



Osservazioni geomorfologiche e di sottosuolo in Pianura Padano-Veneta per l'identificazione di thrust attivi della catena Sudalpina: in cerca di indizi della sorgente del Terremoto di Verona del 1117

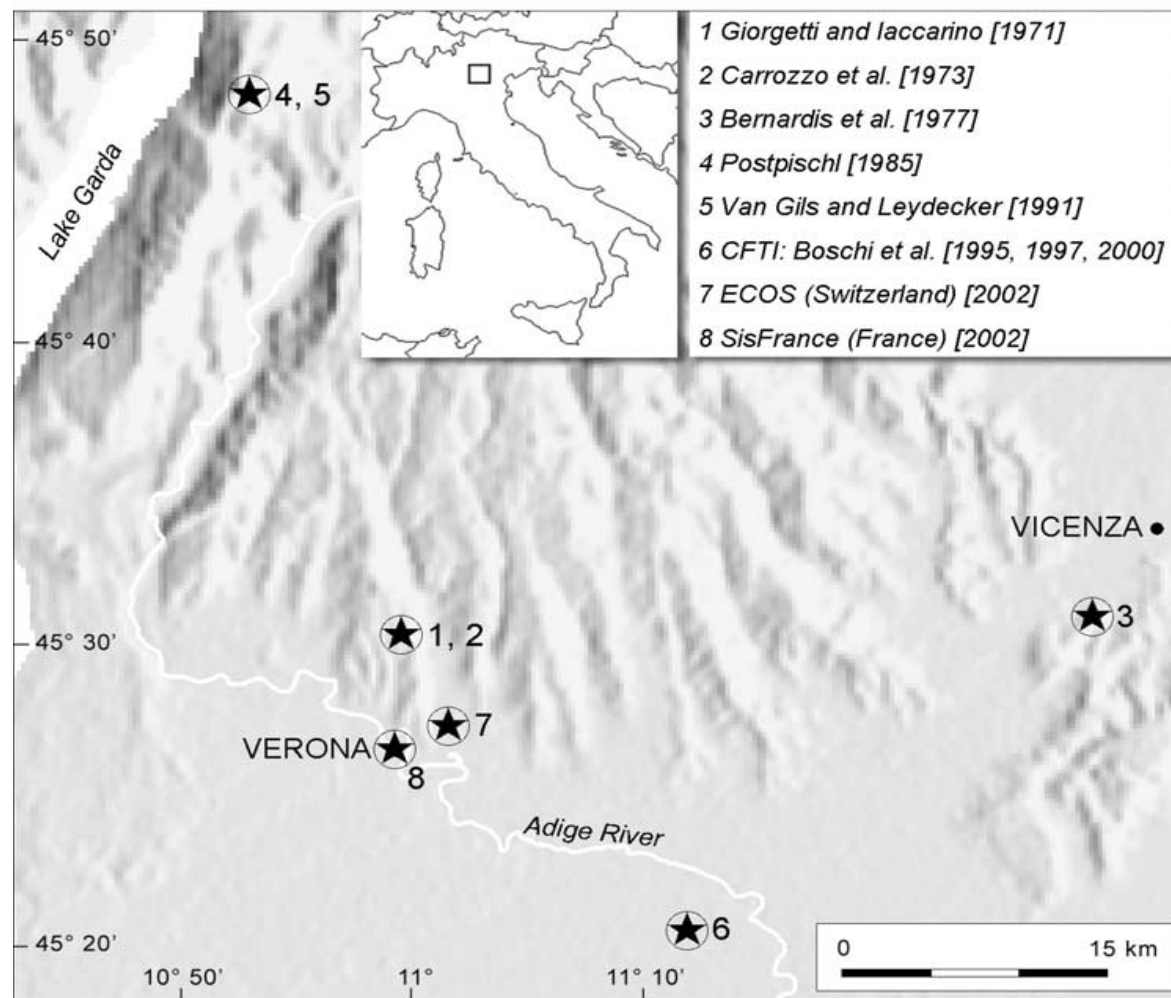
Pierfrancesco Burrato & Gianluca Valensise
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Sezione Roma 1 "Sismologia e Tettonofisica"

con contributi di: Roberto Basili e Paola Vannoli

Il Terremoto di Verona del 1117 e la sismicità dell'Italia nord orientale
Verona 11-13 settembre 2008
Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere - Museo di Storia Naturale

