



Convegno Scientifico dell'Osservatorio Ambientale della Val d'Agri

I Edizione – Tema: Sismicità indotta

Venerdì 15 marzo 2013

Giacimenti di Idrocarburi e Sismicità Indotta

Davide Scrocca

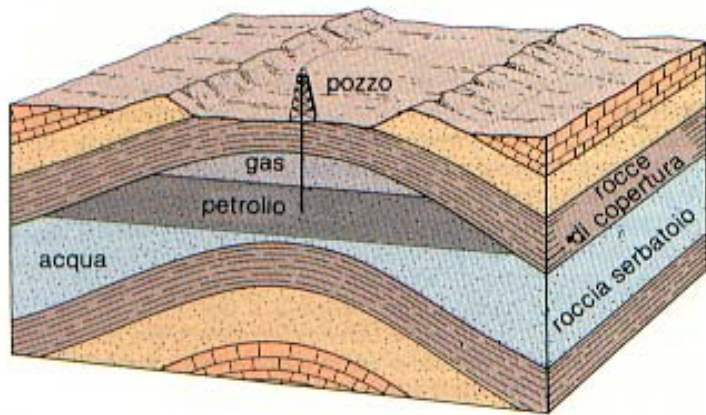
Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

*“From a scientific perspective, the liability aspect of induced or triggered earthquakes largely entails disadvantages to anyone trying to understand these earthquakes in contrast to someone seeking to assign blame for them”
(McGarr et al., 2002)*

- Attività estrattive
- Processi capaci di “stimolare” sismicità durante le attività di sfruttamento di giacimenti di idrocarburi
- Analisi di alcuni dei principali esempi noti dalla letteratura
- Revisione di alcuni dei principali giacimenti italiani on-shore
(con esclusione della Val d'Agri, analizzata da un altro intervento del convegno)

Attività Estrattiva



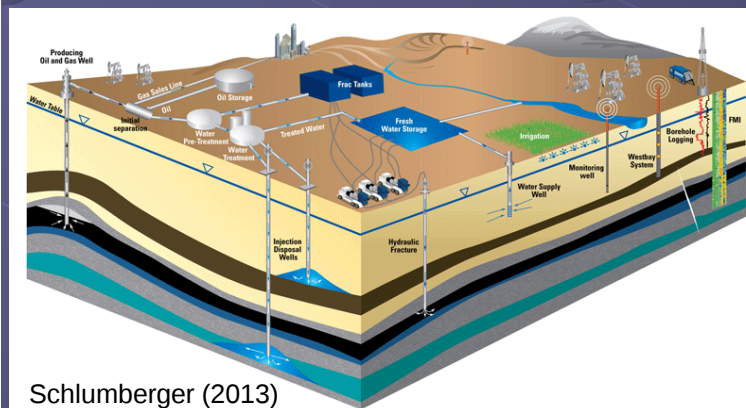
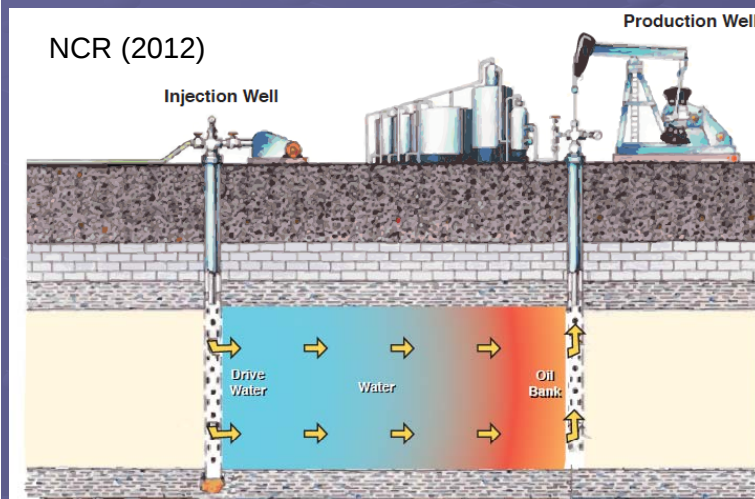
- Lo sfruttamento minerario di un giacimento convenzionale di idrocarburi comporta non solo l'estrazione di petrolio o metano ma anche, in diversi casi, la re-iniezione di fluidi nel sottosuolo

- Smaltimento dell'H₂O prodotta insieme agli idrocarburi

- Recupero Secondario e Terziario (Enhanced) per sostenere pressioni nel giacimento e aumentare i fattori di recupero utilizza iniezione di acqua o di gas (e.g., CO₂ che riduce inoltre la viscosità degli idrocarburi).

- Pressioni e volumi di acqua sono solitamente mantenute entro livelli tali da mantenere il regime di pressioni al di sotto dei valori originali del giacimento.

- Idro-fratturazione per aumentare le permeabilità della roccia serbatoio. Opportuno distinguere “micro-frack” (utilizzato in operazione di manutenzione di pozzi, con raggio di azione dei metri) da “fracking” in senso stretto (utilizzato nello sfruttamento di “Shale gas” o per fratturare vasti ammassi rocciosi con influenza su centinaia di metri)





Sismicità: Indotta vs Innescata

Terminologia utilizzata nella presentazione (da McGarr et al., 2002)

- Sismicità indotta (*"Induced Seismicity"*)

- Le attività antropiche sono responsabili della gran parte delle variazioni del campo di stress responsabili della sismicità (*"Causative activity accounts for most of the stress change or energy to produce the earthquakes"*)

- Sismicità Innescata (*"Triggered Seismicity"*)

- Le attività antropiche sono responsabili solo di una minima frazione delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità, mentre il ruolo principale è svolto dal campo di stress pre-esistente dovuto alla tettonica (*"Causative activity accounts for only a small fraction of the stress change associated with the earthquakes. Pre-existing tectonic stress plays the primary role"*).

- Le attività antropiche non sono in grado di "indurre" grandi e disastrosi eventi sismici ma possono invece innescarli

- Sismicità Stimolata (*"Stimulated Seismicity"*)

- Definizione generica che include sia la sismicità indotta che innescata

Giacimenti vs Sismicità Stimolata

Suckale (2009)

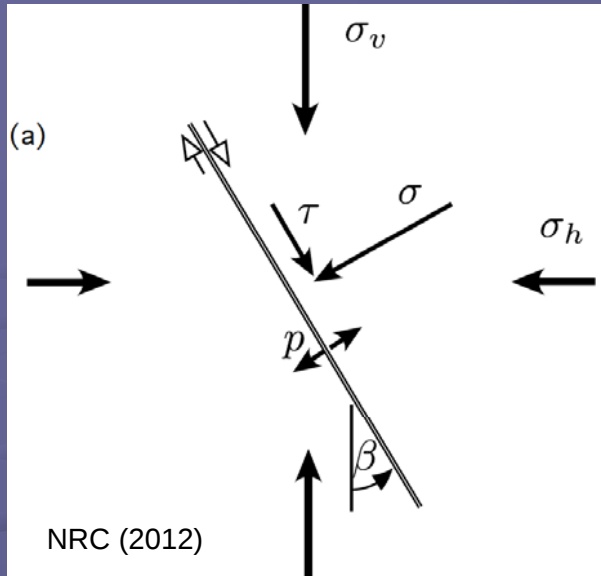
- Per almeno 70 casi è stata dimostrata, o ipotizzata, una relazione tra attività estrattive e sismicità (1 caso in Italia, Caviaga)
- Dataset probabilmente incompleto (da Grasso, 1992; Guha, 2000; Suckale, 2009)
- Casi documentati o ipotizzati sembrano distribuiti in modo non uniforme. Anche all'interno di uno stesso bacino petrolifero non tutti i giacimenti hanno lo stesso comportamento
- Magnitudo tipicamente $\leq 4.5-5$. In alcuni casi (di controversa interpretazione) magnitudo sino a 6-7



