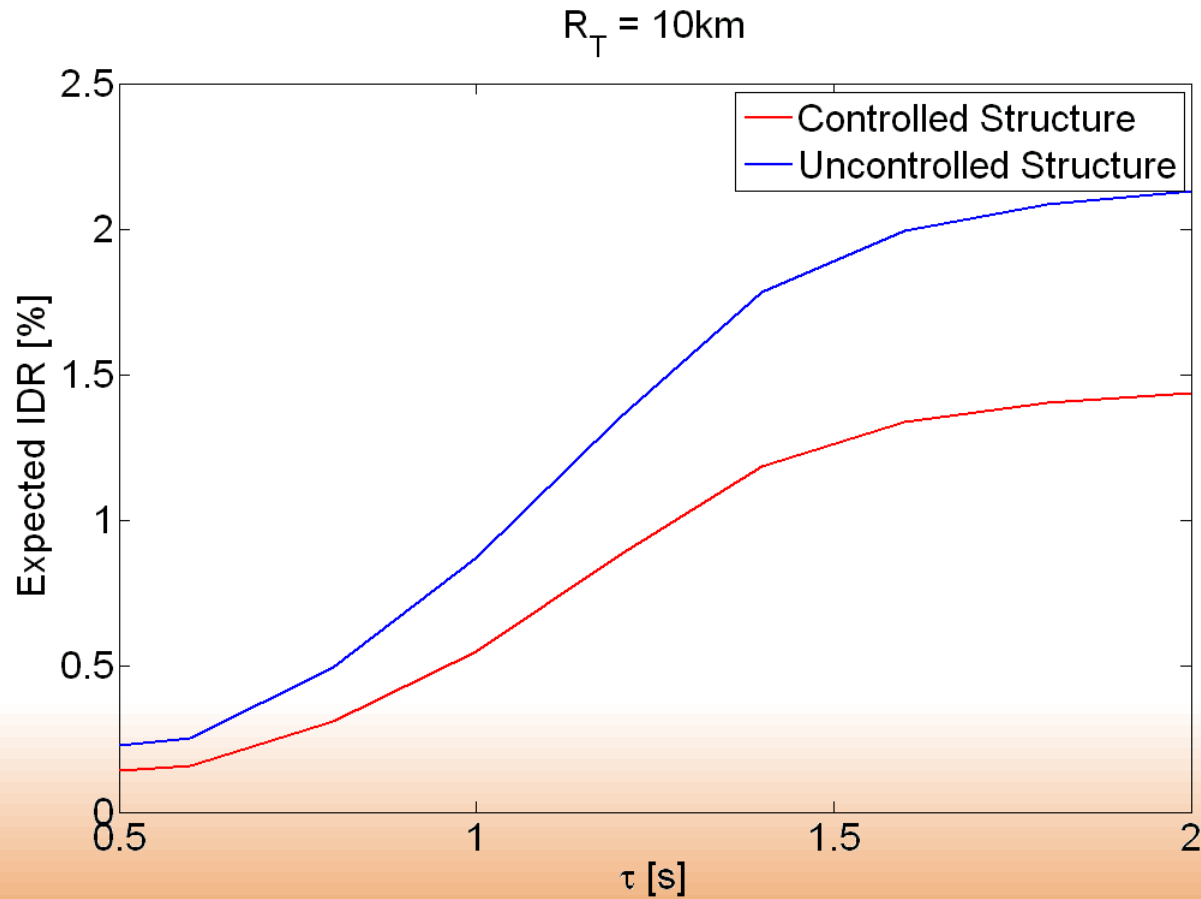
$$E[EDP | \tau] = \int_{EPD} \int_{PGA} edp f(edp | pga) f(pga | \tau) dEDP dPGA$$

Expected
Structural
performance

3. Seismic response
probability depending
on hazard

4. Real-time
hazard analysis

Riduzione della vulnerabilità in base alle informazioni del sistema di EW





In conclusione, da quello che conosciamo, per le reti ferroviarie:

- Il sistema di early warning non può essere semplicemente un sistema basato sulle soglie di scuotimento;
- Il sistema di early warning deve essere basato sulle conseguenze (perdite attese) e deve tenere conto del costo mancato e falso allarme;
- Le incertezze (tempo-varianti) sulle caratteristiche del terremoto devono essere considerate insieme a modelli di vulnerabilità della infrastruttura;
- Le azioni di riduzione del rischio in tempo reale possono addirittura il controllo strutturale semi-attivo.

Bibliografia

- Bindi D., Iervolino I., Parolai S. (2016) On-site structure-specific real-time risk assessment: perspectives from the REAKT project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14:2471–2493.
- Bindi D., Boxberger T., Orunbaev S., Pilz M., Stankiewicz J., Pittore M., Iervolino I., Ellguth E., Parolai S. (2015) On-site early-warning system for Bishkek (Kyrgyzstan). *Annals of Geophysics*, 58(1): S0112; doi:10.4401/ag-6664.
- Iervolino I. (2011) Performance-Based Earthquake Early Warning, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 31(2): 209-222.
- Iervolino I., Giorgio M., Galasso G., Manfredi G. (2009). Uncertainty in early warning predictions of engineering ground motion parameters: what really matters? *Geophysical research letters*, 36, L00B06, doi:10.1029/2008GL036644, 2009.
- Iervolino I., Giorgio M., Manfredi G. (2007) Expected loss-based alarm threshold set for earthquake early warning systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36:1151–1168.
- Iervolino I., Convertito V., Giorgio M., Manfredi G., Zollo A. (2006) Real time risk analysis for hybrid earthquake early warning systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(6): 867–885.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE,

Prof. iuino iervolino

Università degli Studi di Napoli Federico II

Telefono 081 7683488

E-mail iuino.iervolino@unina.it