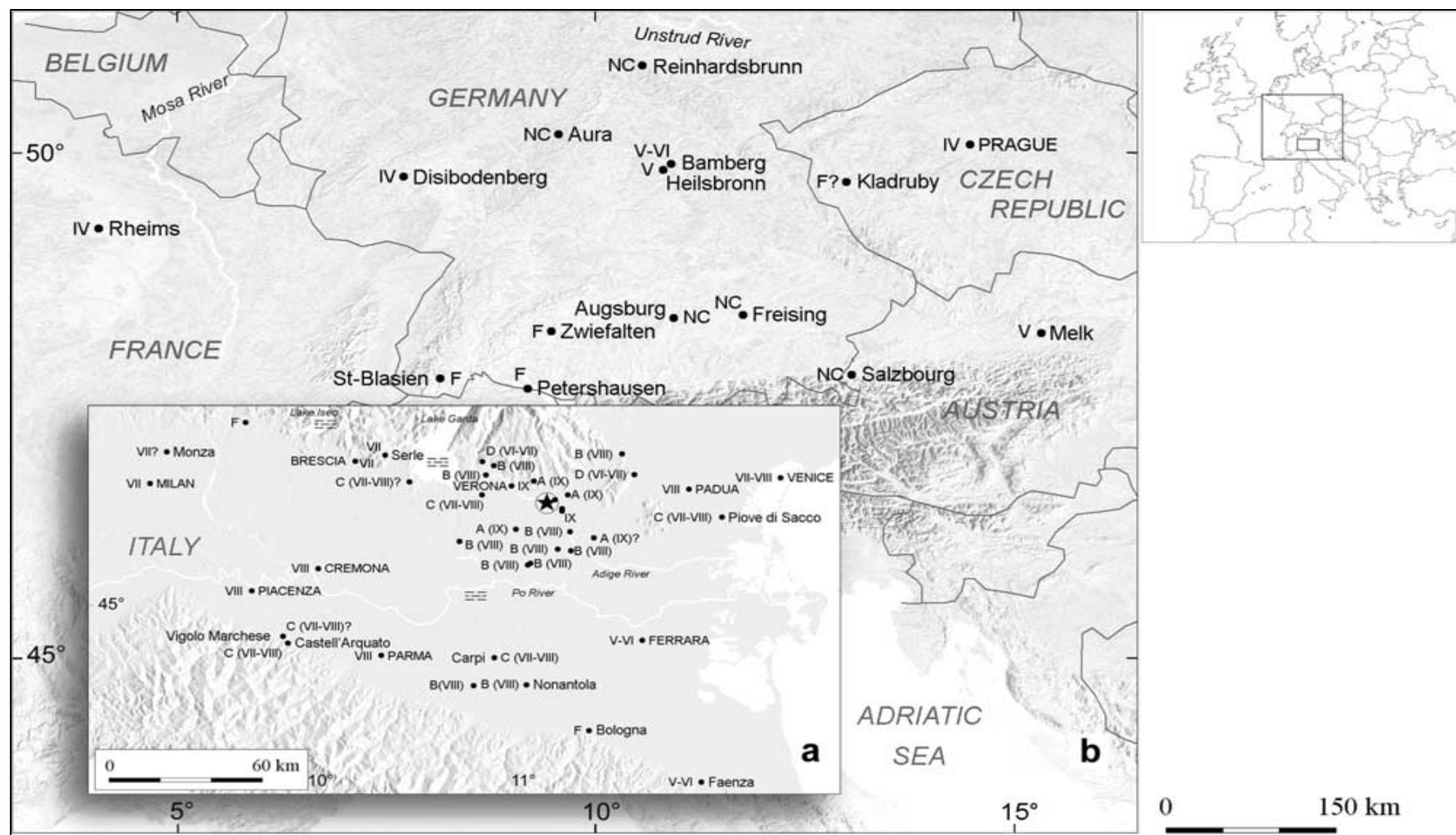


Localizzazione del terremoto del 1117





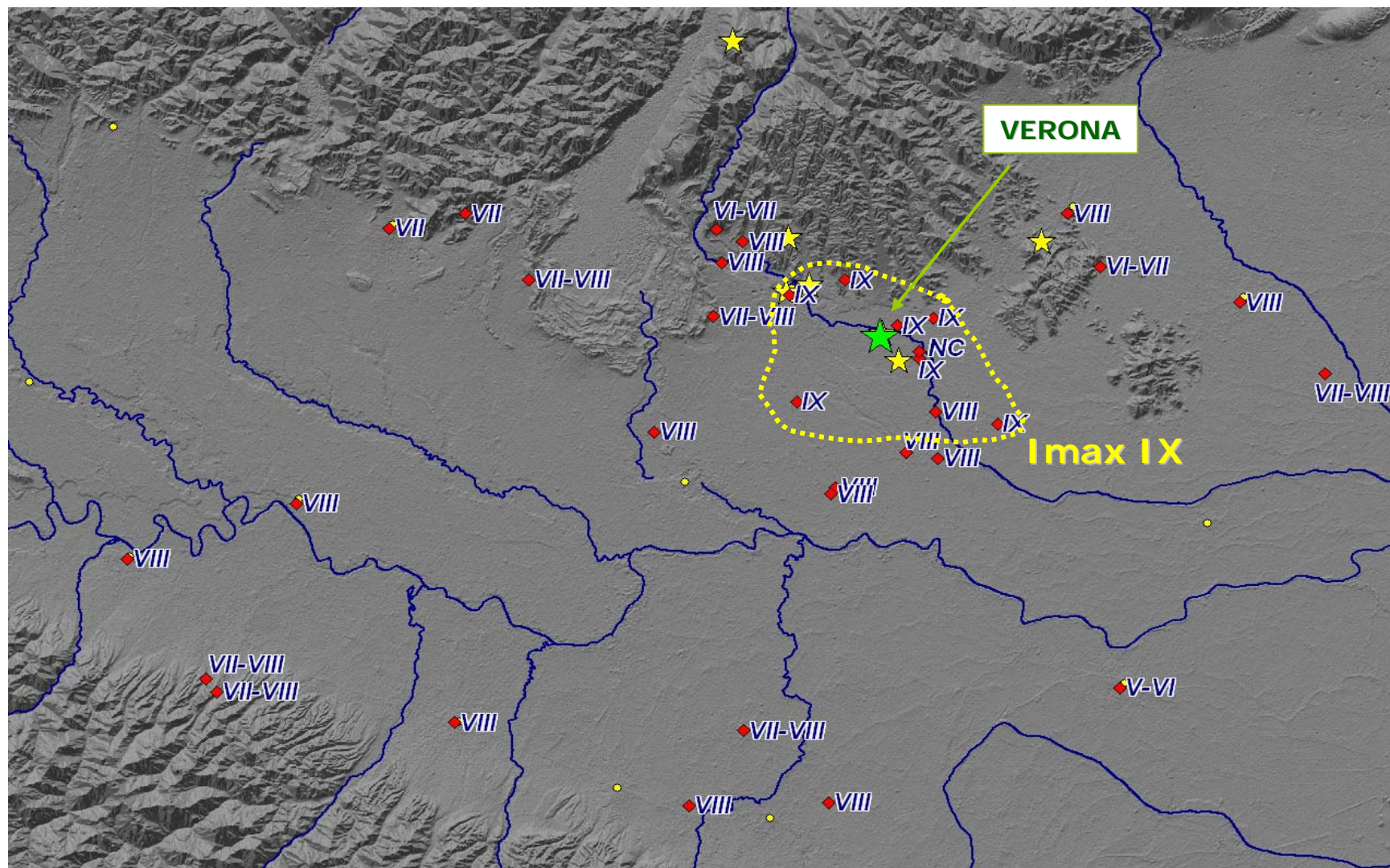
Localizzazione del terremoto del 1117



Guidoboni et al., 2005



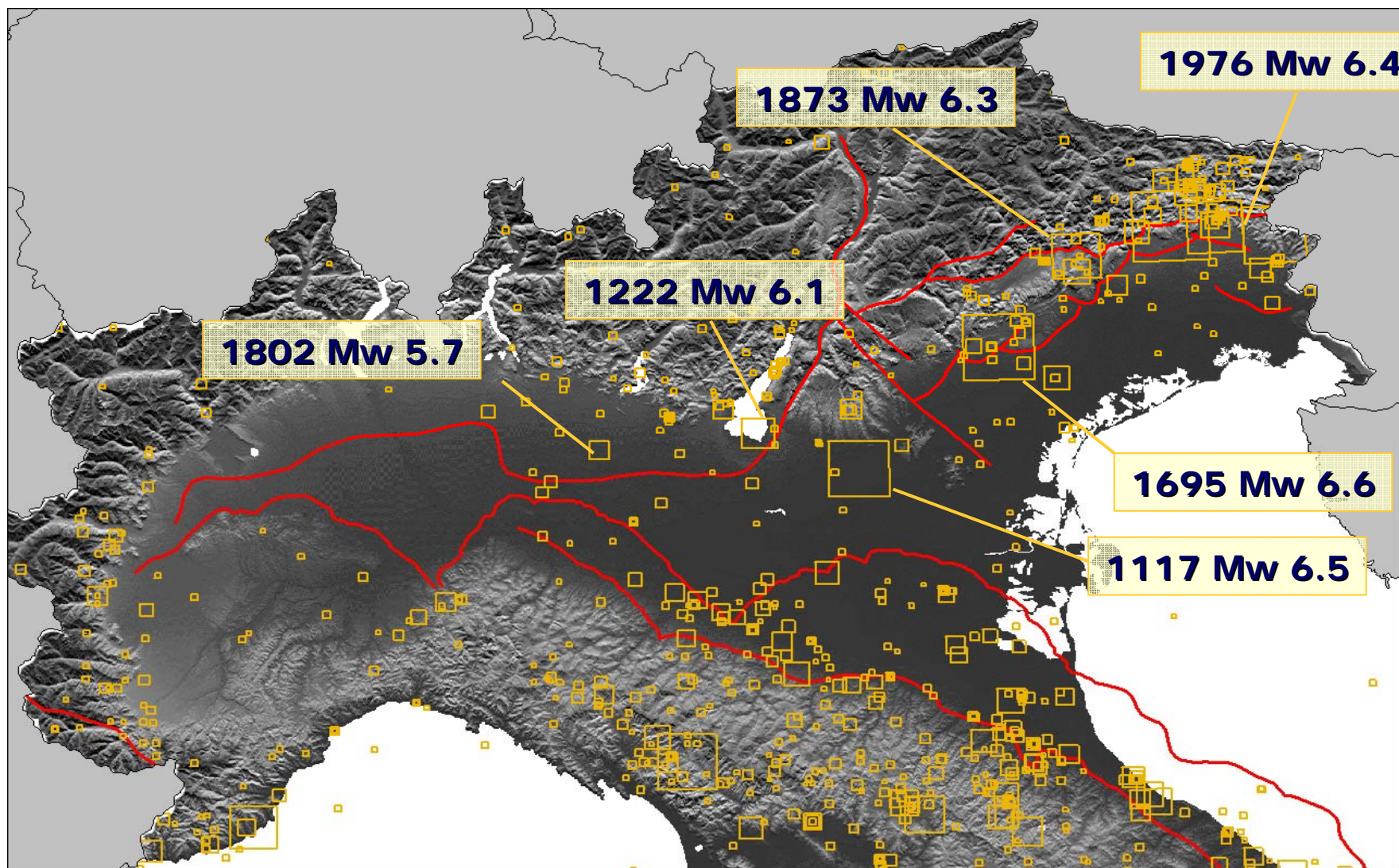
Localizzazione del terremoto del 1117



Area dei massimi risentimenti macrosismici da Guidoboni et al. 2005

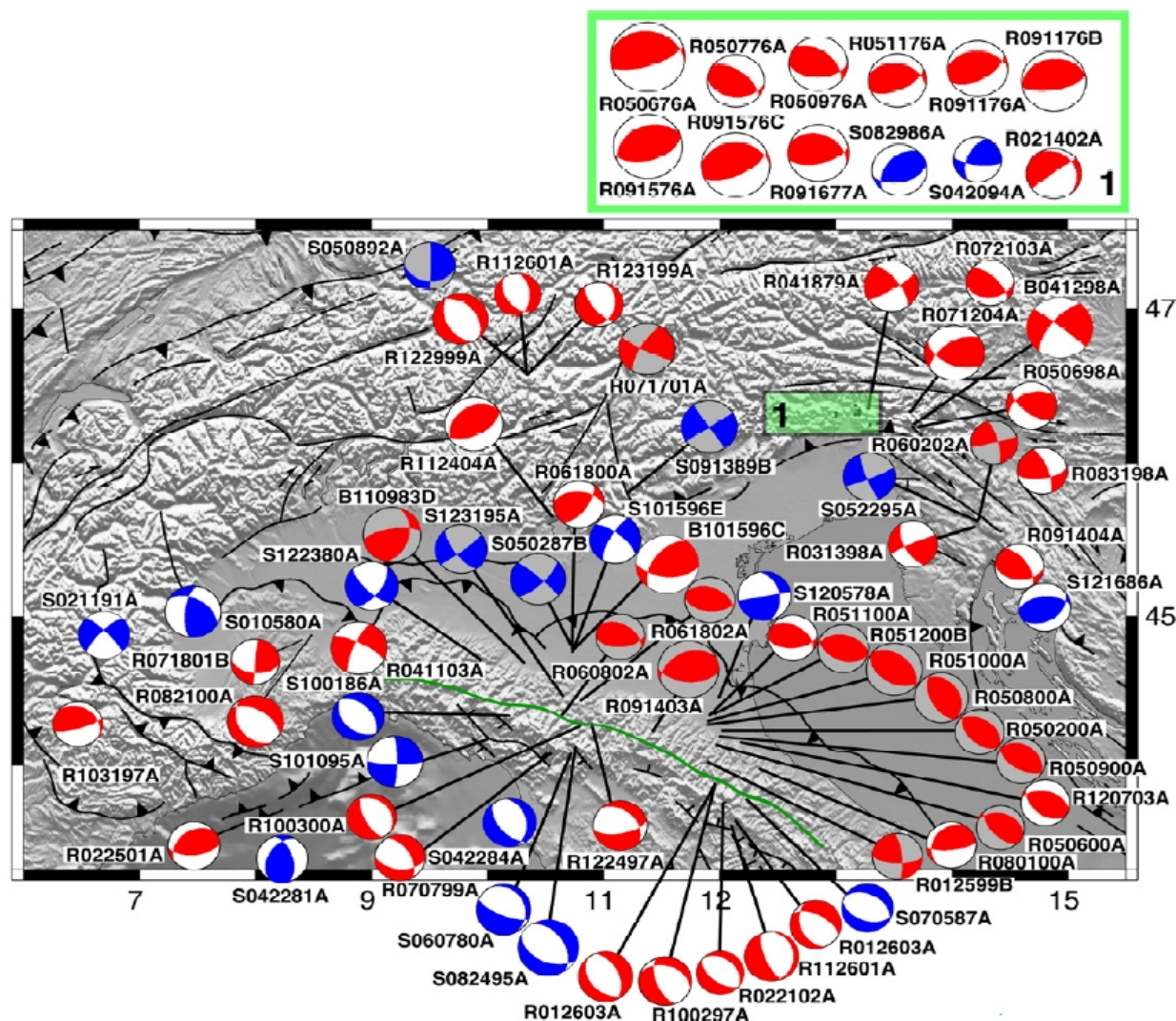


Tettonica attiva: sismicità storica



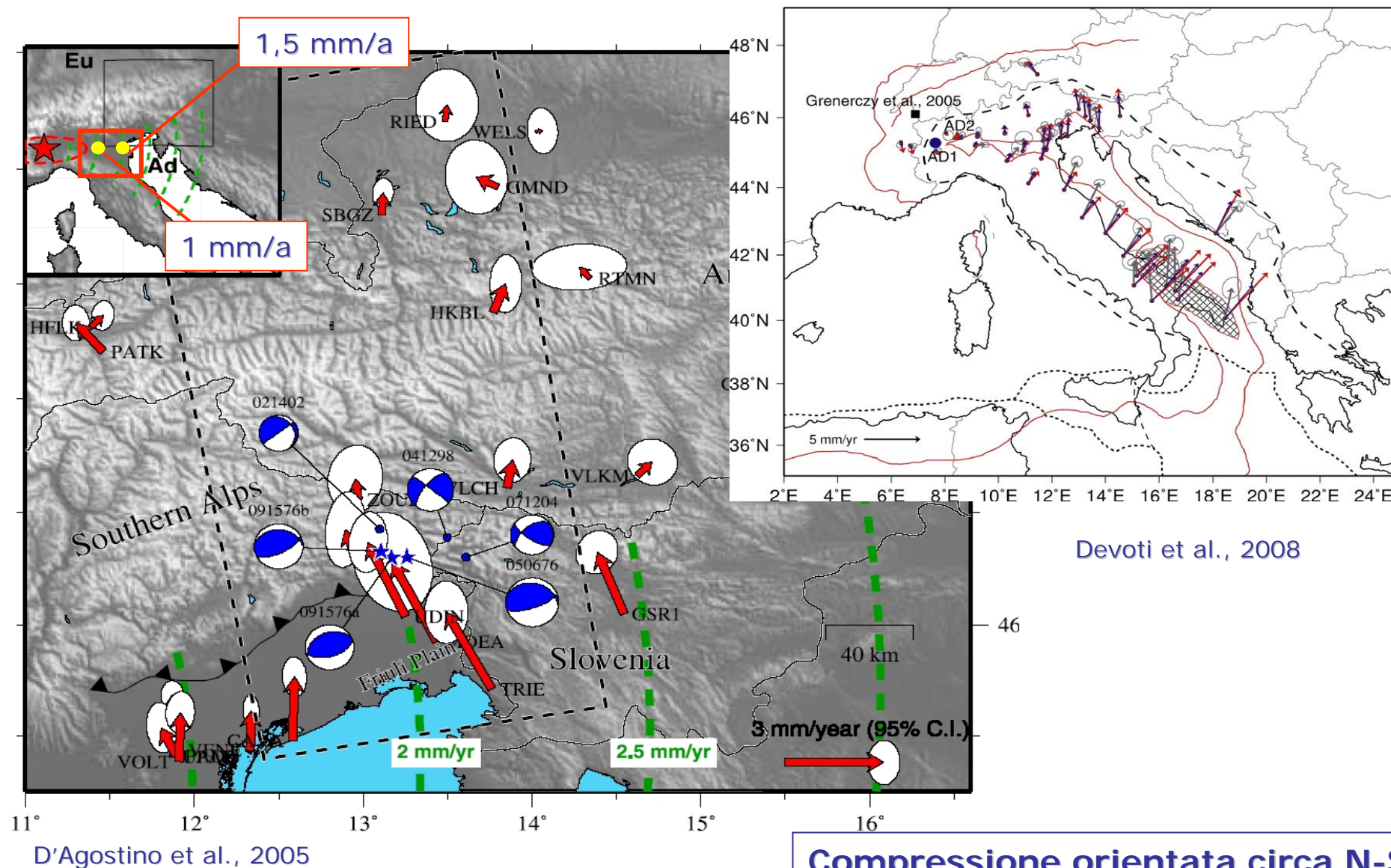


Tettonica attiva: sismicità strumentale





Tettonica attiva: GPS

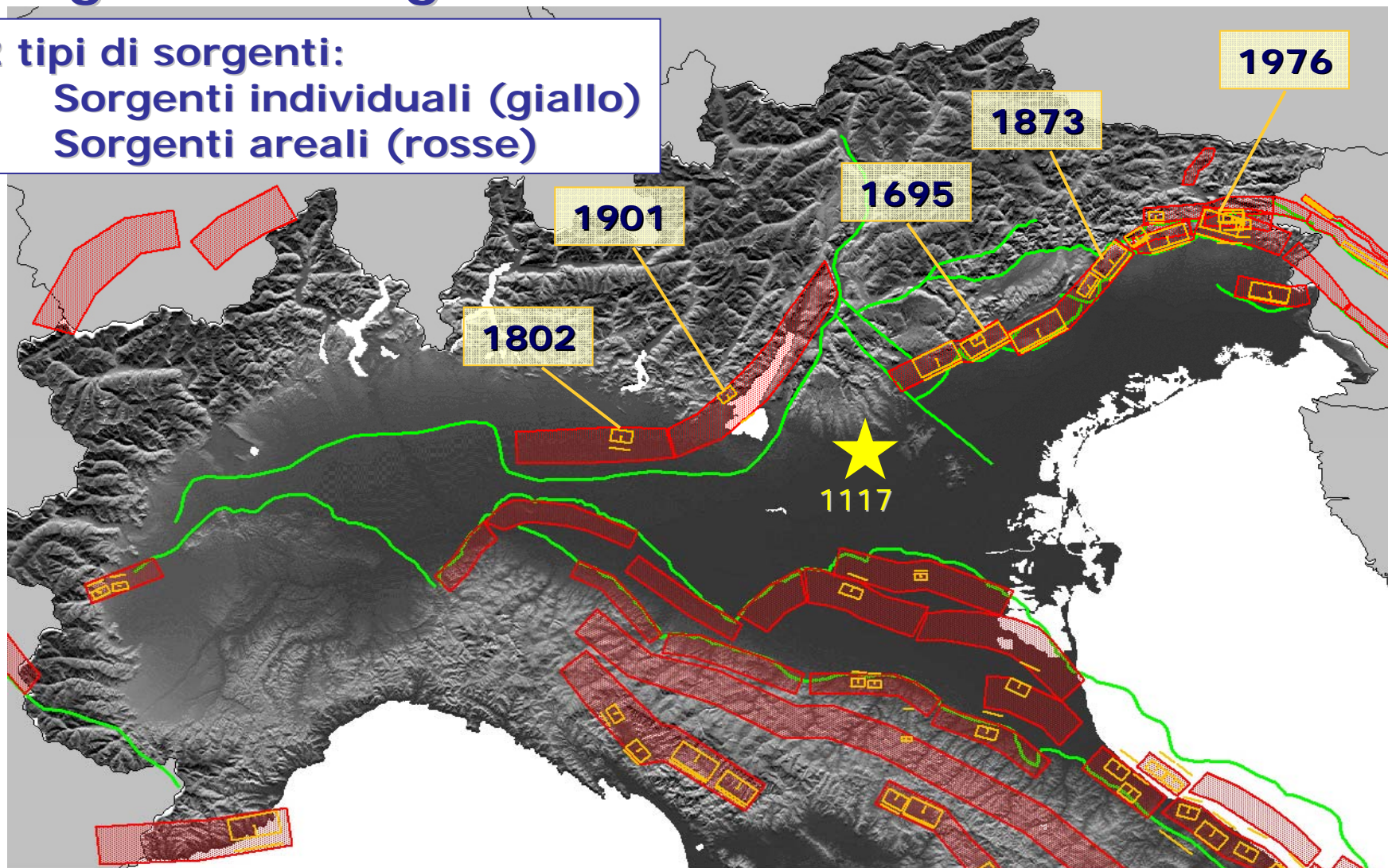




Sorgenti Sismogenetiche da DISS 3.0.4

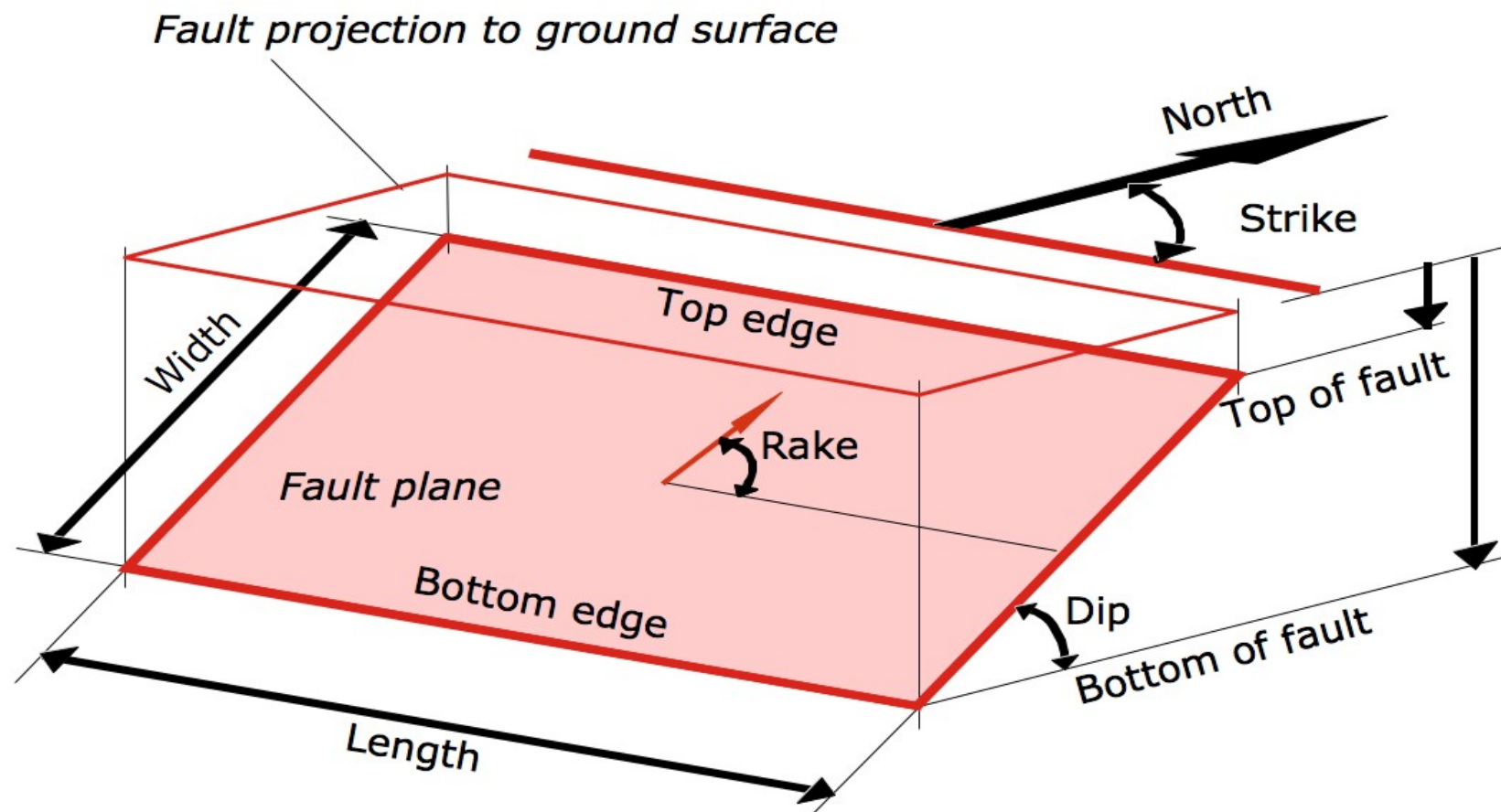
2 tipi di sorgenti:

- Sorgenti individuali (giallo)
- Sorgenti areali (rosse)





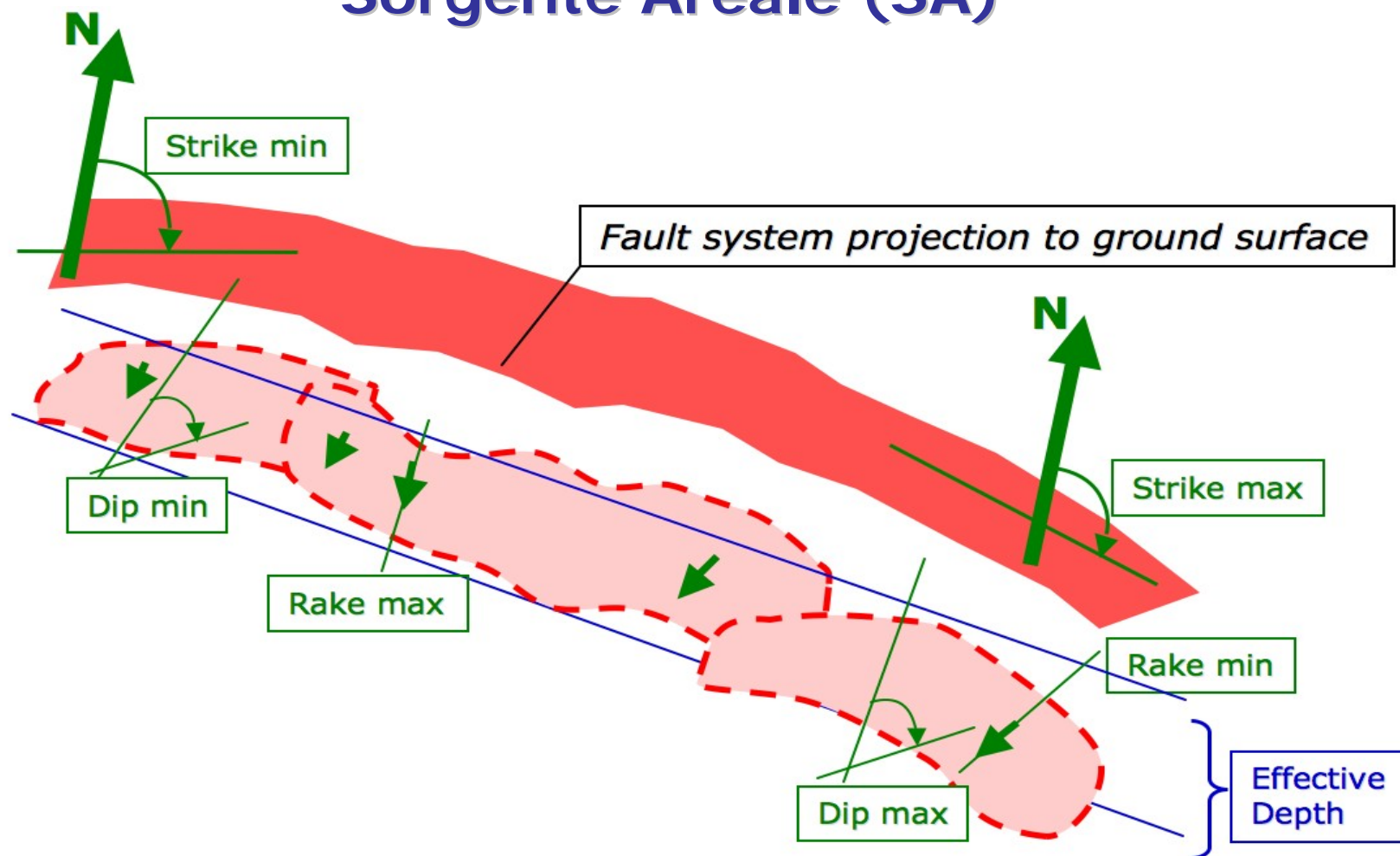
Sorgente Individuale (GG)