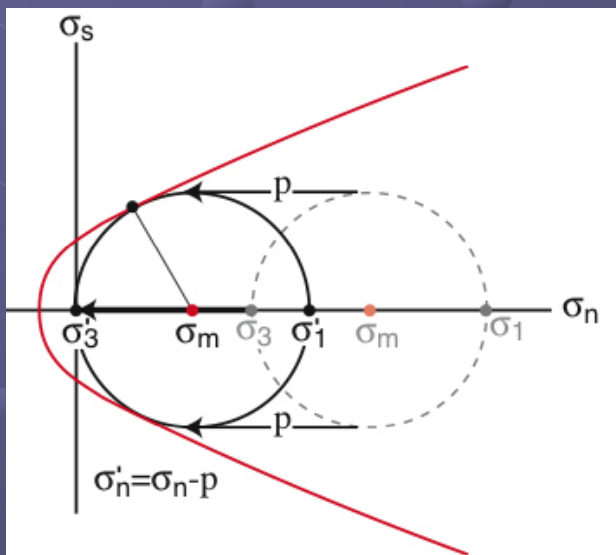
Hydrocarbon field	Country	Potential cause
Snipe Lake	Alberta, Canada	
Strachan	Alberta, Canada	extraction
Gobles	Appalachian, Canada	injection
Eagle&Eagle West	British Columbia, Canada	extraction
Shengli	Shandong Province, China	injection
Dan	North Sea, Denmark	extraction
Lacq	Aquitaine, France	extraction
Meillon	Aquitaine, France	extraction ?
Söhlingen / Rotenburg	Rotliegendes, Germany	
Caviaga	Po Valley, Italy	
Umm Gudair	Kuwait	burning
Burgan	Kuwait	burning
Groningen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Roswinkel	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Bergermeer	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Elefeld	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Bergen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Annerveen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Appelscha	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Emmen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Dalen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Roden	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Vries Noord	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Ureterp	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Emmen-Nw. A'Dam	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Schoonebeek	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Vries Centraal	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Goevorden	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Ekofisk	North Sea, Norway	extraction
Valhall	North Sea, Norway	extraction
Visund	North Sea, Norway	various

Hydrocarbon field	Country	Potential cause
Shuaiba	Oman	
Romashkino	Volga-Ural, Russia	injection
Novo-Elkhovskoye	Volga-Ural, Russia	
Starogrozenskoye	Russia	
Barsa-Gelmes-Vishka	Russia	
Gudermes	North Caucasus, Russia	
Grozny	Tchetchny	
Big Escambia Creek	Alabama, USA	extraction ?
Little Rock	Alabama, USA	extraction ?
Sizemore Creek	Alabama, USA	extraction ?
Coolinga	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Kettleman	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Montebello	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Orcutt	California, USA	injection
Wilmington	California, USA	extraction
Plangely	Colorado, USA	injection
South Eugene Island	Louisiana, USA	injection
Hunt	Mississippi, USA	injection ?
Sleepy Hollow	Nebraska, USA	injection ?
Catoosa District	Oklahoma, USA	injection ?
Love County	Oklahoma, USA	injection ?
East Durant	Oklahoma, USA	injection ?
Gobles	Ontario, USA	injection
Apollo-Hendrick	Texas, USA	injection ?
Blue Ridge	Texas, USA	extraction/subsidence
Clinton	Texas, USA	extraction/subsidence
Cogdell Canyon Reef	Texas, USA	injection ?
Fashing	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Goose Creek	Texas, USA	extraction/subsidence
Imogene	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Kermit	Texas, USA	injection
Keystone	Texas, USA	
Mykawa	Texas, USA	extraction/subsidence
South-Houston	Texas, USA	extraction/subsidence
War-Wink	Texas, USA	extraction ?
Webster	Texas, USA	extraction/subsidence
Dollarhide	Texas/New Mexico, USA	injection ?
Gazli	Uzbekistan	erratic production/fault reactivation ?
Costa Oriental	Lake Maracaibo, Venezuela	extraction/subsidence

Iniezione di Fluidi: 1



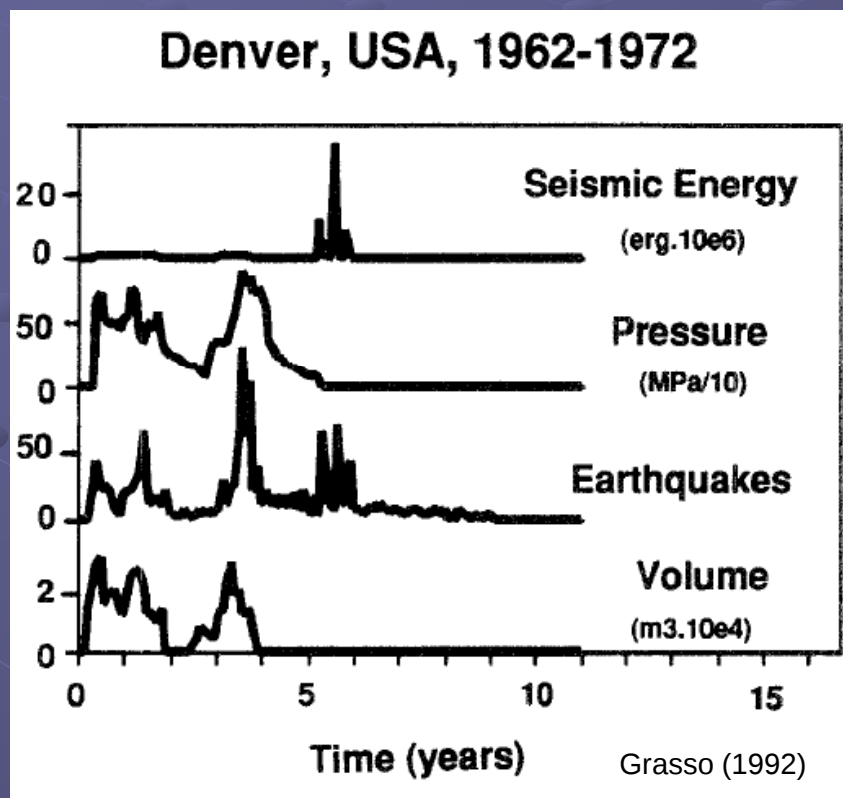
$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$



- L'iniezione di fluidi nel sottosuolo genera un aumento della pressione di poro (p) e, di conseguenza, una riduzione dello sforzo normale effettivo sui piani di faglia che vengono a trovarsi quindi in stato critico e si muovono sismicamente
- Lavori teorici e di terreno hanno mostrato che la sismicità stimolata dall'iniezione di fluidi può essere di due tipi:
 - Risposta rapida: sono generalmente piccoli terremoti (generalmente con $-2 \leq M \leq 3$) collegati con la fratturazione idraulica di ammassi rocciosi
 - Risposta lenta: sono terremoti che possono raggiungere magnitudo ≤ 5 . Sono spiegati come il risultato della diffusione in profondità della pressione dei fluidi che causa lo scivolamento lungo faglie potenzialmente sismogeniche