- ✓ *Introdotta nel 2000 con DISS v. 1.0 (prototipo)*
- ✓ *Basata su osservazioni geologiche e geofisiche*
- ✓ *Caratterizzata da parametri geometrici, cinematici e sismologici*
- ✓ *Stile di ricorrenza strettamente caratteristico*



Sorgente Areale (SA)



- ✓ *Introdotta nel 2005 con DISS v. 3.0*
- ✓ *Basata su osservazioni geologiche e geofisiche e su vincoli storici*
- ✓ *Non segmentata, non assume alcun modello di ricorrenza*

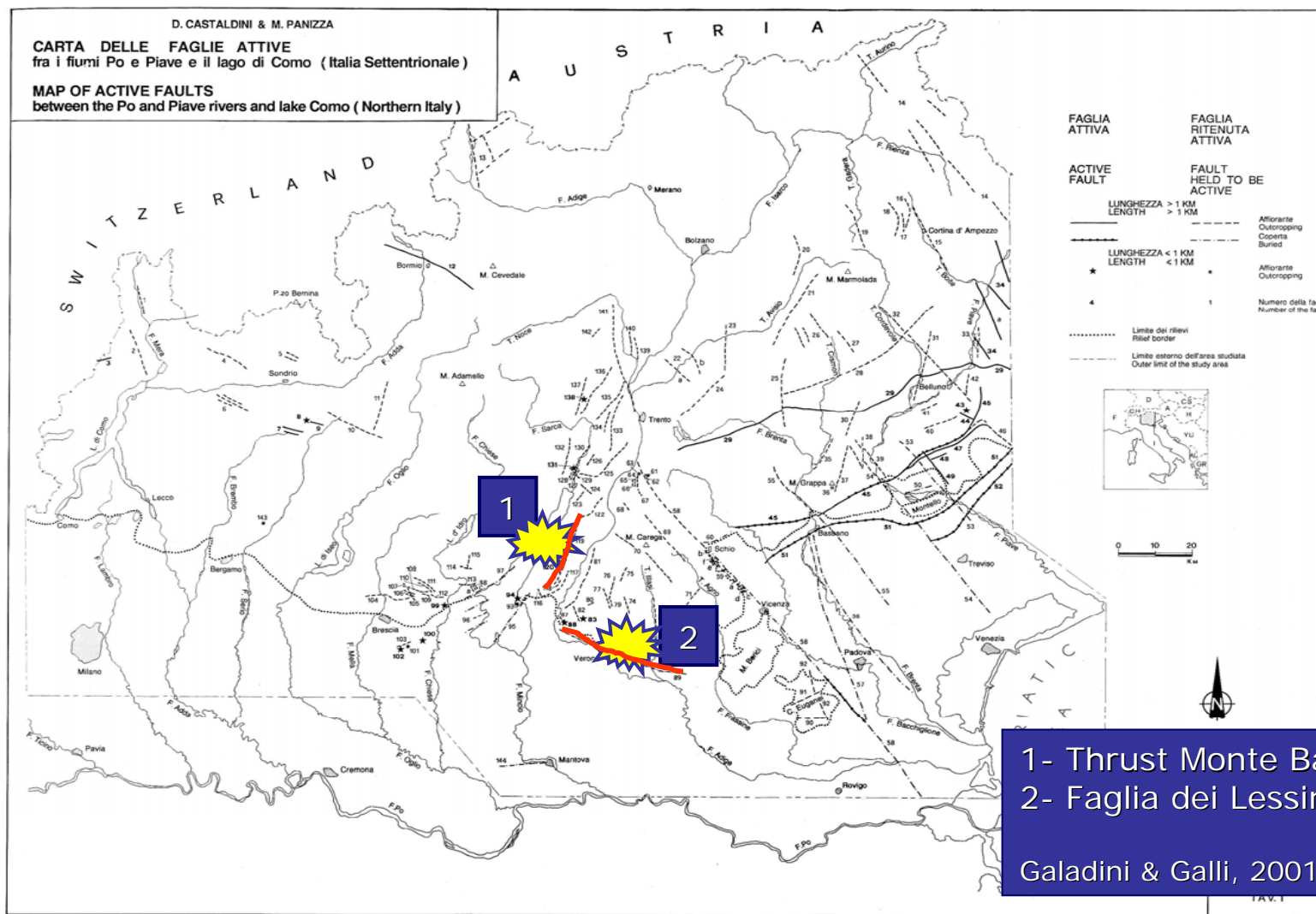


<http://www.ingv.it>





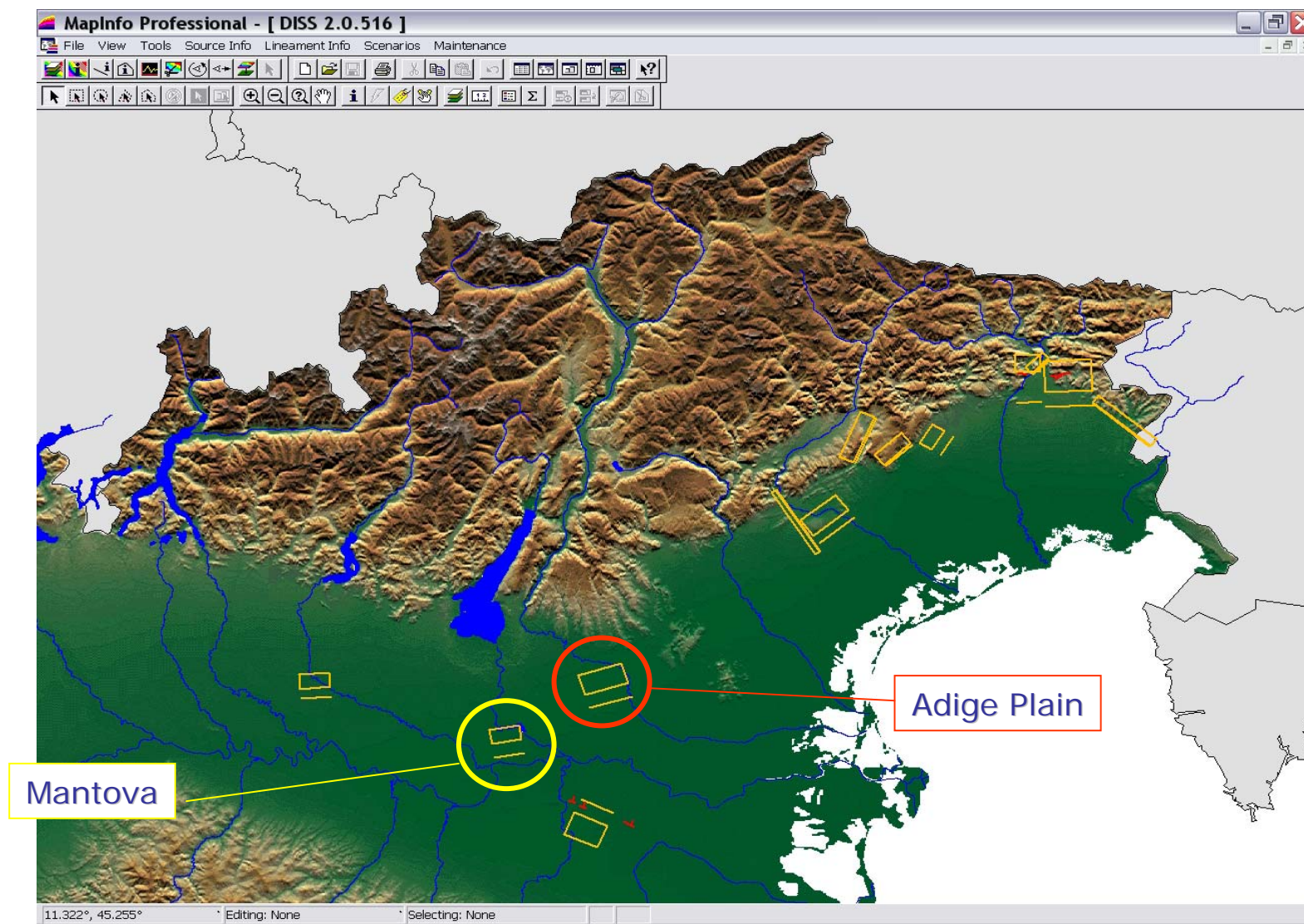
Il terremoto del 1117 nella letteratura



Castaldini & Panizza, 1991



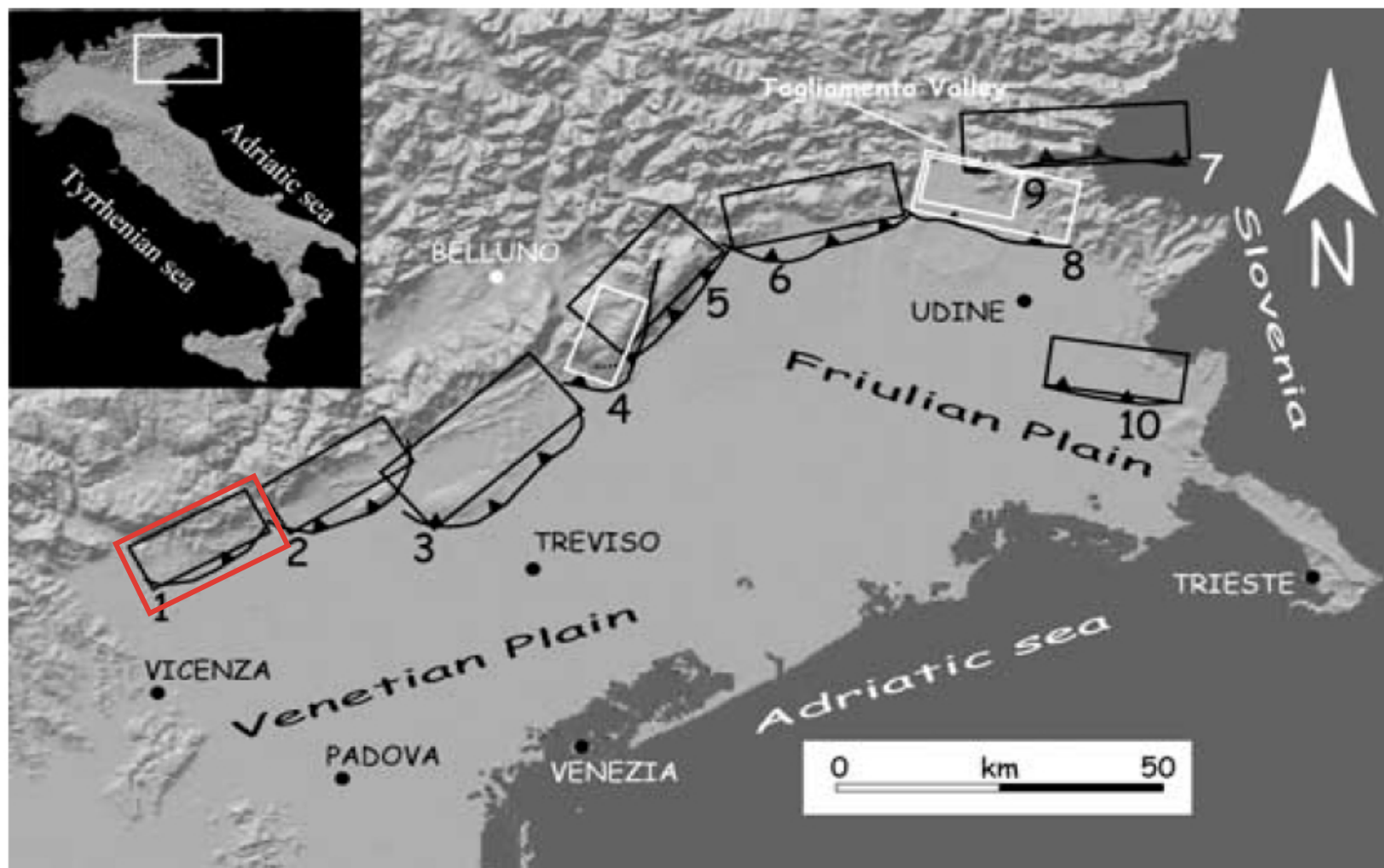
Il terremoto del 1117 nella letteratura



Valensise & Pantosti, 2001 – DISS 2.0

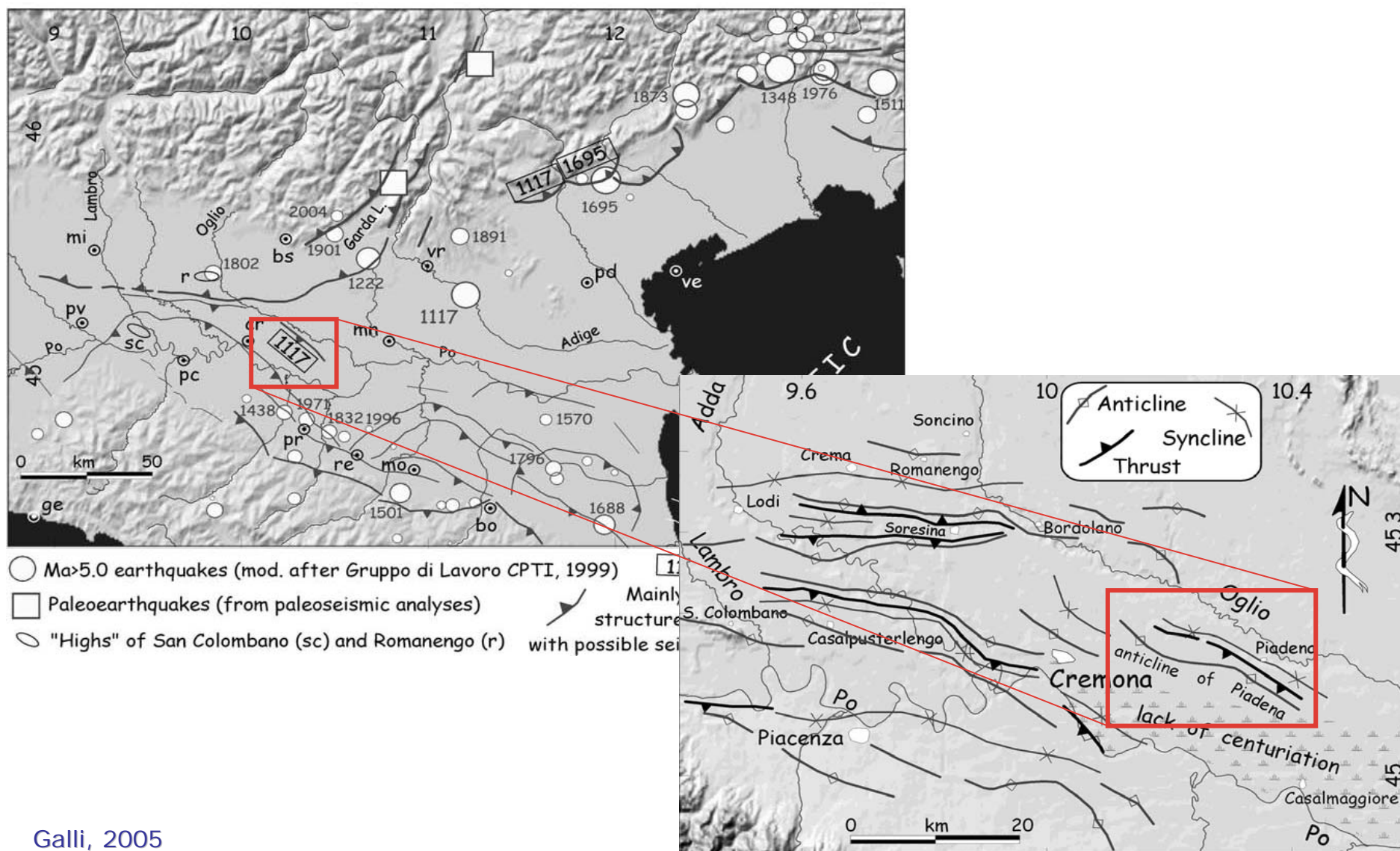


Il terremoto del 1117 nella letteratura





Il terremoto del 1117 nella letteratura



Galli, 2005

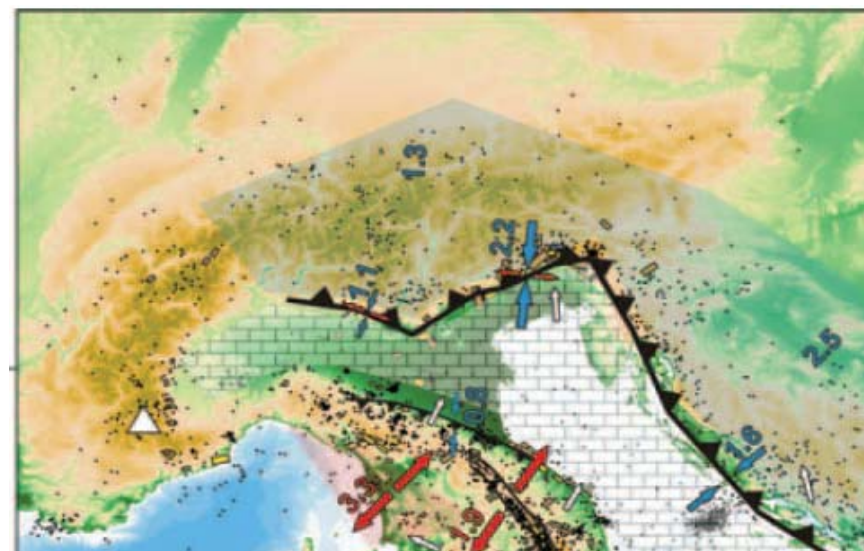
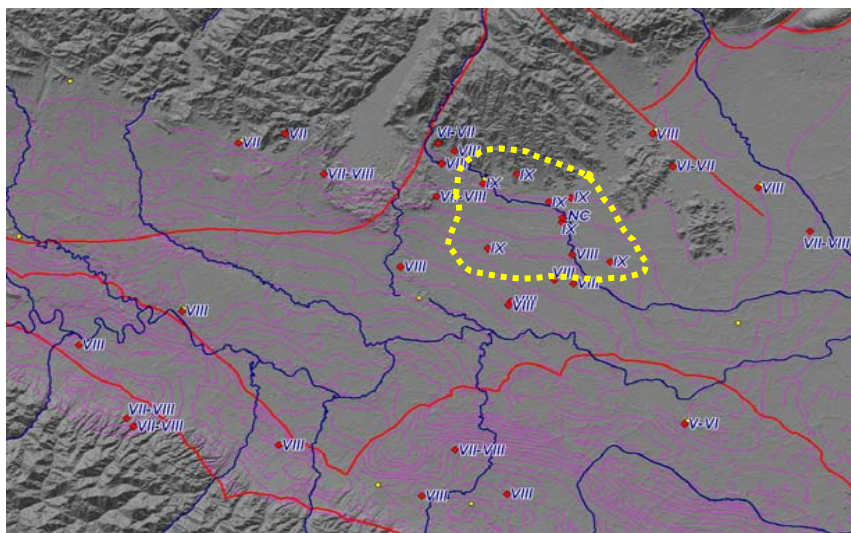


I ipotesi di partenza

Localizzazione: sorgente sismogenetica sepolta nella pianura a sud di Verona (area massimo risentimento)

Cinematica: faglia compressiva (da dati geologici, sismologici e GPS)

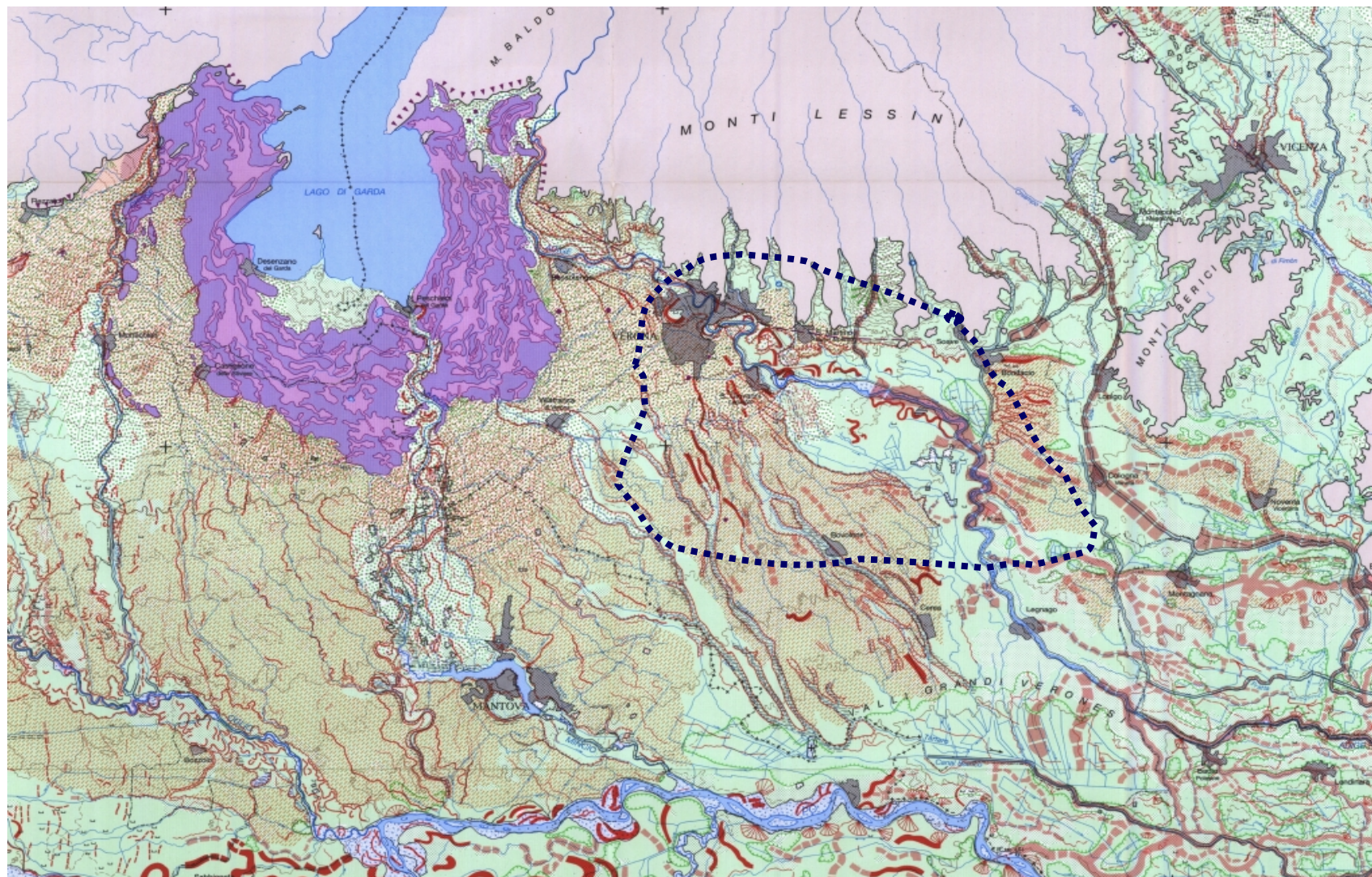
Geometria: thrust allineato con l'andamento dei fronti montuosi (Lessini) e andamento base Pliocene (ca. E-W)



Serpelloni et al., 2005



Inquadramento geologico/geomorfológico



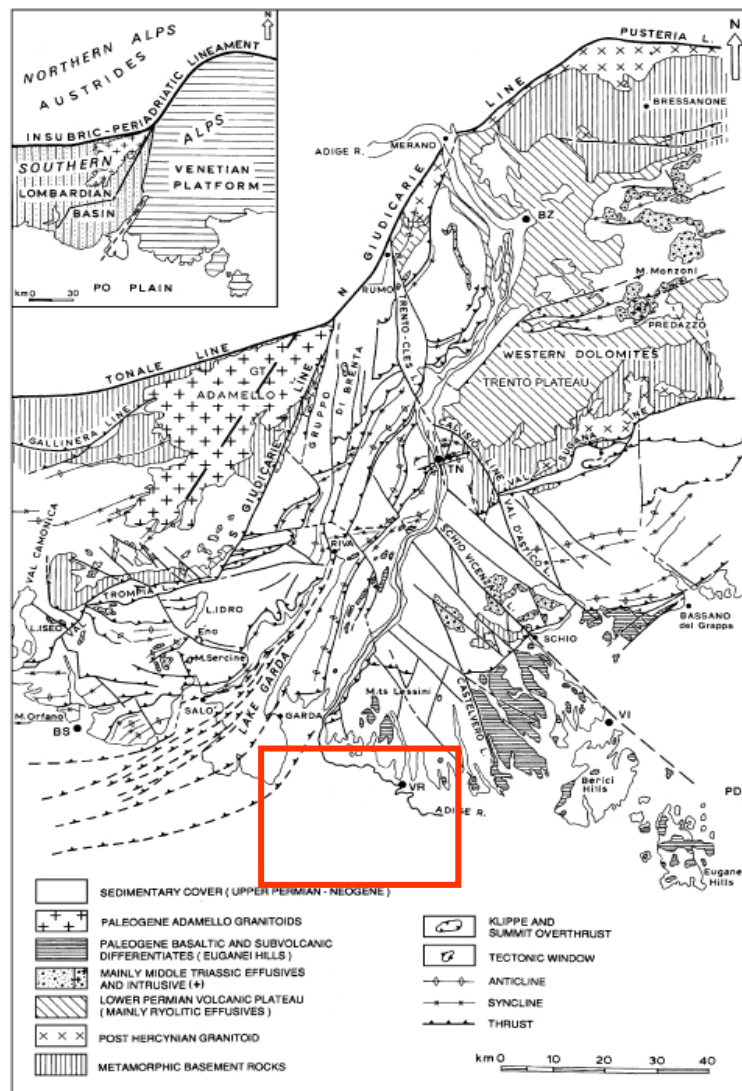
da: Castiglioni et al., 1997 – Carta Geomorfológica della Pianura Padana



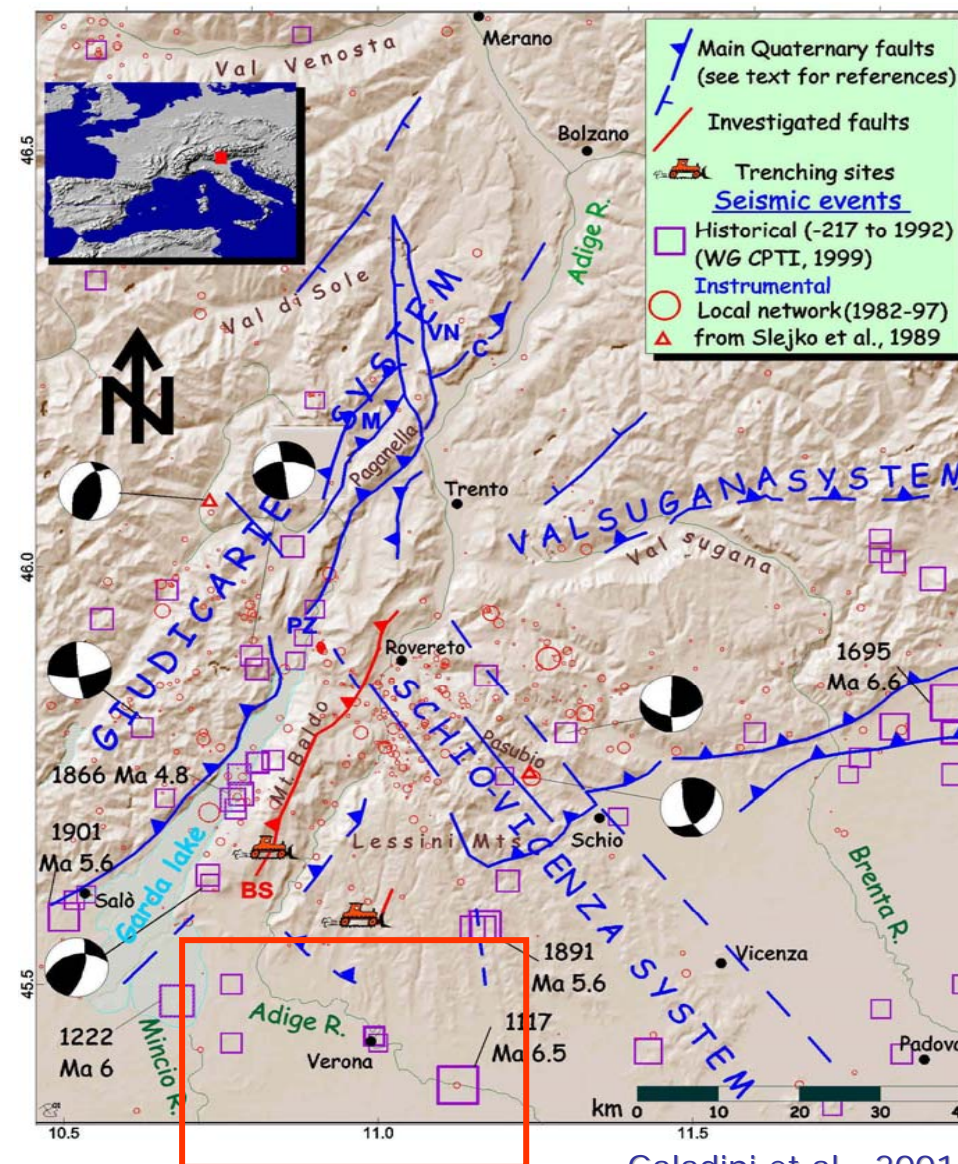
- Area di pianura facente parte della porzione più orientale della “superficie fondamentale” (aggradazione ultima glaciazione)
- Paleoalvei Adige e altri corsi d'acqua
- Zona con morfologia depressa (Valli Grandi Veronesi)



Inquadramento strutturale



Castellarin et al., 2006



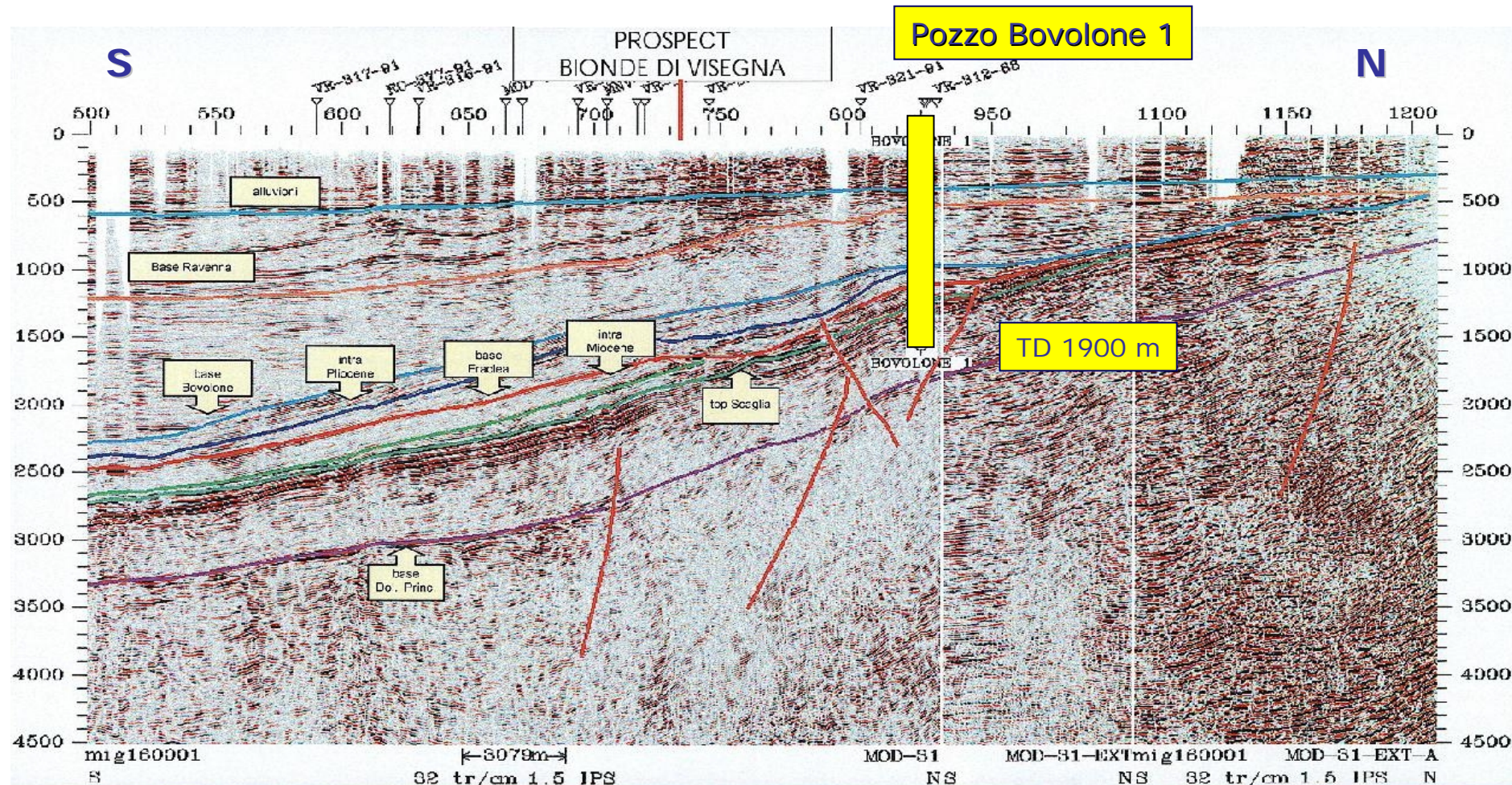
Galadini et al., 2001



Secondo la letteratura l'area epicentrale del terremoto del 1117 è una zona sostanzialmente indeformata (non sono riportate strutture tettoniche)