Iniezione di Fluidi: 2

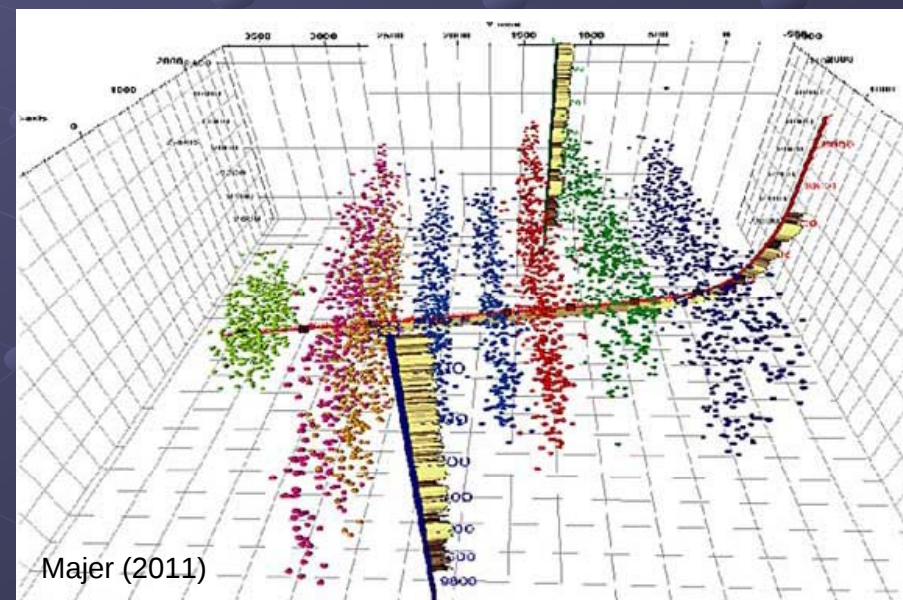
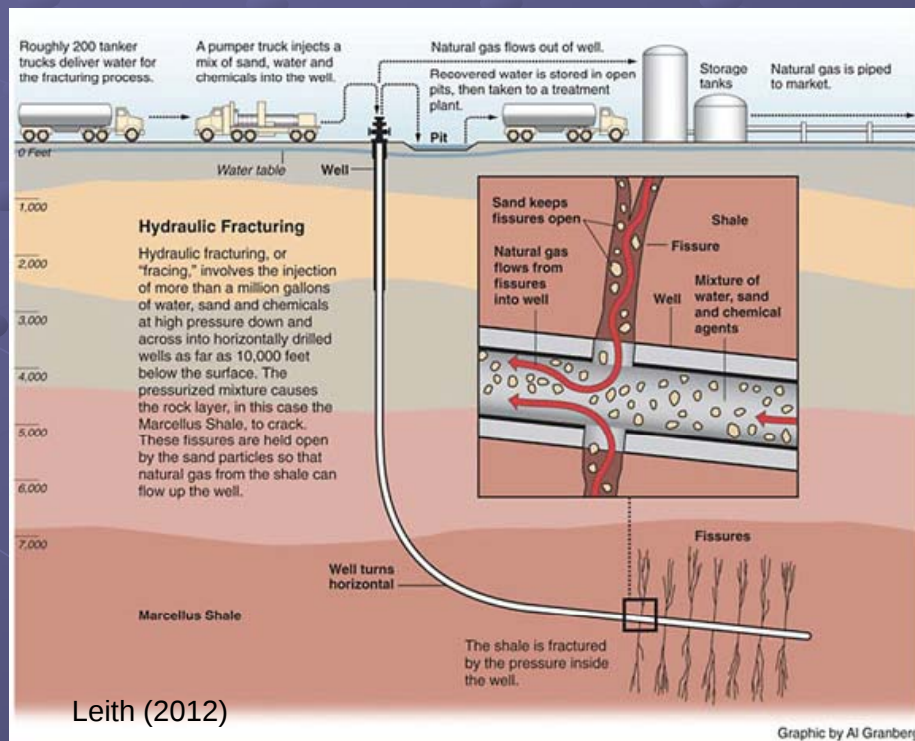
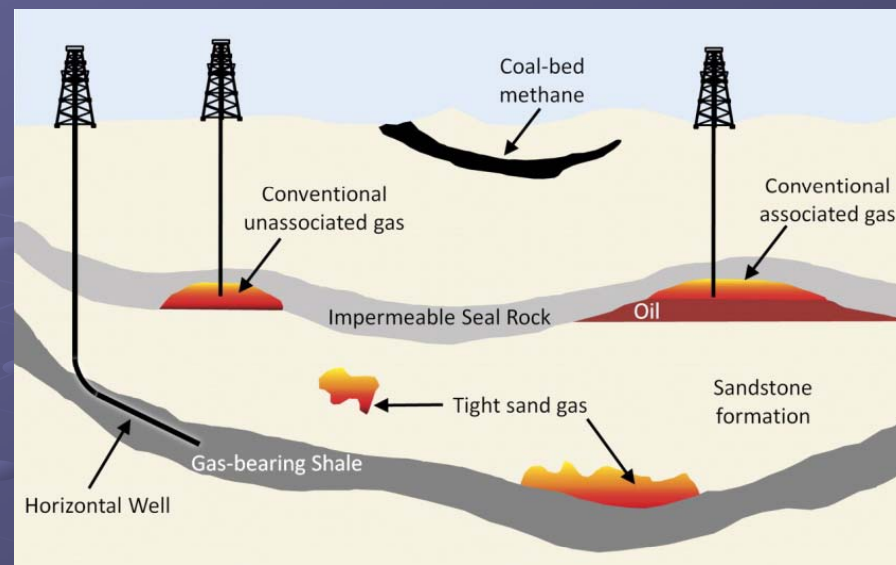
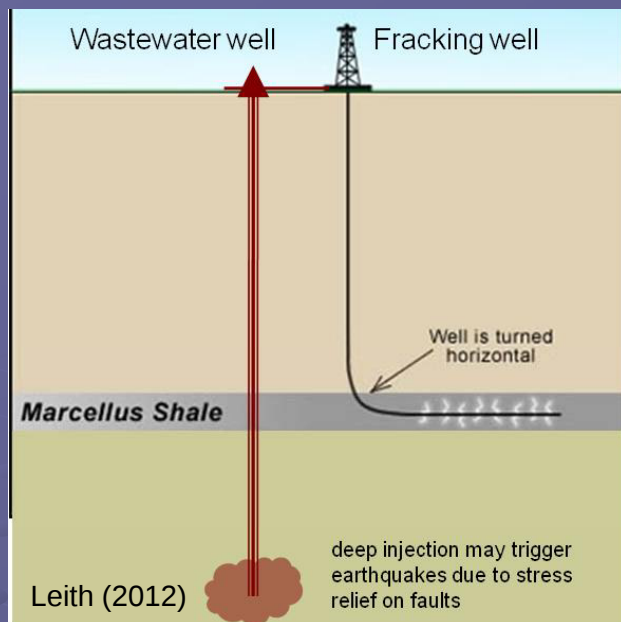
Esempio classico: esperimento operato presso Rangely Oil Field, Colorado USA (Raleigh et al., 1972; 1976) con iniezione di acqua per progetto di “*Secondary recovery*” in cui è stato possibile attivare e disattivare sismicità controllando la pressione dei fluidi iniettati. Tale diretta correlazione tra sismicità indotta e pressione dei fluidi iniettati risulta ben documentata solo nel caso di idrofratturazione



- In molti altri casi la modulazione dei volumi iniettati e delle pressioni di iniezione non è stata sufficiente per controllare l'evoluzione dei fenomeni sismici stimolati.
- Rocky Mountain Arsenal (Denver, USA), nel 1961 venne perforato un pozzo per smaltire acque contaminate (c. 30 m³/h). Nei primi 5 anni si rileva una buona correlazione tra volumi/pressioni e sismicità. Si nota però la prosecuzione della sequenza sismica e alcuni eventi (con M c. 5-5.5), a distanza maggiore dal pozzo rispetto ai primi eventi, anche dopo l'interruzione dell'iniezione di fluidi (Healy et al., 1968; Grasso, 1992)

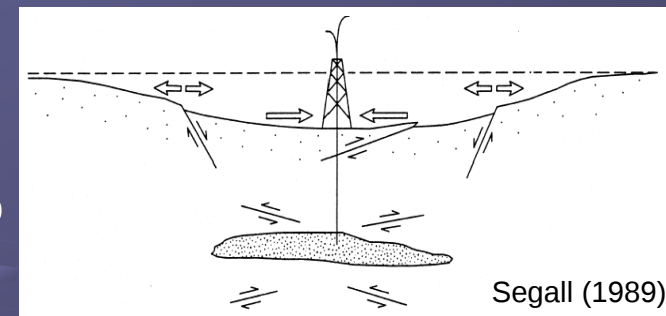


Fracking



Estrazione di Fluidi: Effetti Poroelastici

L'estrazione di fluidi causa un decremento della pressione di poro e una conseguente contrazione del reservoir, con relativa subsidenza. Poiché il reservoir è accoppiato elasticamente con le rocce circostanti, tale contrazione genera il trasferimento di stress poroelastico alle regioni adiacenti, inducendo lo sviluppo di terremoti (Segall, 1989; 1992). Sismicità tende a svilupparsi nella zona del giacimento (entro c. 5 km), sopra e sotto il reservoir, con $M \leq 5$ con un ritardo temporale rispetto all'inizio dell'estrazione



Segall (1989)

Area or Field Country	Grasso (1992) Alberta	Strachan ^a Texas	Fashing ^a France	Lacq ^b Tchecheny	Grozny ^c Assen ^d	Groningen ^d Netherlands	Ekofisk ^e Norway	Dan ^f Denmark
Reservoir characteristics								
Size (km ²)	25	10	150	70	50	900	130	24
Depth (km)	3–5	3.4	3.5	4.0	3.0	2.9	3.0	1.8
T (km)	0.1	0.05	0.25	0.4	0.2	0.15	0.2	0.15
Φ (%)	—	15	3	4	15	18	30	30
ϕ (mD)	—	13	0.5	—	—	0.1–10 ³	1–10 ²	0.1–1
μ (GPa)	—	—	23	—	10	10	0.07	—
ν	—	—	0.25	—	0.25	0.26	0.3	(0.3)
α	—	—	0.25	—	0.9	0.9	1.0	(1.0)
Displacement and pressure histories at the onset of Eqs.								
Onset Prod. (year)	1971	1958	1959	1964	1972	1964	1973	1972
Onset Eqs. (year)	1976	1974	1969	1971	1986	1991	1982	1985
P_{init} (MPa)	50	35	66	69	37	35	48	26
ΔP (MPa)	25	23	30	25	30	15	24	18
ΔH (m)	—	—	0.05	—	—	0.16	3.5	—
m_1	3.0	3.1	4.0	3.5	2.8	2.5	2.2	4.0
$\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	0.25	0.1	0.6	0.7	0.5	0.2	0.4	0.45
m_2	3.4	3.4	4.2	4.1	2.8	2.5	3.4	4.0

Hydromechanical setting of earthquakes triggered by poroelastic stressing caused by hydrocarbon extraction. Average reservoir characteristics are defined as follows: T , thickness; ϕ , porosity; ϕ , matrix permeability; μ , shear modulus; ν Poisson's ratio; α is a coefficient related to the bulk moduli of saturated rock (K) and the grains in the rock (K_s) by $\alpha = 1 - K/K_s$. Displacement and pressure history are defined by: the onset of production and the date of the first induced event; P_{init} , the initial pressure in the reservoir; ΔP , the pressure drop at the onset of seismicity; pressure values are from the yearly bottom of well measurements, with a few bars of accuracy; ΔH is the maximum depth of the subsidence bowl; m_1 is the magnitude of the first reported induced event and m_2 is the maximum magnitude of induced events. $\Delta\sigma_{max}$, the order of magnitude of the induced stress at the onset of the seismicity, is estimated using the poroelastic stress model