Dati di sottosuolo

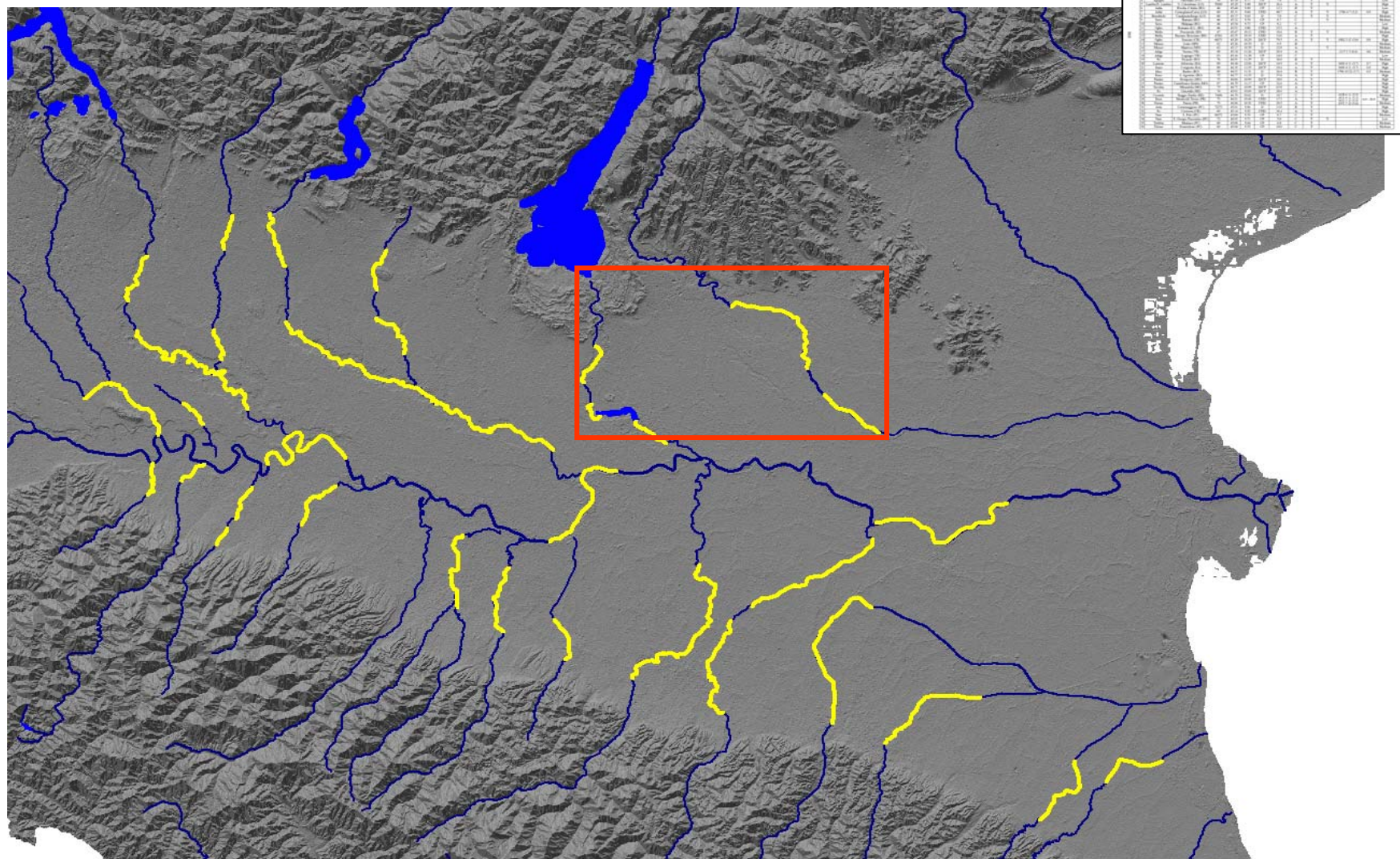




I dati di sottosuolo invece fanno vedere
che la monoclinale regionale è
deformata da strutture compressive
sepolte



Anomalie idrografiche



da: Burrato et al., 2003



Table 1. List of the drainage anomalies identified in the Po Plain and positively related to a tectonic origin (ID numbers as in fig. 5). The main types of anomaly that were recognised are drainage Diversions (D) and Channel Pattern shifts (CP). The rating of the anomalies is based on the length of the anomalous reach, on the type of anomaly, and in the case of diversions it is also based on the angle of divergence between the mean flow direction and the direction of the maximum topographic gradient (see Section 4 for details). Higher ratings (A) were assigned to anomalies characterised by longer anomalous reaches and Diversions (D) associated with Channel Pattern shifts (CP). Historical earthquakes tentatively associated to each anomaly are shown along with minimum epicentral distance from the anomalous reach (M_e from CPTI, Working Group, 1999). The last column lists how much we rely on the tectonic origin of the anomaly, based on all considerations. Anomalies #28, 29 and 30 occur within 20 km of the epicentral location of the four historical earthquakes listed in the nearby cell.

Id	River name	Location of anomaly	IGM Sheet # (1:100 000)	Lat N	Long W	Anomaly type	Length of anomalous reach (km)	Anomaly rating	Subsurface anticline	Topographic expression	Associated historical earthquake(s) (M_e)	Distance from anomaly (km)	Confidence of tectonic origin
1	Po	Montarolo (VC)	57	45.18	8.29	CP/D	36.0	A	Y	Y			High
2	Sesia	Palestro (VC)	57/58	45.30	8.52	D	22.4	B					Medium
3	Agogna	Vespolate (NO)	58	45.33	8.66	D	13.9	C	Y				Low
4	Agogna	Ottobiano (PV)	58	45.14	8.77	CP	7.6	C	Y				Low
5	Lambro/S. Lambro	S. Colombano (LO)	59/60	45.20	9.48	D/CP	26.4	A	Y	Y			High
6	Adda	Rivolta d'Adda (BG)	46	45.44	9.49	CP	13.3	B	Y				Low
7	Adda	Cornegliano/Cavia (LO)	60	45.31	9.60	CP/D	48.7	A	Y	Y	1786 4 7 (5.2)	0.0	High
8	Brembiolo	Casalpusterlengo (LO)	60	45.17	9.65	D	7.0	C	Y	Y			Medium
9	Serio	Bariano (BG)	46	45.32	9.70	CP	8.7	C		Y			Medium
10	Serio	Malpaga (BG)	46	45.54	9.73	CP	8.2	C					Low
11	Oglio	Romano di L. (BG)	46	45.53	9.86	CP/D	15.3	A					High
12	Mella	Poncareale (BS)	47	45.47	10.12	CP/D	10.4	B	Y	Y			Medium
13	Mella	Bassano Bresciano (BS)	47/61	45.35	10.19	CP/D	13.0	A	Y				High
14	Oglio	Soncino (CR)	60/71	45.20	10.29	D/CP	79.5	A	Y	Y	1802 5 12 (5.6)	9.8	High
15	Mincio	Goito (MN)	62	45.26	10.70	D	8.9	B					Medium
16	Mincio	Mantova (MN)	62	45.17	10.70	D	23.8	A		Y			Medium
17	Adige	Verona (VR)	49	45.34	11.26	D/CP	29.4	A			1117 1 3 (6.6)	4.6	Medium
18	Adige	Legnago (VR)	63	45.16	11.38	CP	14.9	C					Low
19	Po	Ficarolo (RO)	76	44.91	11.39	D	36.0	B	Y				Medium
20	Lamone	Alfonsine (RA)	89	44.44	12.06	D/CP	14.9	A	Y		1688 4 11 (5.7)	8.7	High
21	Senio	Cotignola (RA)	88	44.38	11.95	D/CP	19.4	A	Y		1688 4 11 (5.7)	0.0	High
22	Idice	Budrio (BO)	88	44.53	11.51	D	26.4	B	Y		1796 10 22 (5.7)	6.5	Medium
23	Reno	S. Agostino (BO)	75	44.77	11.35	D	37.6	A	Y				High
24	Panaro	Bomporto (MO)	75	44.66	10.99	D/CP	30.0	A	Y				High
25	Panaro	Castelfranco Emilia (MO)	87	44.79	11.17	CP	32.6	A	Y				High
26	Secchia	Mirandola (MO)	75	44.73	10.99	D/CP	43.8	A	Y				High
27	Po	Guastalla (RE)	74	45.01	10.69	D/CP	28.6	A	Y				High
28	Crosto	Reggio Emilia (RE)	74/86	44.70	10.62	D	10.7	C	Y		1438 6 11 (5.5)	6.0 - 20.0	Medium
29	Enza	Monticelli Terme (PR)	73	44.81	10.44	CP/D	17.3	A	Y		1831 9 11 (5.3)		High
30	Parma	Parma (PR)	73	44.86	10.32	CP/D	20.5	A	Y		1832 3 13 (5.5)		Medium
31	Arda	Cortemaggiore (PC)	72/73	45.01	9.96	D	13.8	B	Y		1971 7 15 (5.6)		High
32	Po	Cremona (CR)	60	45.14	9.92	CP/D	36.4	A	Y				High
33	Nure	S. Polo (PC)	60/72	45.00	9.76	CP	8.7	C	Y				Medium
34	Nure	S. Giorgio Piacentino (PC)	72	44.93	9.71	CP	5.0	C	Y	Y			Low
35	Trebbia	Maniago (PC)	60	45.06	9.64	CP	6.8	C	Y				Medium
36	Tidone	Pontetidone (PC)	60	45.04	9.53	CP	10.0	C	Y				Medium

da: Burrato et al., 2003



La mappa delle anomalie idrografiche mostra che il Fiume Adige segue un andamento anomalo (come ad ovest il Mincio, ma con una concavità opposta)



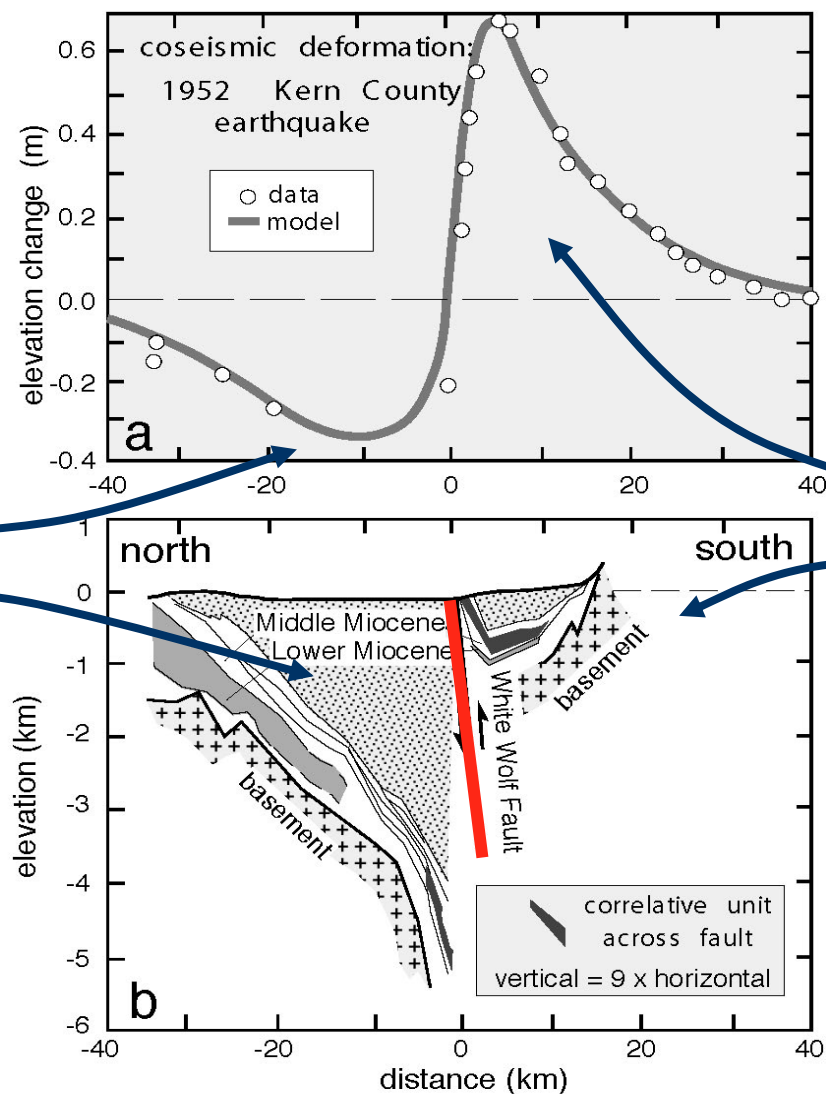
Approccio metodologico

Terremoti superficiali (prof. < 15 km) di
magnitudo > 5.5 producono
deformazioni permanenti del suolo
identificabili e misurabili.



Kern County 1952 earthquake M 7.3

hangingwall
subsidence
=
sedimentary
filling



footwall
uplift
=
erosion



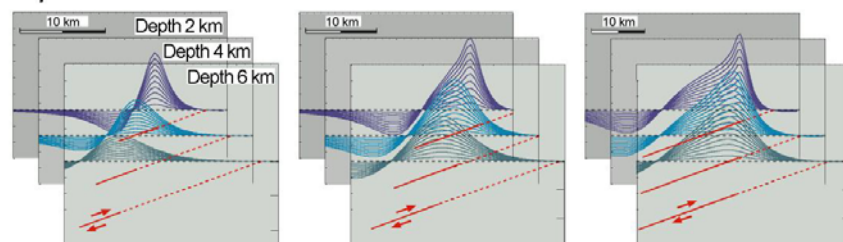
- La deformazione cosismica viene misurata con metodi geodetici
- Essa si cumula con il ripetersi dei terremoti e diviene quindi quantificabile anche con metodi geologici e geomorfologici



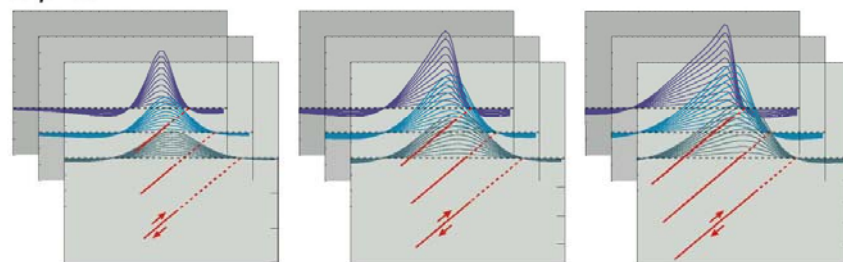
Effetti in superficie prodotti da un thrust

2D vertical displacement patterns

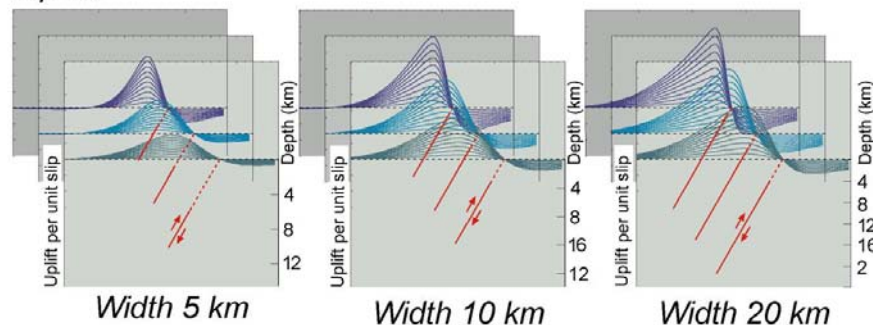
Dip 20° (totally relaxed halfspace)



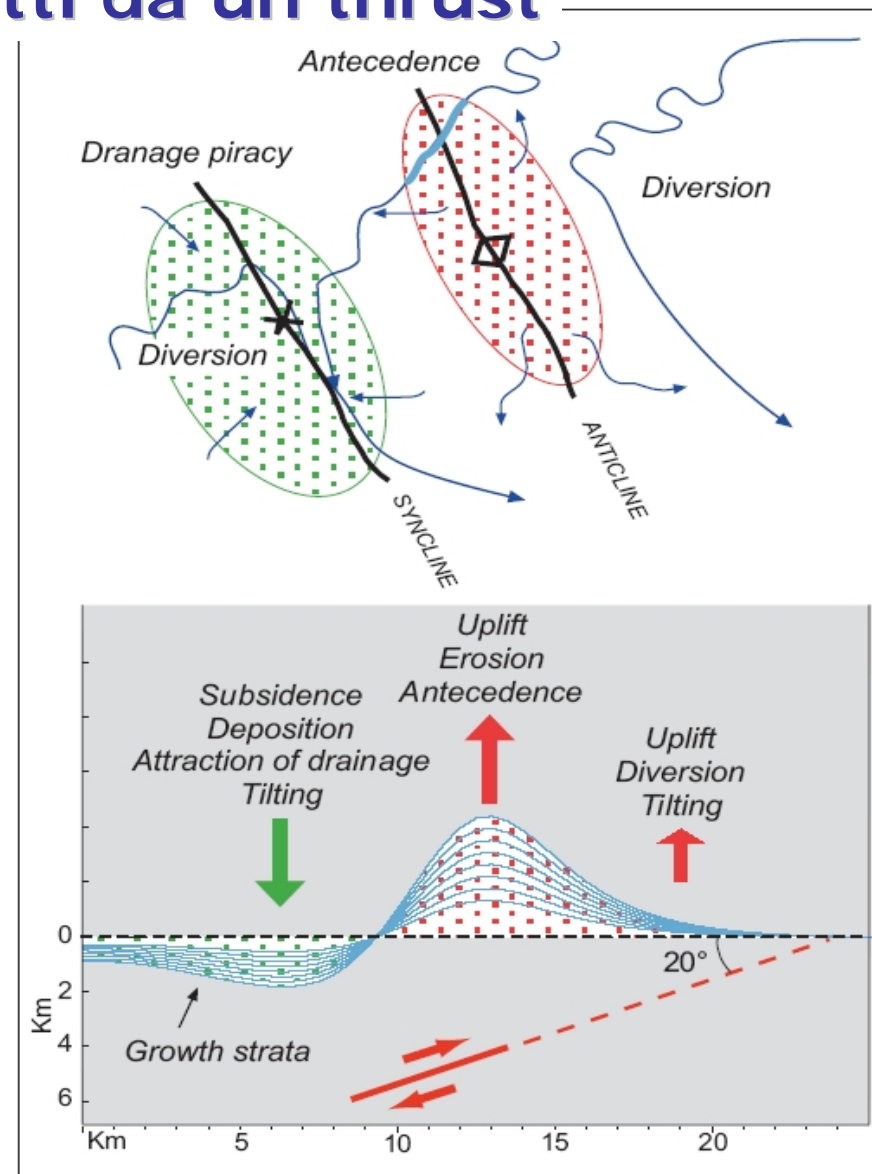
Dip 40°



Dip 60°



Burrato et al., 2003



Burrato et al., 2003

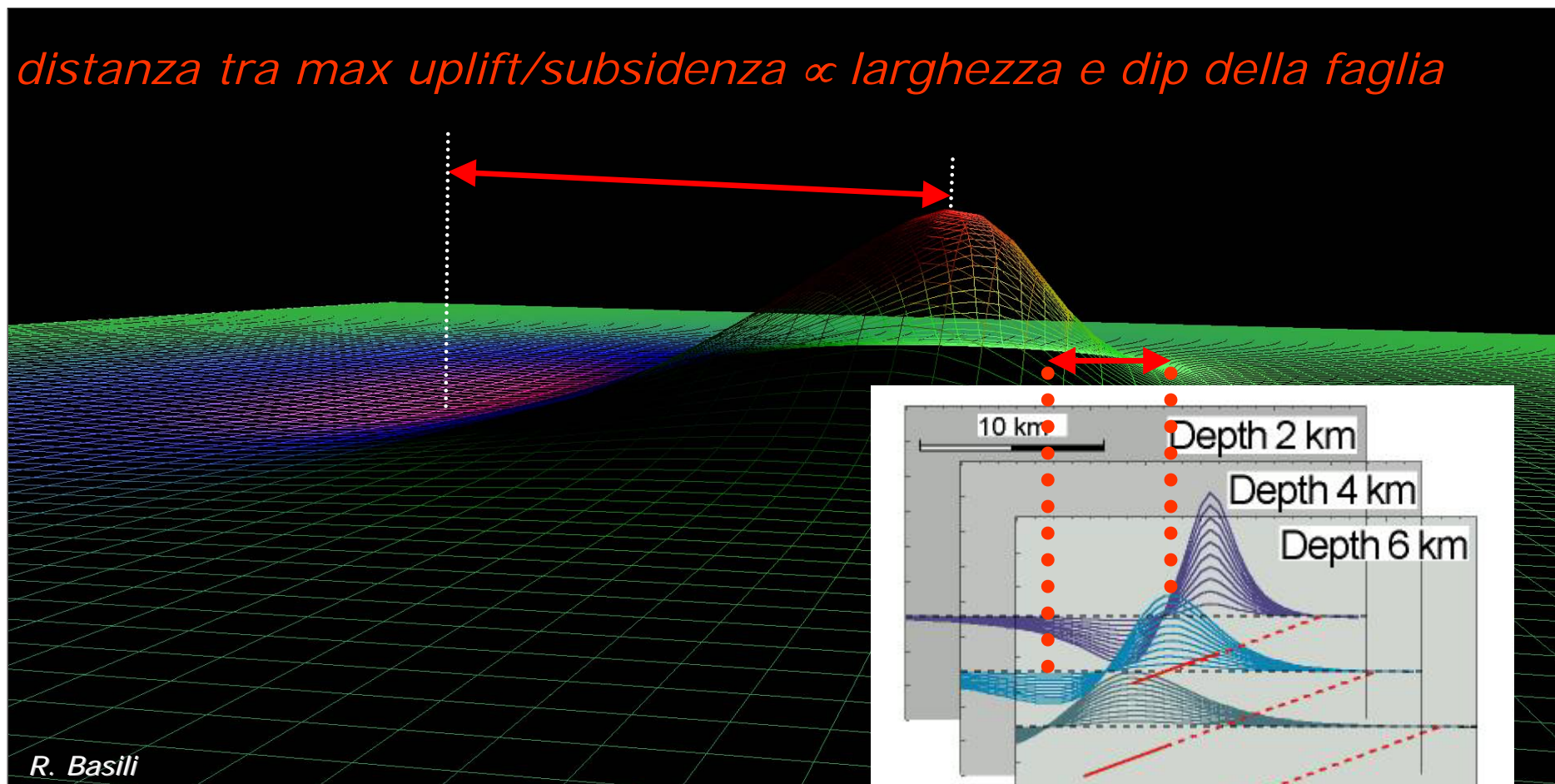


- La deformazione cosismica e quella cumulata possono essere studiate usando i modelli di dislocazione
- relazioni analitiche legano la geometria e cinematica delle faglie con il campo di deformazione superficiale



Effetti in superficie

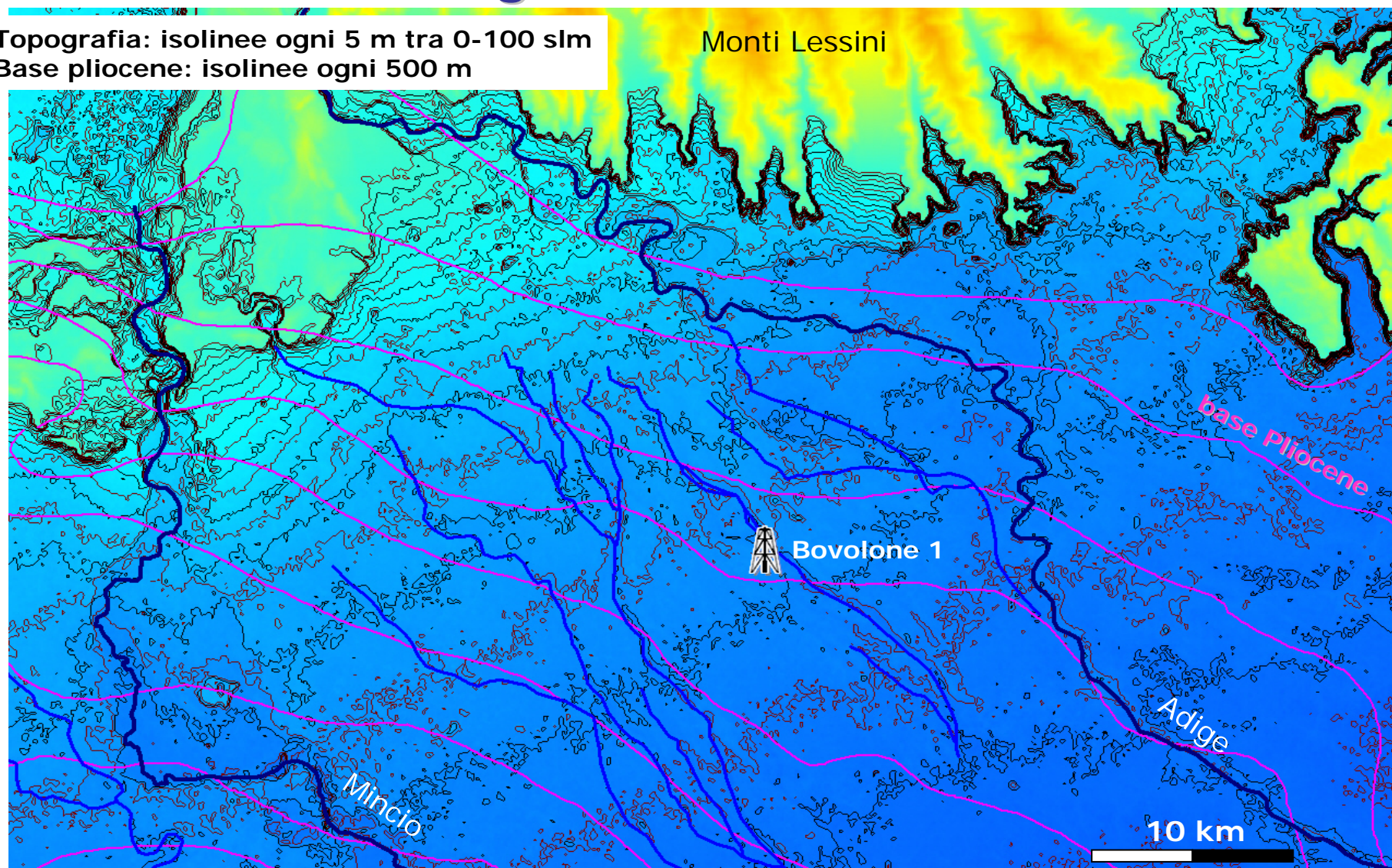
distanza tra max uplift/subsidenza \propto larghezza e dip della faglia





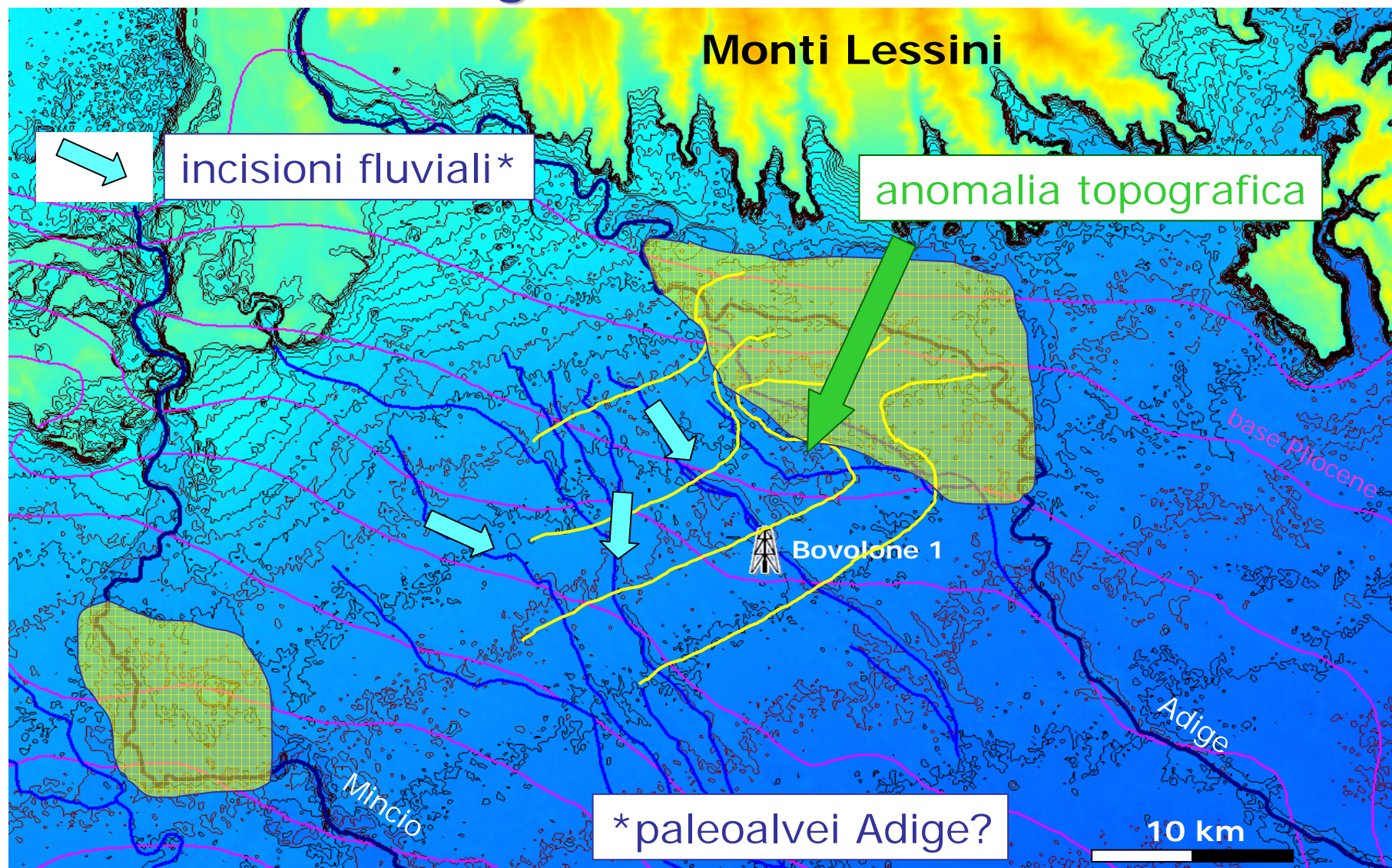
In cerca della sorgente del 1117...

Topografia: isolinee ogni 5 m tra 0-100 slm
Base pliocene: isolinee ogni 500 m





In cerca della sorgente del 1117...





Ipotesi modellistiche di partenza

(per riprodurre l'anomalia topografica nell'assunzione che sia di origine tettonica)

1- modelliamo una sorgente sud-vergente allineata con lo strike del fronte dei Lessini e parallela all'andamento della base del Pliocene (ca. E-W)