Effetti Poroelastici: Lacq Gas Field

- Lacq Gas Field (Pyrenees, France)
- Sismicità dovuta ad effetti poroelastici sviluppata prevalentemente sopra al reservoir

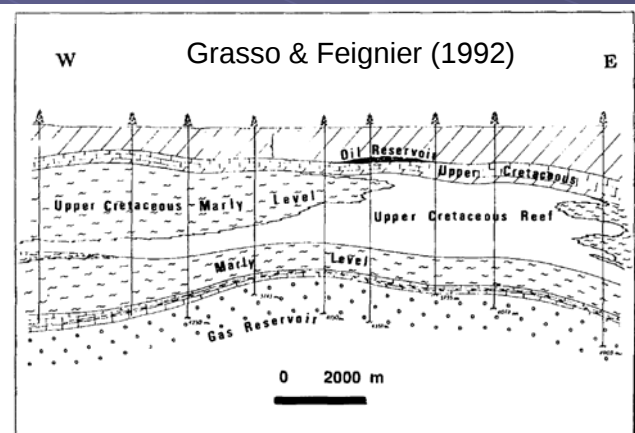
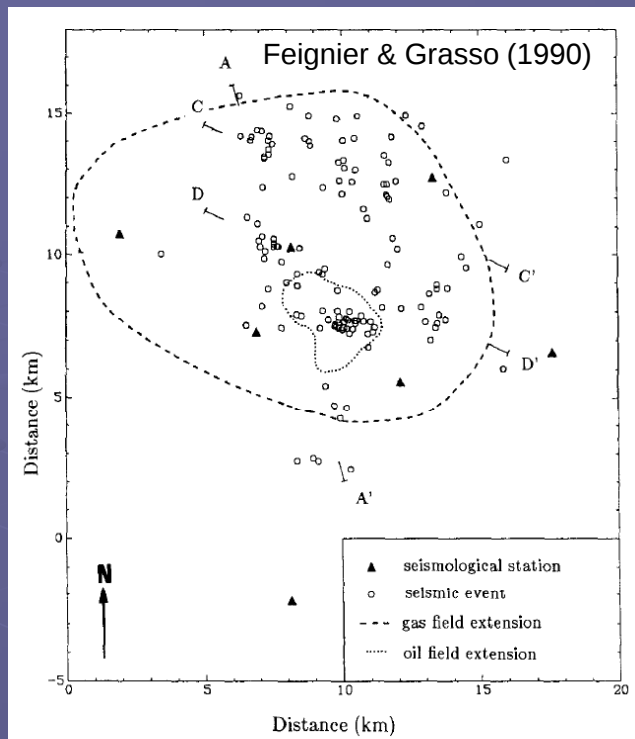
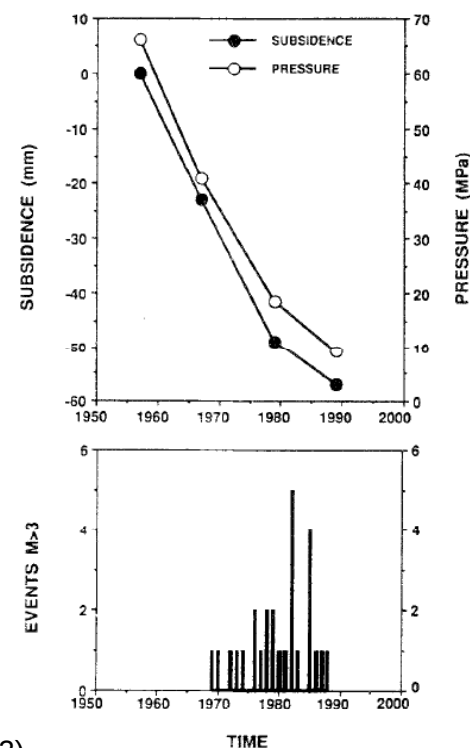


Figure 1
Structural vertical cross-sections of the hydrocarbon fields. (a) North-South direction, (b) East-West direction.

SEISMIC AND ASEISMIC BEHAVIOUR LACQ GAS FIELD (FRANCE)



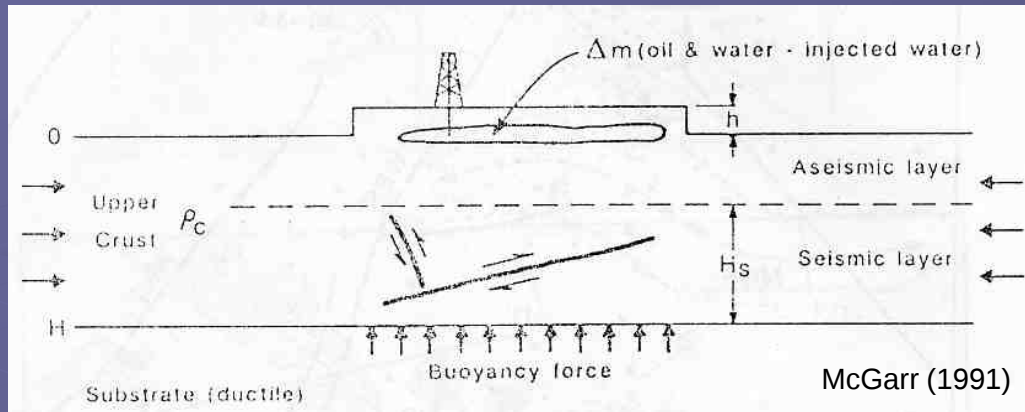
Grasso (1992)

Figure 6
Seismic and aseismic deformation of the Lacq gas field (Pyrenees, France) as a function of pressure decrease within the gas reservoir.



- Giacimenti a gas sfruttati dagli anni 60
- Eventi di piccola magnitudo $M_L \leq 3.5$ a profondità < 4 km (di solito 2.5 ± 0.5 km) localizzati all'interno del reservoir dei giacimenti di Groningen, Roswinkel e Bergermeer
- Primo evento noto nel 1986 (Assen $M_L=2.8$); rete di monitoraggio impostata nel 1992 e completata nel 1995
- Eventi interpretati come riattivazione estensionale di faglie pre-esistenti causata, in giacimenti di forma discoidale, da effetti poroelastici indotti dalla diminuzione di σ_h e p connessa con la produzione di gas (Segall & Fitzgerald, 1998; Zoback & Zinke, 2002; Van Eck et al., 2006)

Estrazione di Fluidi: Disequilibri Isostatici



La produzione di idrocarburi ha l'effetto di rimuovere una massa Δm dalla crosta. Per ripristinare l'equilibrio verticale delle forze in gioco, la risposta isostatica a questa rimozione di massa induce un ispessimento crostale che può realizzarsi con l'attivazione di sovrascorrimenti anche distanti dalla zona di produzione (McGarr, 1991)

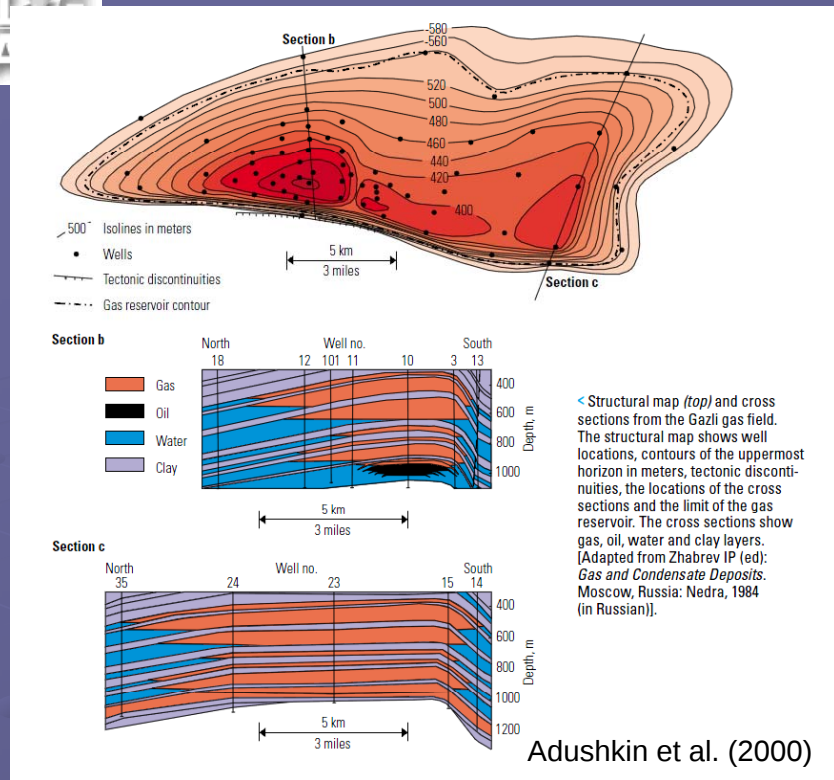
Hydromechanical setting of earthquakes triggered by the unloading of the uppercrust caused by hydrocarbon extraction. Column 3 is the year when extraction began and the date of the first induced event. Column 6 is the maximum magnitude of induced events. Mass deficit is reported on column 5. Assuming that mass withdrawal at these sites is related to the major earthquake, we estimate the induced stress, augmenting failure by multiplying the seismic stress drop by the ratio of stiffness of the loading system (the vertical force change) to the stiffness of the circular crack model according to MCGARR (1991)