2- posta in corrispondenza della struttura sepolta di Bovolone

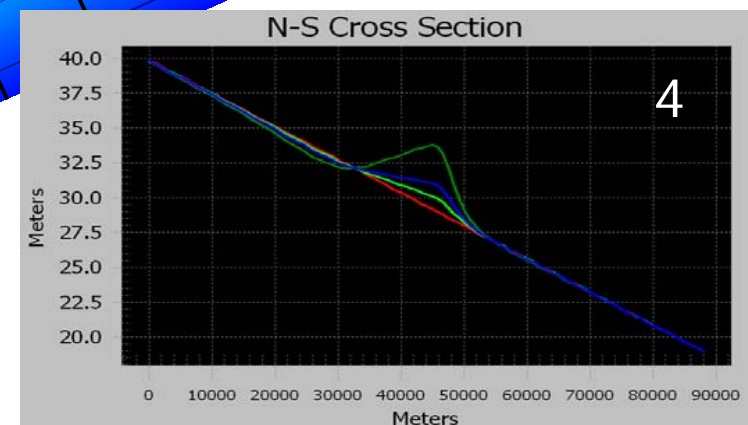
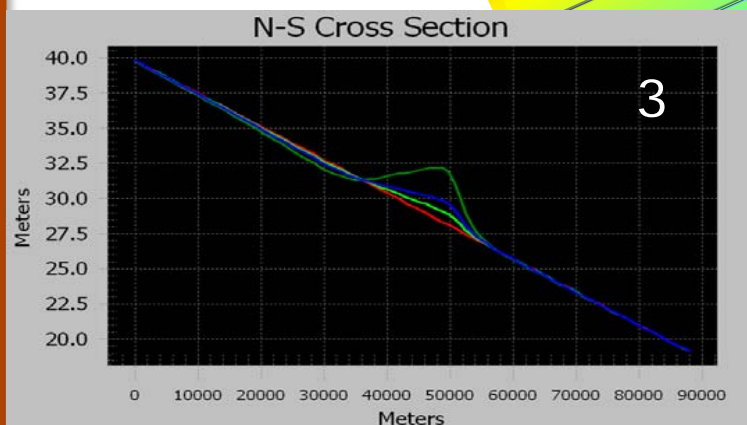
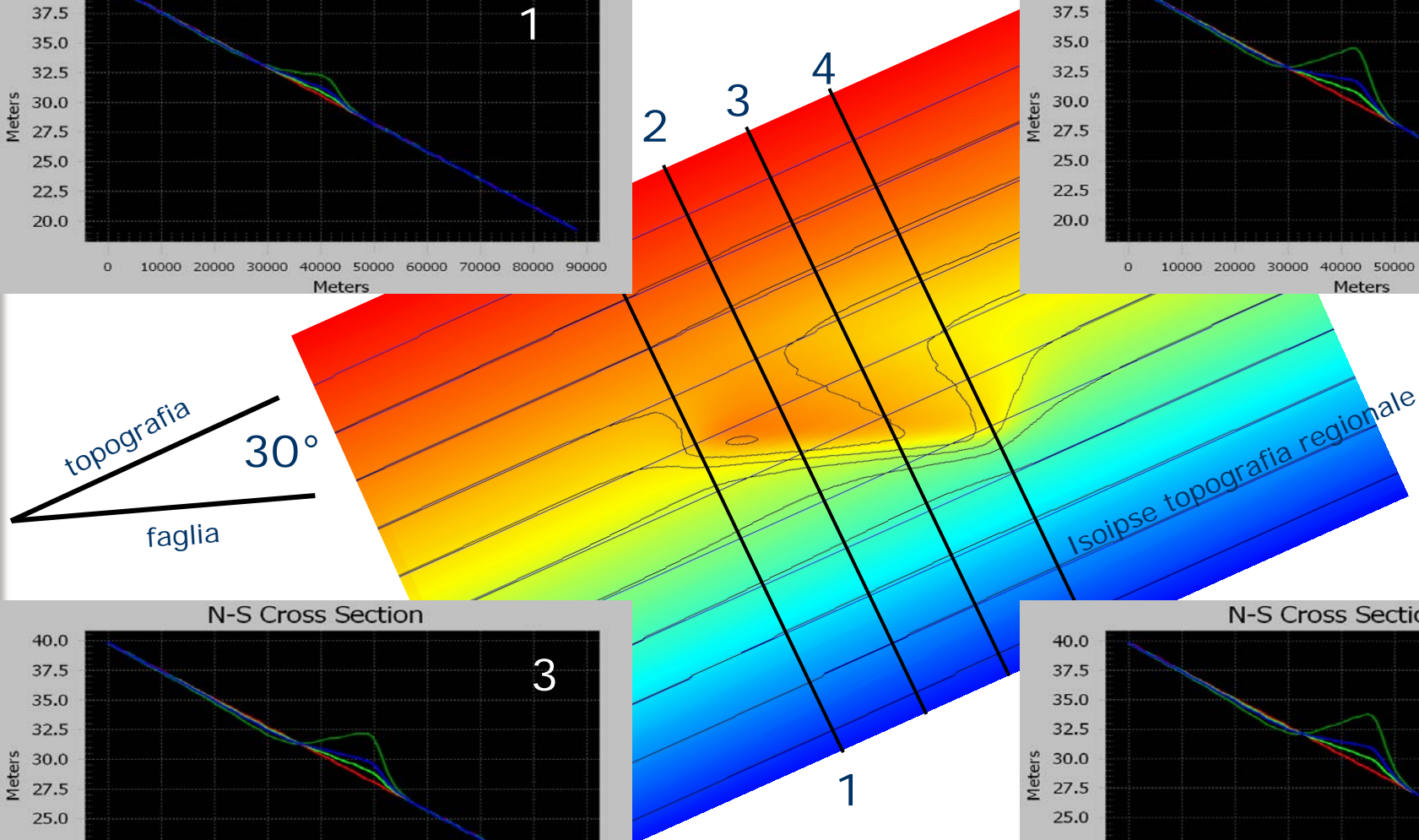
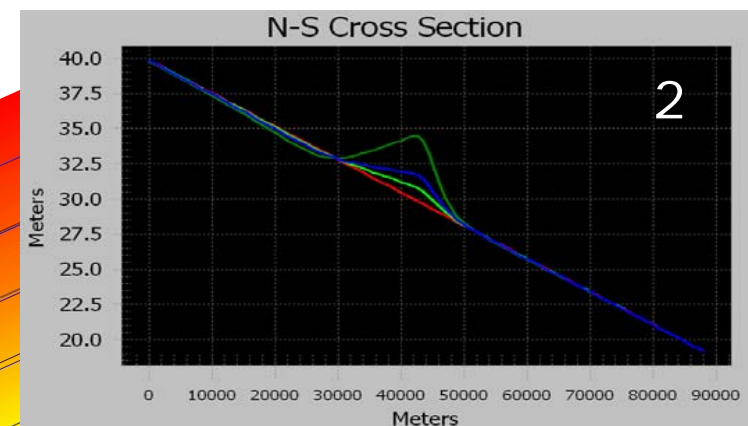
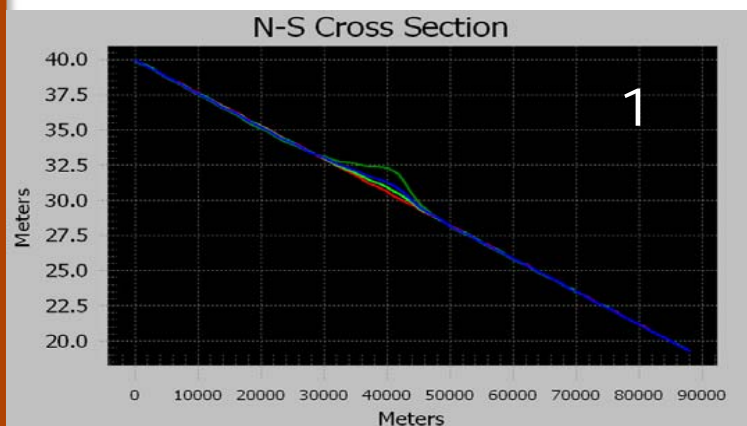
3- con profondità minima tratta dalla sezione sismica (2km)

4- e dimensioni ricavate dalla magnitudo del terremoto del 1117

Ne consegue che la sorgente modellata formerà un angolo di circa 30° con l'andamento medio della topografia regionale



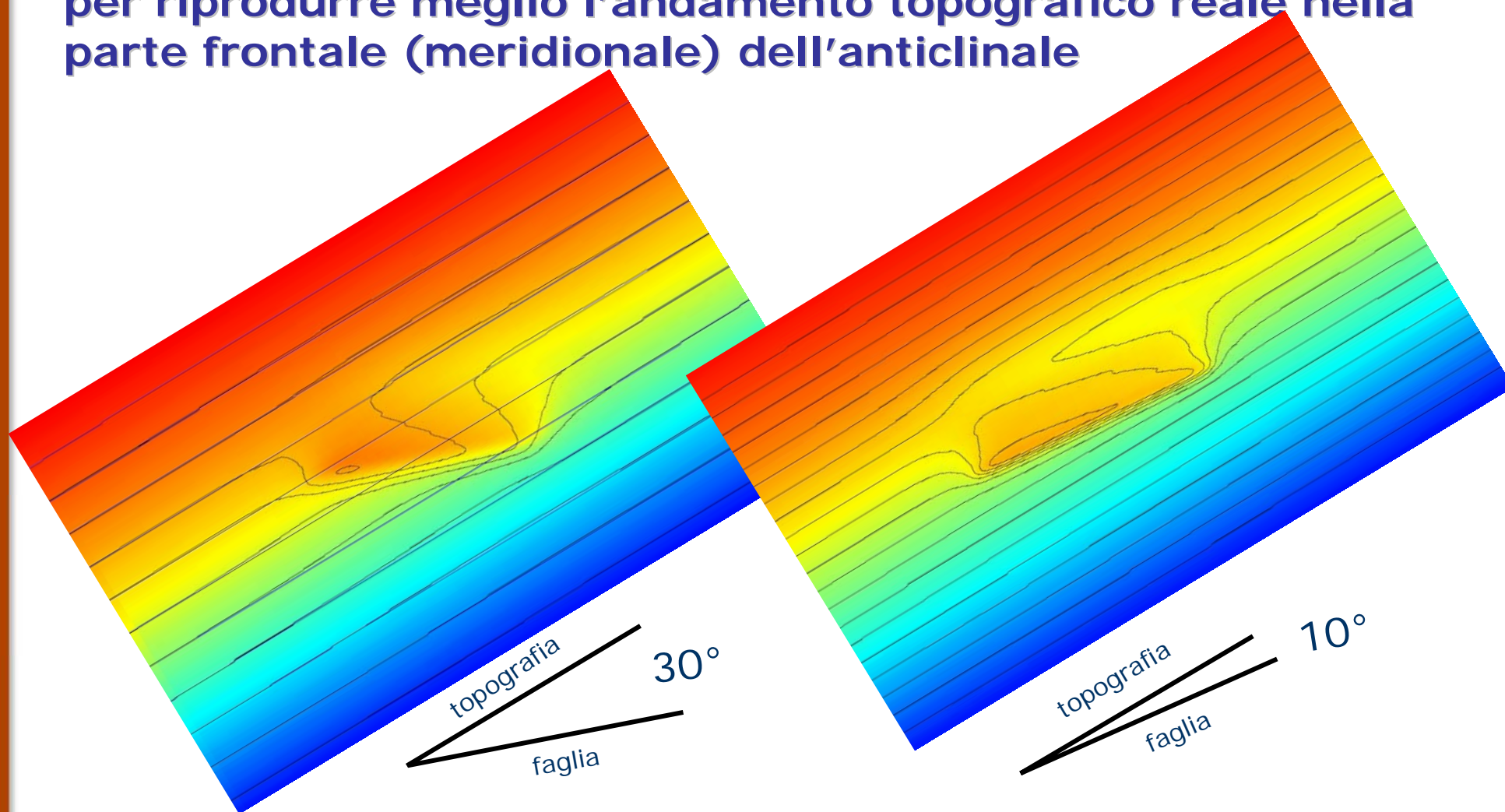
Effetti di una anticlinale in crescita sulla topografia





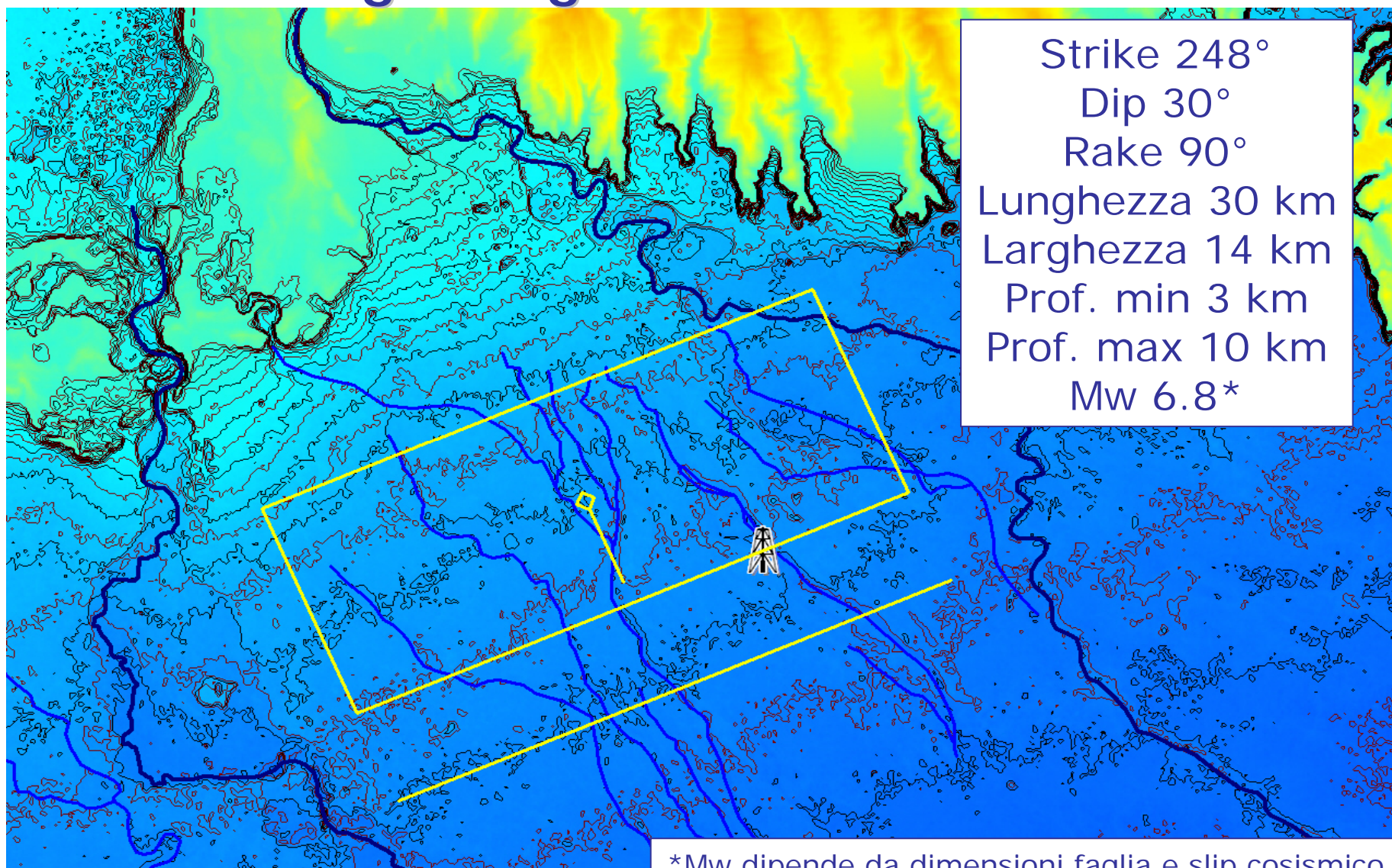
Passaggi modellistici ulteriori

Ruotiamo progressivamente lo strike da E-W a ENE-WSW per riprodurre meglio l'andamento topografico reale nella parte frontale (meridionale) dell'anticlinale