Area or Field	Reservoir Depth	Onset of Prod. – Eqs.	Initial Pressure	Mass Removal	Maximum Magnitude	Induced Stress
Coalinga field ^a California, USA	2 km	1940–1983	25 MPa	2.7×10^{11} kg	$M = 6.5$	~ 0.01 MPa
Kettleman field ^a California, USA	1.5 km	19??–1985	—	1.2×10^{11} kg	$M = 6.1$	~ 0.01 MPa
Montebello field ^a California, USA	1.5 km	1924–1987	—	1.3×10^{11} kg	$M = 5.9$	~ 0.01 MPa
Gazli field ^b Kyzyl-Koum, Uzbekistan	1.5 km	1962–1976	10 MPa	2×10^{11} kg	$M \approx 7.0$	~ 0.04 MPa
Gazli field ^b Kyzyl-Koum, Uzbekistan	1.5 km	1976–1984	3 MPa	2×10^{11} kg	$M \approx 7.0$	~ 0.05 MPa

McGarr (1991)

Casi Controversi: Gazli

- Gazli: giacimento a gas scoperto in Uzbekistan nel 1956 con riserve stimate in 456 GS_m3
- Inizio produzione nel 1962 seguita da significative iniezioni di acqua nel sottosuolo
- 12 terremoti nel periodo 1975-1994 con $4.2 \leq M \leq 7$ (sequenza anomala)



Suckale (2009)

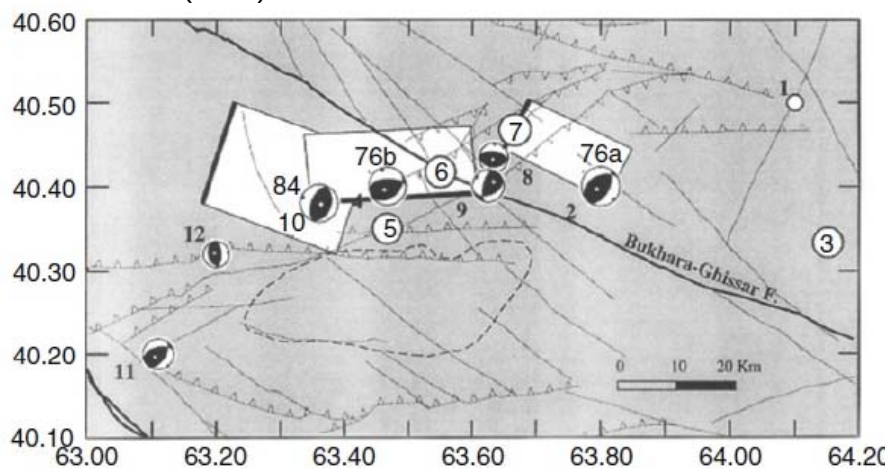
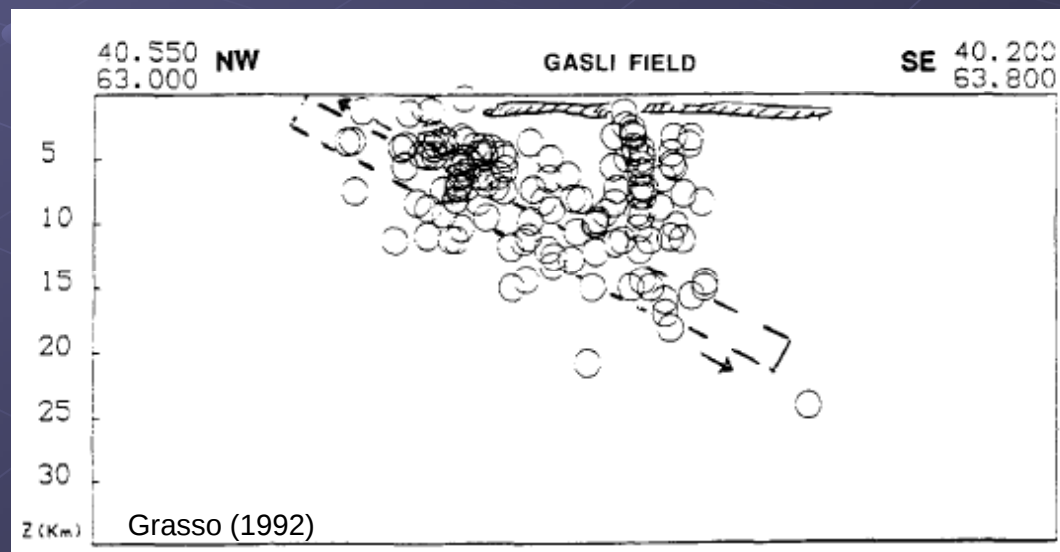
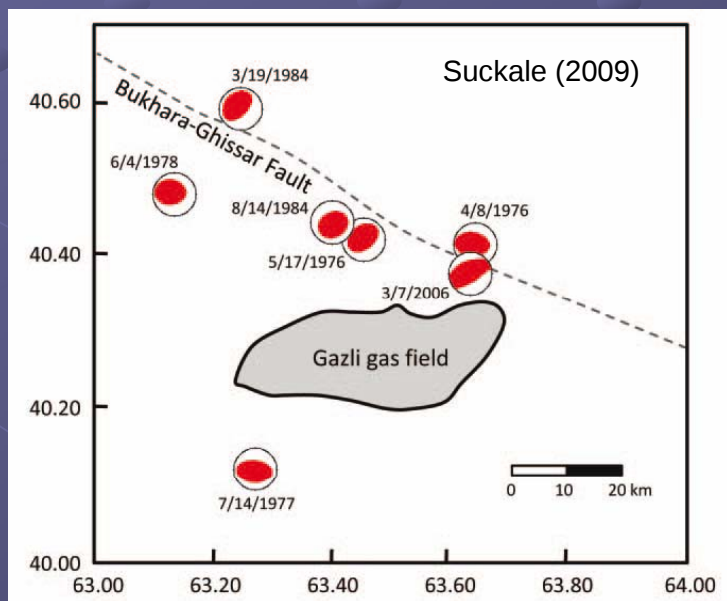


TABLE 2. Parameters of the largest events in the Gazli region from Bossu *et al.* (1996, p. 962)

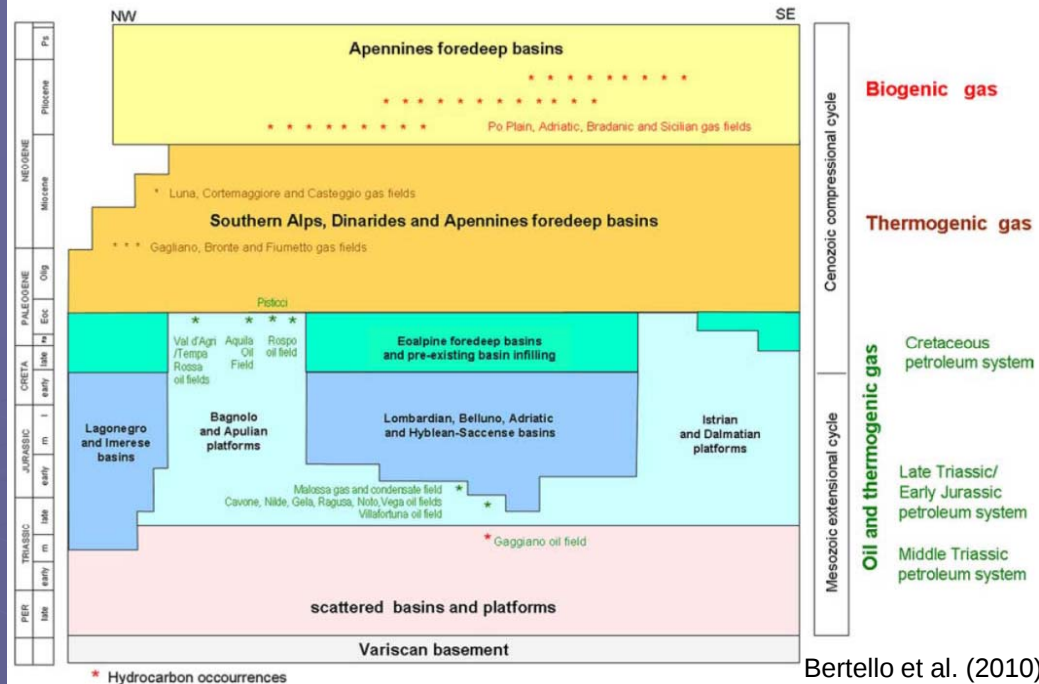
Event	Date	Time (UT)	Depth [km]	<i>M</i> (ISC)	Source
1	04/13/75	15:02	10	4.6b	
2	04/08/76	02:40	20	7.0s	Amorèse <i>et al.</i> (1995)
3	04/08/76	02:59	20	6.4s	
4	05/17/76	02:58	13	7.0s	Amorèse <i>et al.</i> (1995)
5	05/18/76	04:16	8	4.5s	
6	05/28/76	14:05	5	4.8s	
7	04/21/77	13:38	10	4.9s	
8	07/14/77	05:49	5	5.4s	CMT
9	06/04/78	19:30	15	5.7s	Uzbek network
10	03/19/84	20:28	15	7.0s	Amorèse <i>et al.</i> (1995)
11	03/20/84	06:28	15	4.2s	CMT
12	05/25/94	07:42	5	5.2b	Uzbek network