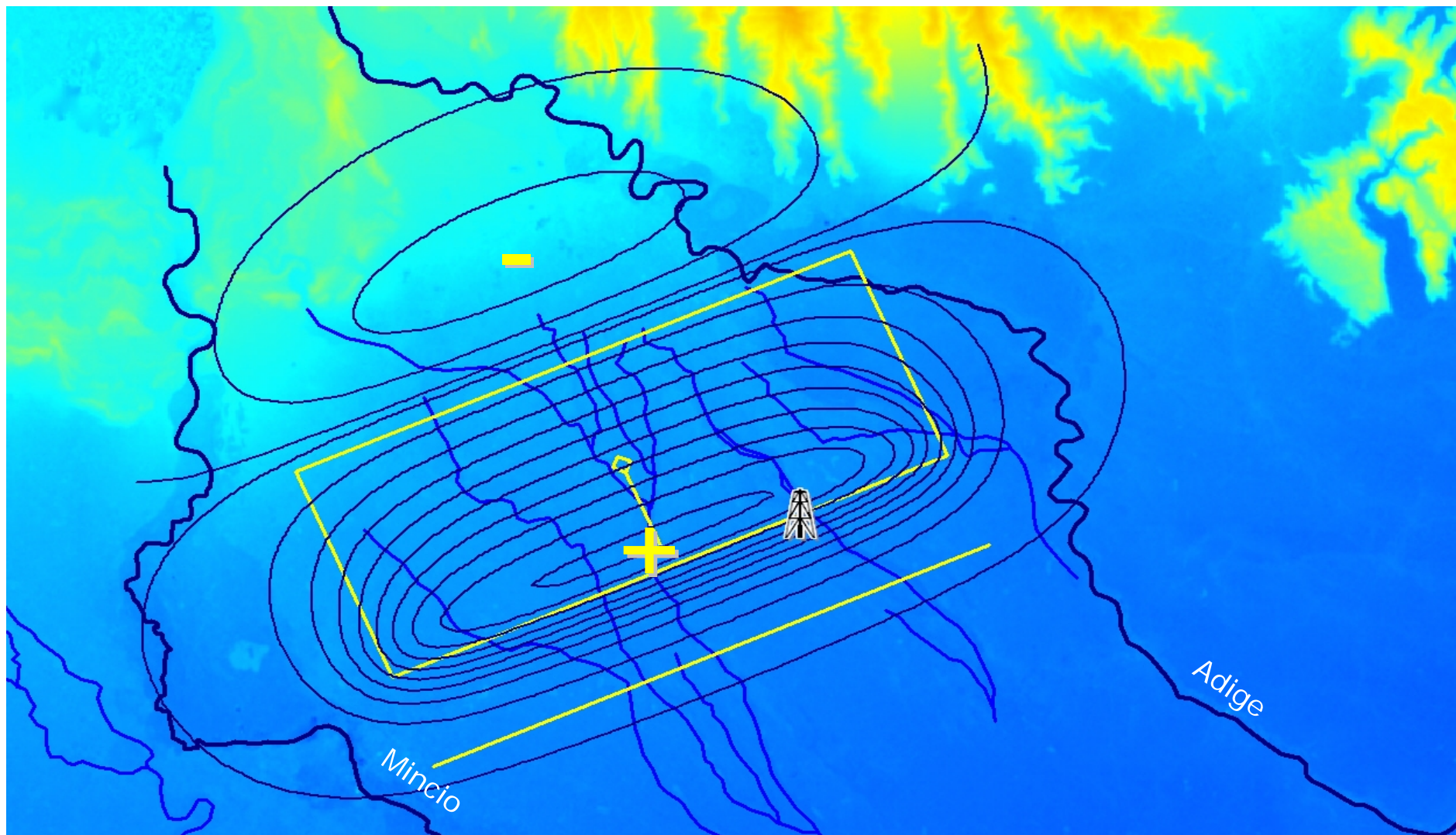
Modello di faglia migliore



*Mw dipende da dimensioni faglia e slip cosismico

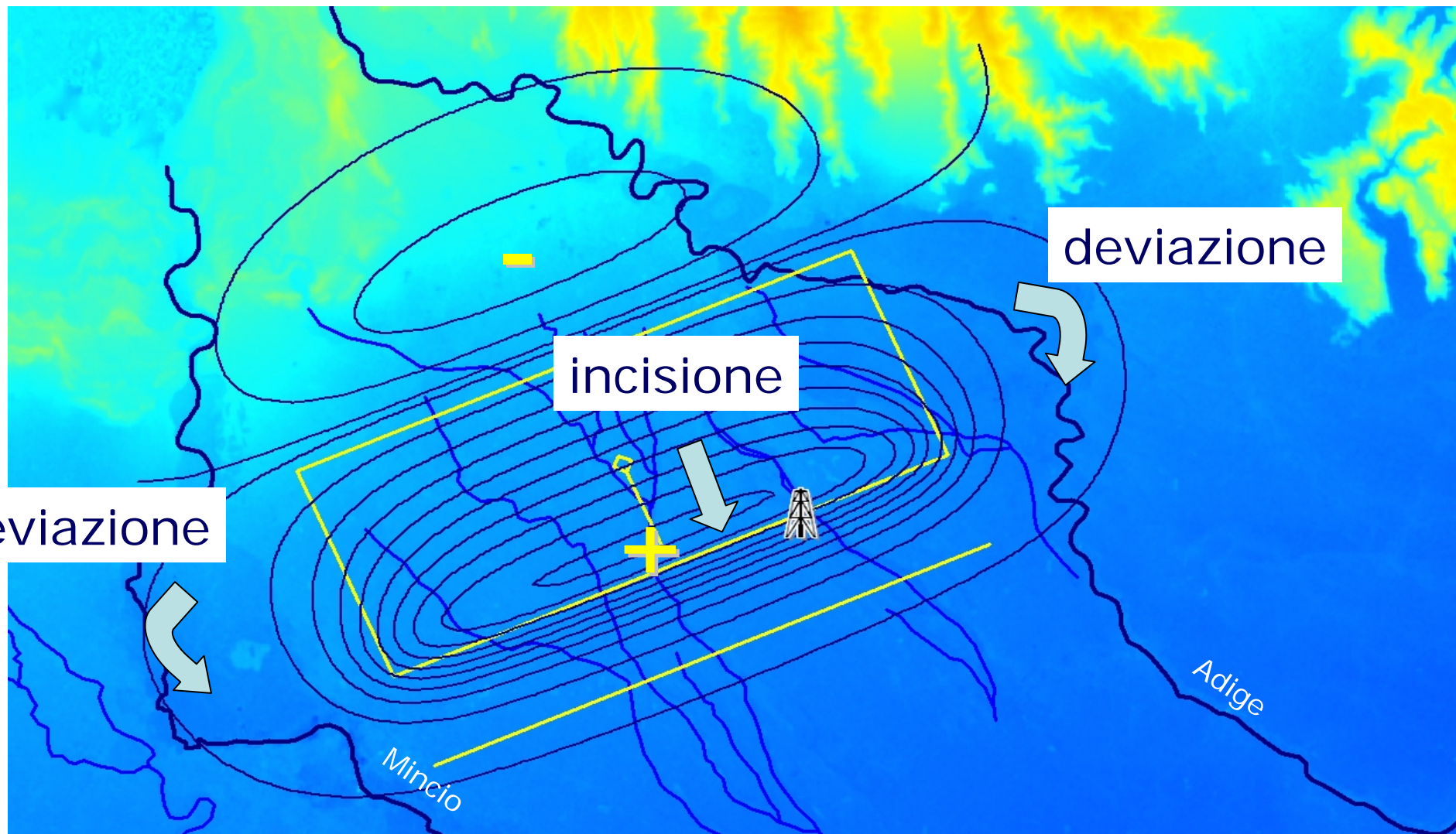


Isolinee di deformazione vs drenaggio



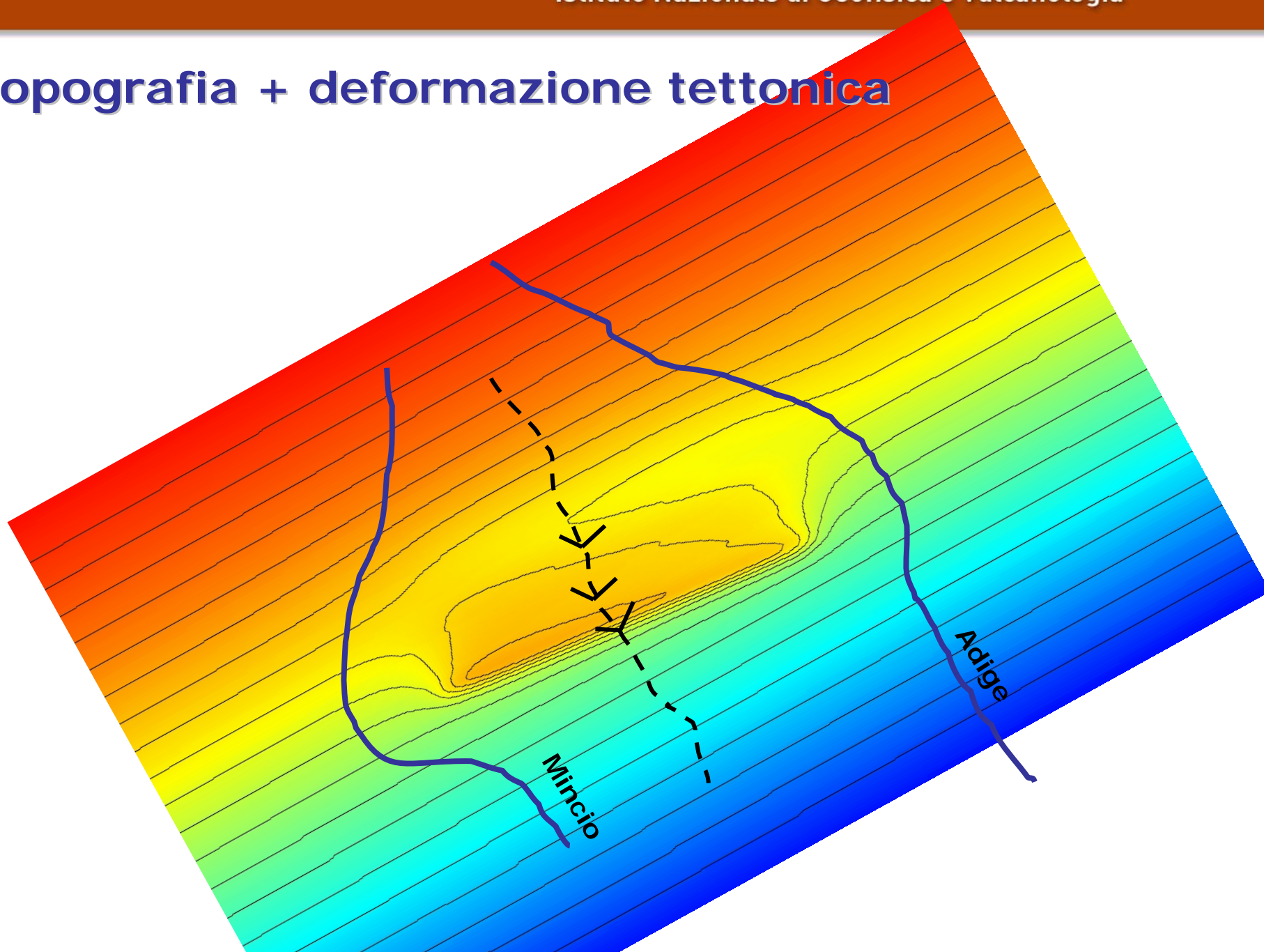


Isolinee di deformazione vs drenaggio



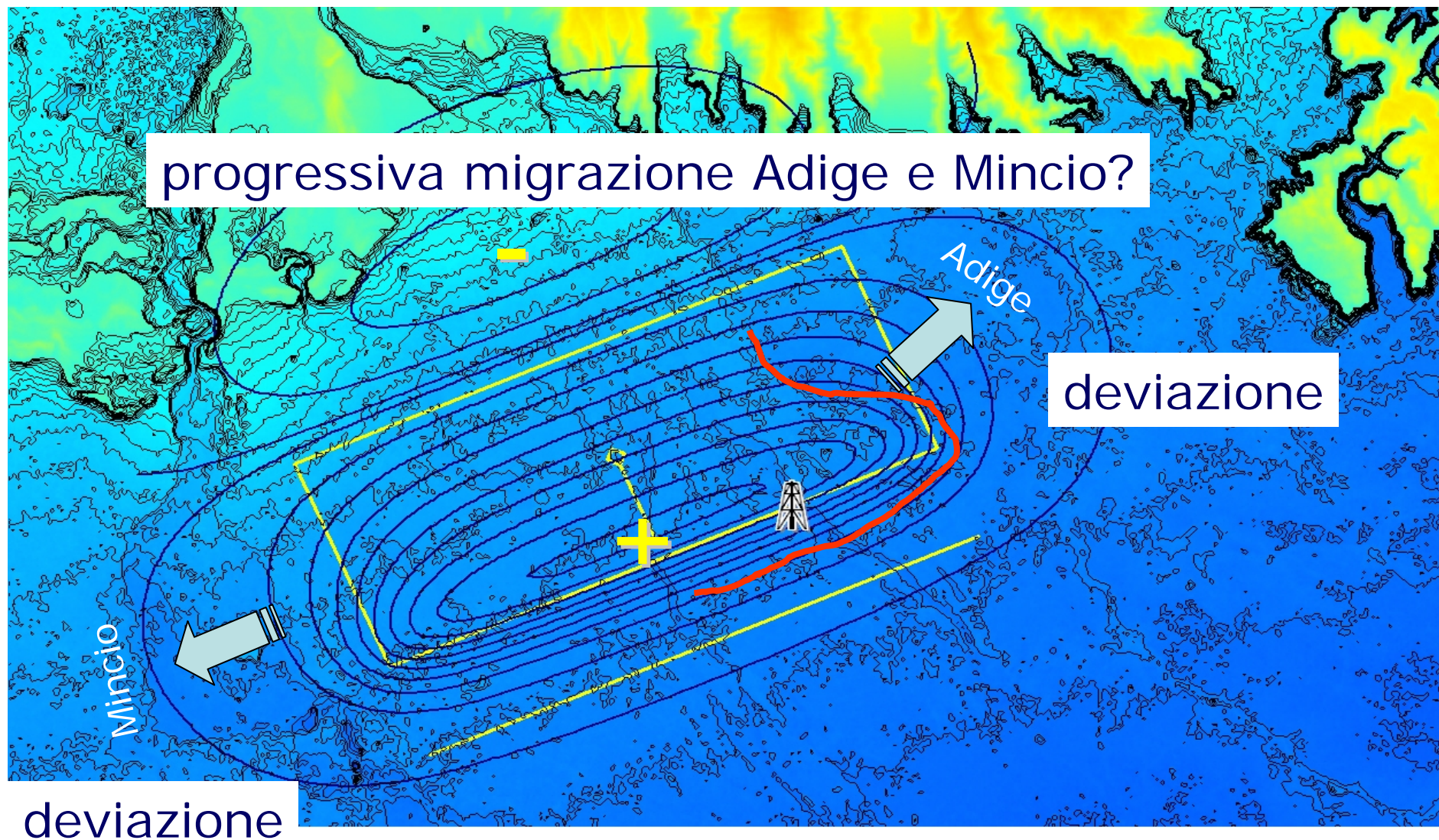


Topografia + deformazione tettonica





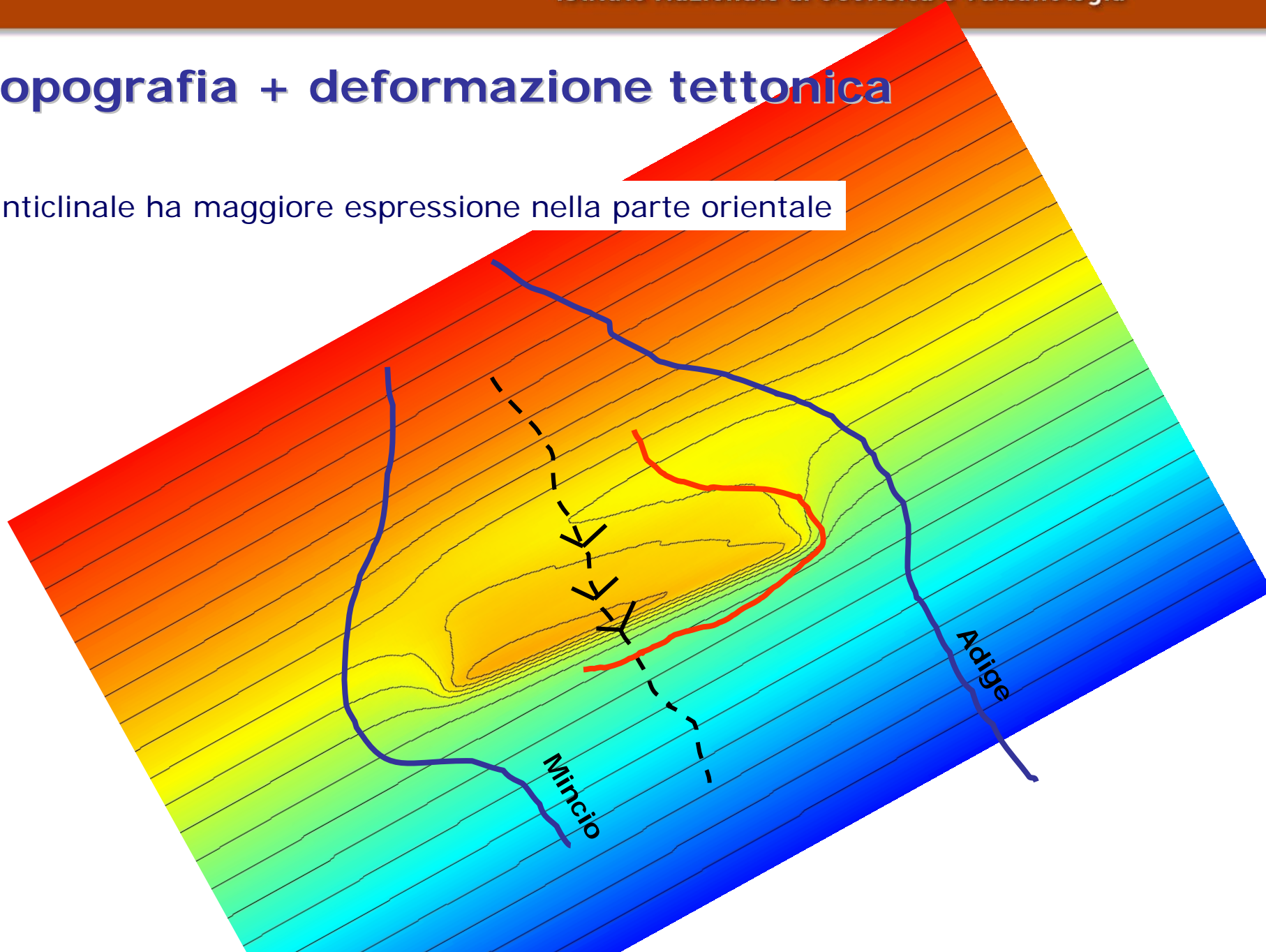
Isolinee di deformazione vs topografia





Topografia + deformazione tettonica

l'anticlinale ha maggiore espressione nella parte orientale





Conclusioni

- 1- la sorgente modellizzata è un thrust cieco S-vergente localizzato in un'area priva di strutture compressive importanti mappate
- 2- la sua presenza se confermata induce a riconsiderare la mappatura dei fronti sepolti attivi
- 3- la sua dimensione è compatibile con la magnitudo del terremoto del 1117 (M 7)
- 4- la deformazione cumulata del suolo indotta da tale thrust è in grado di spiegare una serie di anomalie topografiche e idrografiche
- 5- bassi ratei di deformazione (\ll tassi sedimentari) possono spiegare la scarsa espressione morfologica dell'anticlinale associata



Bibliografia

- Basili, R. et al. (2008). The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics* 453 (2008) 20–43, doi: 10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- Burrato, P. et al. (2003). An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. *Ann. Geoph.*, 46, 5, 865-882.
- Castaldini, D. & M. Panizza (1991). Inventario delle faglie attive tra i fiumi Po e Piave e il Lago di Como (Italia settentrionale). *Il Quaternario*, 4, 2, 333-410.
- Castellarin, A., et al., (2006). The Alpine evolution of the Southern Alps around the Giudicarie faults: A Late Cretaceous to Early Eocene transfer zone. *Tectonophysics* 414, 203–223.
- D'Agostino, N. et al. (2005). Strain accumulation in the southern Alps (NE Italy) and deformation at the northeastern boundary of Adria observed by CGPS measurements. *Geoph. Res. Lett.*, 32, L19306, doi:10.1029/2005GL024266.
- Devoti, R. et al. (2008). New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction. *Earth Planet Sci. Lett.* (2008), doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.031.
- Galadini, F. et al. (2005). Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with $M > 6$ in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy). *Geophys. J. Int.*, 161, 739-762, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02571.x.
- Galadini, F. et al. (2001). Late Quaternary fault movements in the Mt. Baldo-Lessini Mts. sector of the Southalpine area (northern Italy). *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, 80, 3-4, 187-208.
- Galadini, F. & P. Galli (2001). Archaeoseismology in Italy: case studies and implications on long-term seismicity. *J. Earthquake Eng.*, 5, 1, 35-68.
- Galli, P. (2005). I terremoti del Gennaio 1117. Ipotesi di un epicentro nel Cremonese. *Il Quaternario*, 18(2), 87-100.
- Grenerczy, G. et al. (2005). Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. *Geoph. Res. Lett.*, 32, L16311, doi: 10.1029/2005GL022947.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. Disponibile su: <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>.
- Guidoboni, E. et al. (2005). The “exceptional” earthquake of 3 January 1117 in the Verona area (northern Italy): a critical time review and detection of two lost earthquakes (lower Germany and Tuscany). *J. G. R.*, 110, doi:10.1029/2005JB003683.
- Pondrelli, S. et al. (2006). The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 159, 286–303, doi: 10.1016/j.pepi.2006.07.008.
- Serpelloni et al. (2005). Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: new results from the analysis of permanent and non-permanent GPS networks. *Geophys. J. Int.*, 161, 861-880, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02618.x.
- Valensise, G., & D. Pantosti (eds) (2001). Database of potential sources for earthquakes larger than $M 5.5$ in Italy. *Ann. Geofis. suppl. to vol. 44*, 4, 180 pp. with CD-ROM.