Suckale (2009)

- Correlazione tra estrazione e terremoti (Simpson & Leith, 1985; McGarr, 1991; Grasso 1992; Adushkin, 2000)
 - Assenza di terremoti con $M > 6.5$ dal 1208 e sequenza sismica anomala
 - Interpretato come innesco dovuto a disequilibrio isostatico
- Origine tettonica (Bossu, 1996)
 - Escludono effetto isostatico perché estrazione di gas e iniezione di acqua si bilanciano
 - Sottolineano la migrazione della sismicità verso NE dal 1976 al 1984 per oltre 90 km che interpretano come la manifestazione di una zona di faglia “immatura”



Giacimenti Italia



	Campi Gas (Terra)	Regione	Produzione Cum (GSm ³)	Status
1	Dosso Angeli	Emilia Romagna	31.8	In produzione
2	Ravenna	Emilia Romagna	22.5	In produzione
3	Candela	Puglia	22.4	In produzione
4	S.Salvo-Cupello	Abruzzo	19.2	Stoccaggio
5	Cortemaggiore	Emilia Romagna	15.1	Stoccaggio
6	Minerbio	Emilia Romagna	13.4	Stoccaggio
7	Caviaga	Lombardia	12.2	In esaurimento
8	Spilamberto	Emilia Romagna	11.5	In produzione
9	Gagliano	Sicilia	11.3	In produzione
10	Ferrandina	Basilicata	9.0	Esaurito

Giacimenti più grandi nel mondo possono arrivare alle migliaia di GS³
2 ordini di grandezza

Giacimenti Petrolio Italiani più grandi: riserve valutabili in genere nell'ordine dei 100-200 Mbo

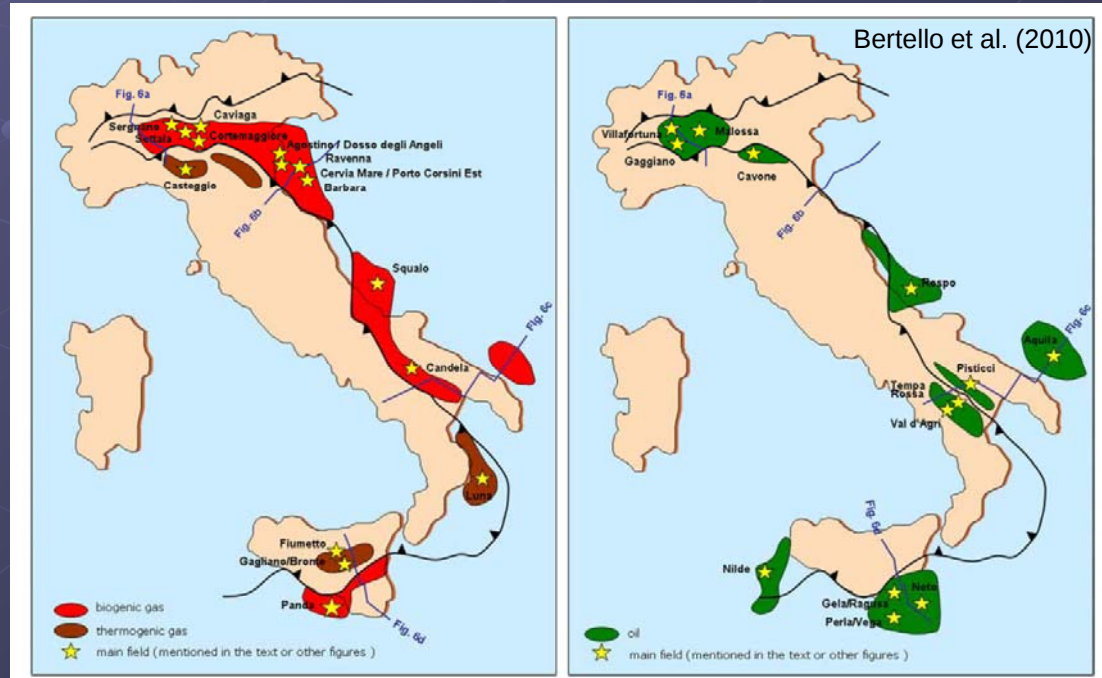
Val d'Agri: riserve stimate c. 480 Mbo (produzione attuale è di circa 85mila potrebbe arrivare a 104000 barili/giorno)

Tempa Rossa: riserve stimate c. 420 Mbo

Cavone: produzione cumulata di c. 20 Mbo

Giacimenti più grandi nel mondo: arrivano alle decine di migliaia di Mbo (e.g., Ghawar in Arabia Saudita 83000 Mbo)

2 ordini di grandezza



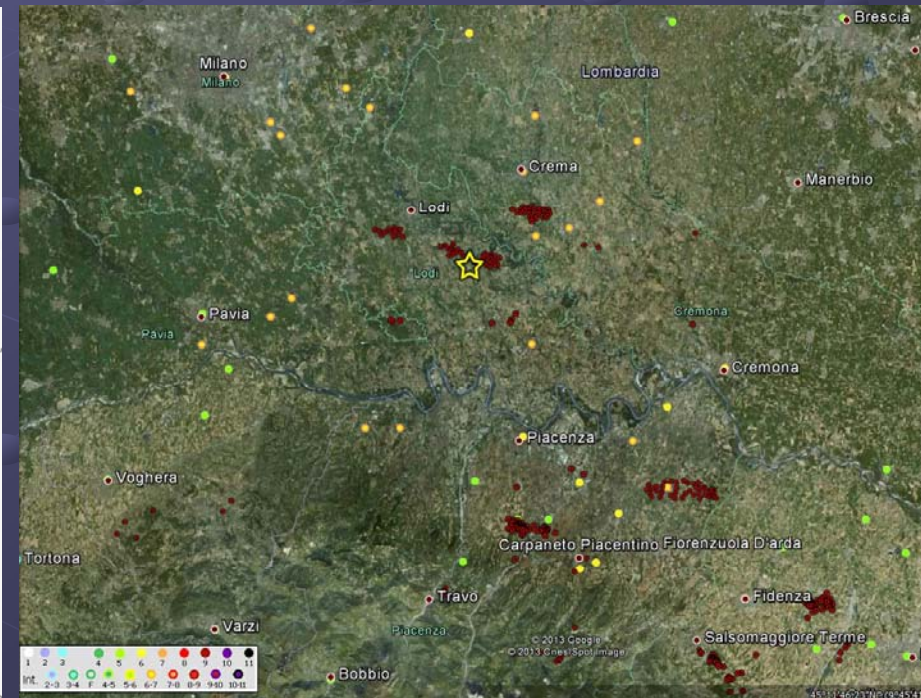
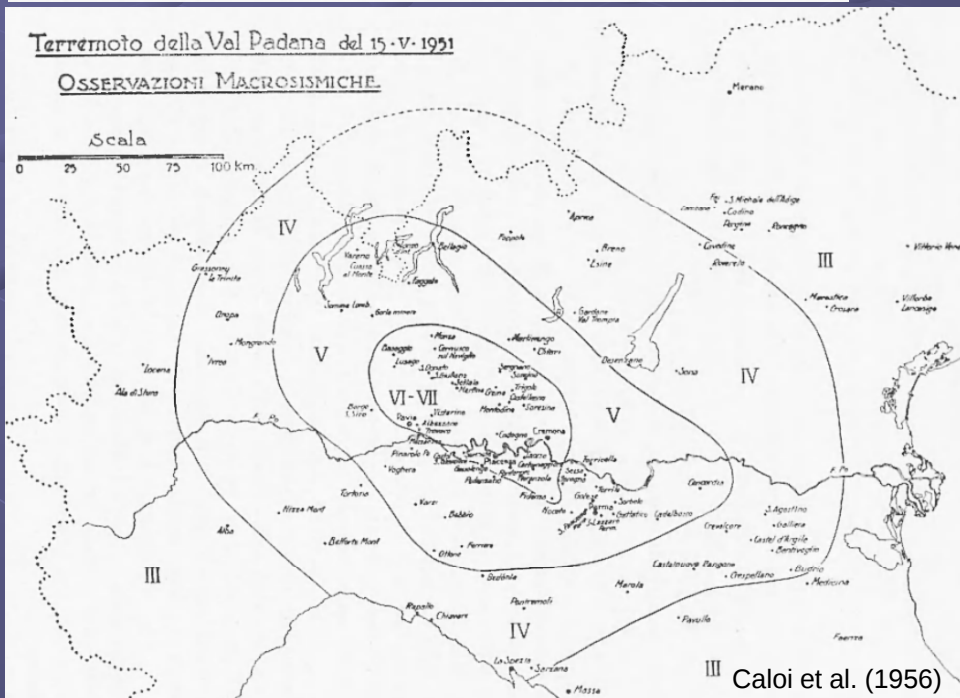
Terremoto Caviaga

La determinazione della profondità ipocentrale e dello spessore delle stratificazioni è stata molto laboriosa. La profondità ipocentrale è risultata di 5 km ca. Lo spessore medio della coltre alluvionale ha un valore di 6 km ca., mentre il successivo strato del « granito » presenta uno spessore medio di 8-9 km. Non riesce facile valutare lo spessore dei due strati « basaltici » seguenti: non dev'essere però tanto lontano dal vero un valore complessivo medio di 15 km circa.

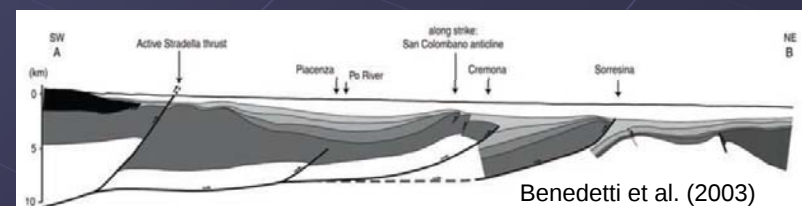
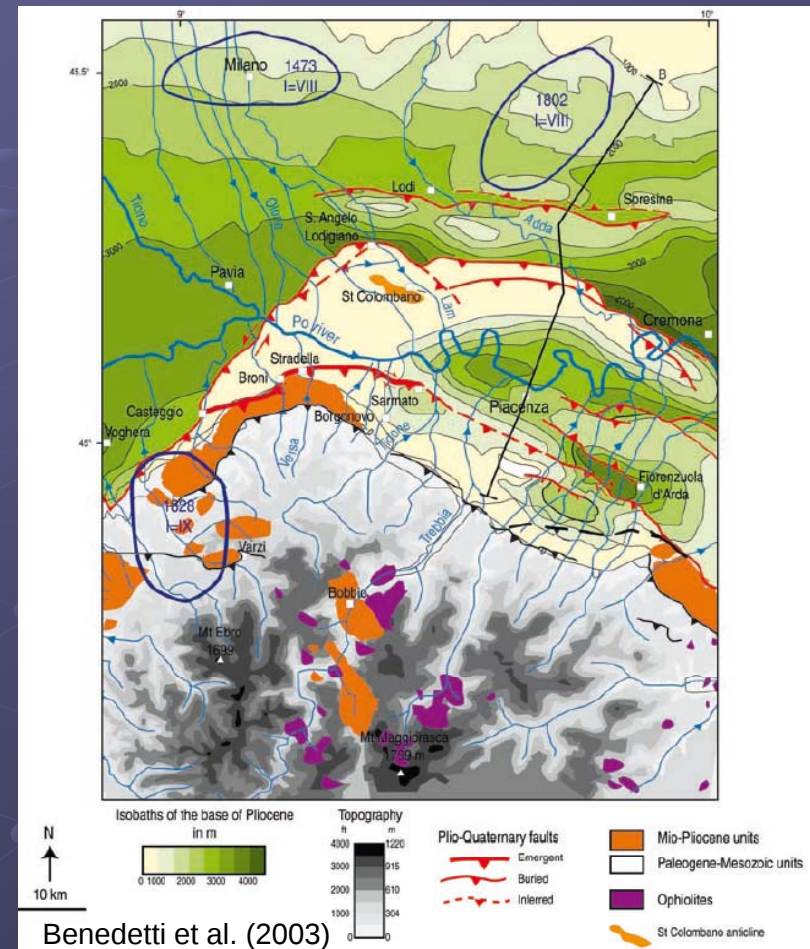
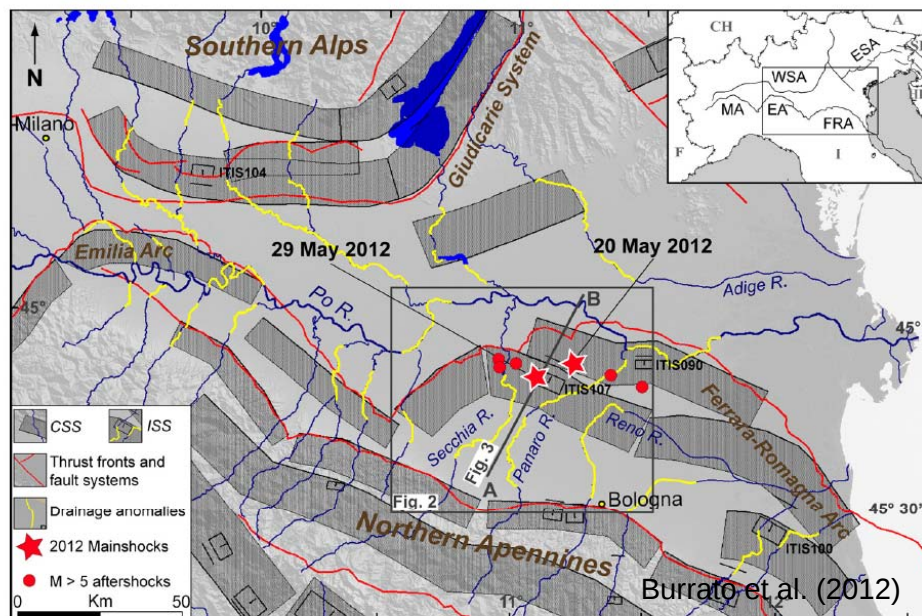
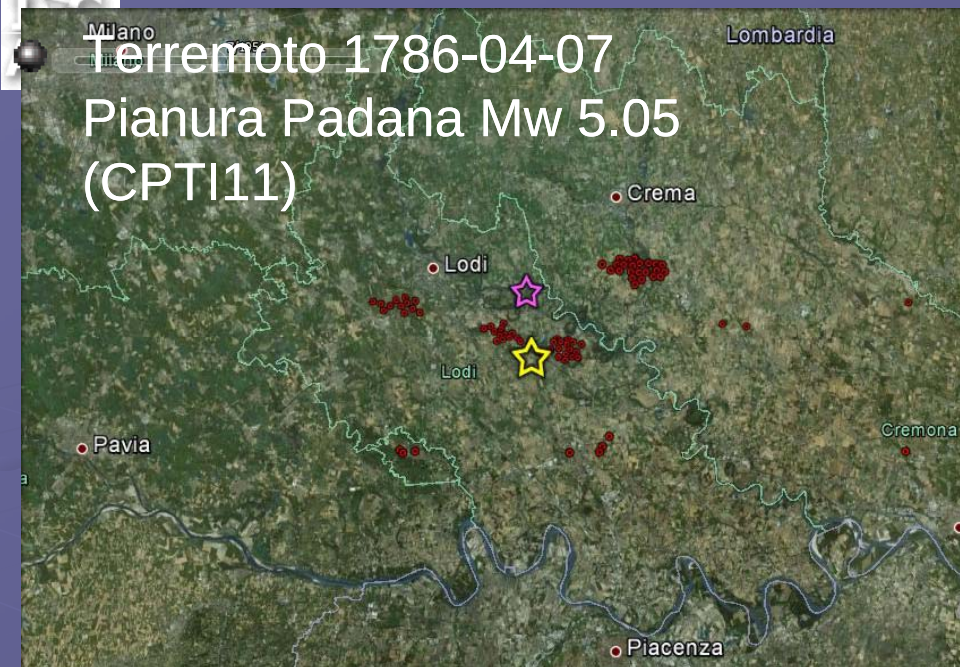
Per quanto riguarda la natura della scossa all'ipocentro, la suddivisione superficiale delle compressioni e delle dilatazioni, suggerisce l'ipotesi di una violenta spinta verso l'esterno, secondo un angolo solido con asse fortemente inclinato verso NW. La singolarità del meccanismo secondo cui la scossa si è determinata, **il fatto che la zona interessata è notoriamente asismica** e che in essa, da parecchi anni, è in corso un'abbondante estrazione di gas metano, **ha fatto ritenere non del tutto improbabile** che le scosse in esame siano comunque collegate all'enorme decompressione in atto negli strati profondi, di dove il gas scaturisce con pressioni superiori ai 100 kg/cm².

Caloi et al. (1956)

- Terremoto del Lodigiano del 1951-05-15, Mw 5.39 (CPTI11), Profondità c. 5 km (Caloi et al., 1956)
- Caloi et al. (1956) ritengono “non del tutto improbabile” un suo collegamento con le attività estrattive in corso a Caviaga
- Successivamente riportato in tutti i principali cataloghi come esempio di terremoto indotto da attività estrattive (e.g. Grasso 1992; Guha, 2000; Suckale, 2009)

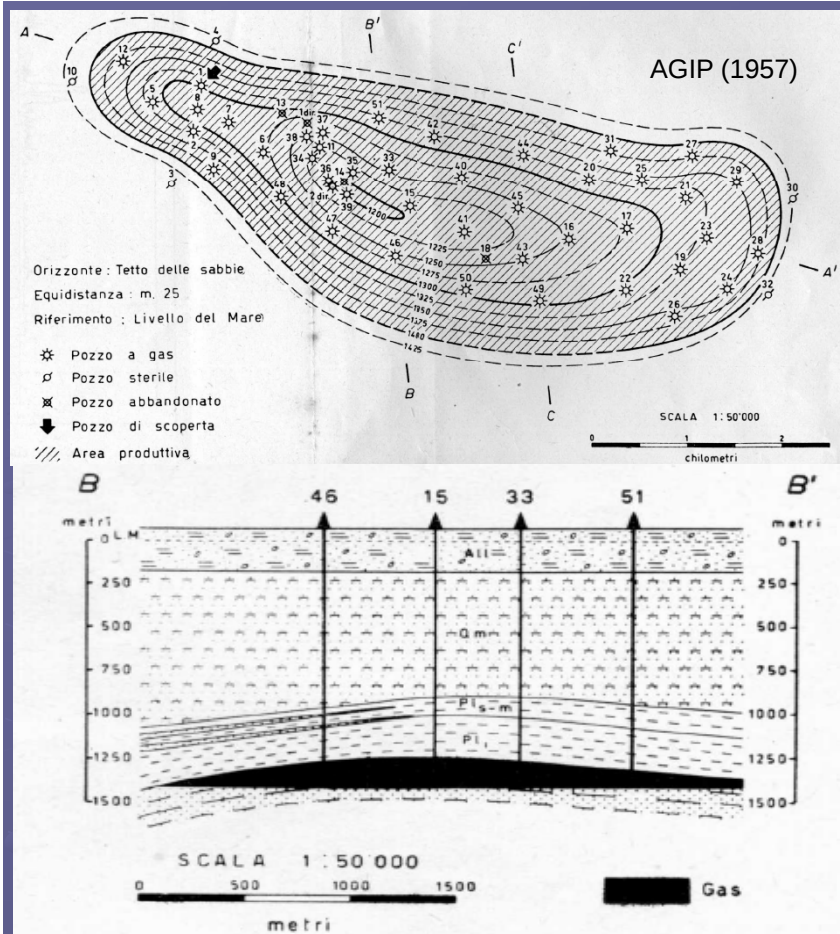


Zona Notoriamente Asismica...?



Giacimento di Caviaga

- Giacimento a condensati in arenarie del Piocene inf. ($\phi = 29\%$; $k = 750$ mD) con top reservoir c. -1200 m ssl (AGIP, 1957).
- Produzione complessiva documentata per oltre 12 GS m^3 (dati UNMIG). Prima grande scoperta di gas in Europa (1944). "Giant" anche per gli standard odierni.
- Attualmente in esaurimento (produzione di circa 4 Msm 3 nel 2012; dati UNMIG)
- Interessato da un disastroso blow-out nel 1949-50



1949 Pozzo Caviaga 13 in eruzione (Antonio Toti in primo piano). Il cratere lasciato dall'eruzione.



(*) Nel campo di Caviaga si sono verificati, particolarmente negli anni 1949-1950, alcuni gravi incidenti che esponiamo in sintesi. Mentre si apprestava al pozzo 14 il tubaggio della colonna di produzione, si verificava una violenta eruzione di gas che non si riusciva a contenere; in seguito l'eruzione si manifestava anche alle spalle della colonna di rivestimento (ϕ 9,5/8" fissata a m. 522), come pure si notavano fughe di gas in superficie anche a notevole distanza dal pozzo. Dopo pochi giorni si verificava una violenta eruzione di gas alle spalle della colonna di rivestimento del pozzo 13 con la susseguente formazione di un ampio cratere. Fenomeni eruttivi si ebbero anche al pozzo 11, ma questi poterono essere contenuti.

Una nuova eruzione di gas con formazione di un ampio cratere si ebbe durante la perforazione del pozzo 18 quando esso aveva raggiunto la profondità di appena 256 mt.

Come interventi alla situazione determinatasi in seguito agli incidenti accennati sono stati effettuati anche due pozzi direzionali (1 dir. e 2 dir.). Tutti i predetti pozzi incidentati (fig. 9-2) sono stati classificati come pozzi sterili; solo il pozzo 2 dir. è stato utilizzato come pozzo relief.

In base a diversi elementi si ebbe la convinzione che doveva essersi verificata la rottura della colonna di produzione (ϕ 6,5/8") del pozzo 11 e che in questa doveva ricercarsi la causa principale di una forte migrazione del gas dagli strati di Caviaga alle sabbie del Quaternario marino e la susseguente dispersione dello stesso gas in superficie. È da notare che le sottili ma numerose intercalazioni argillose nel corpo prevalentemente sabbioso del Quaternario marino e dell'Alluvium hanno consentito il formarsi di non trascurabili accumuli di gas. È stato poi possibile sfruttare questi accumuli perforando una numerosa serie di pozzi relief (No. 198 in totale) a profondità comprese fra mt. 100 e mt. 350. Da questi pozzi si è potuto recuperare un notevole quantitativo di gas (circa 1000 milioni di mc. alla fine del 1956).

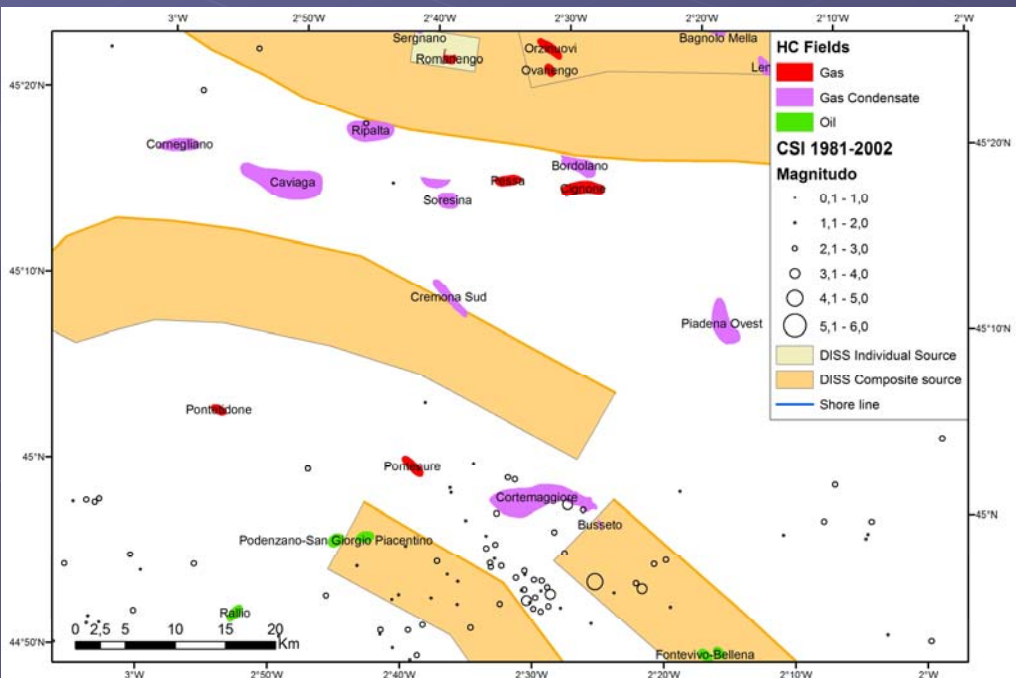
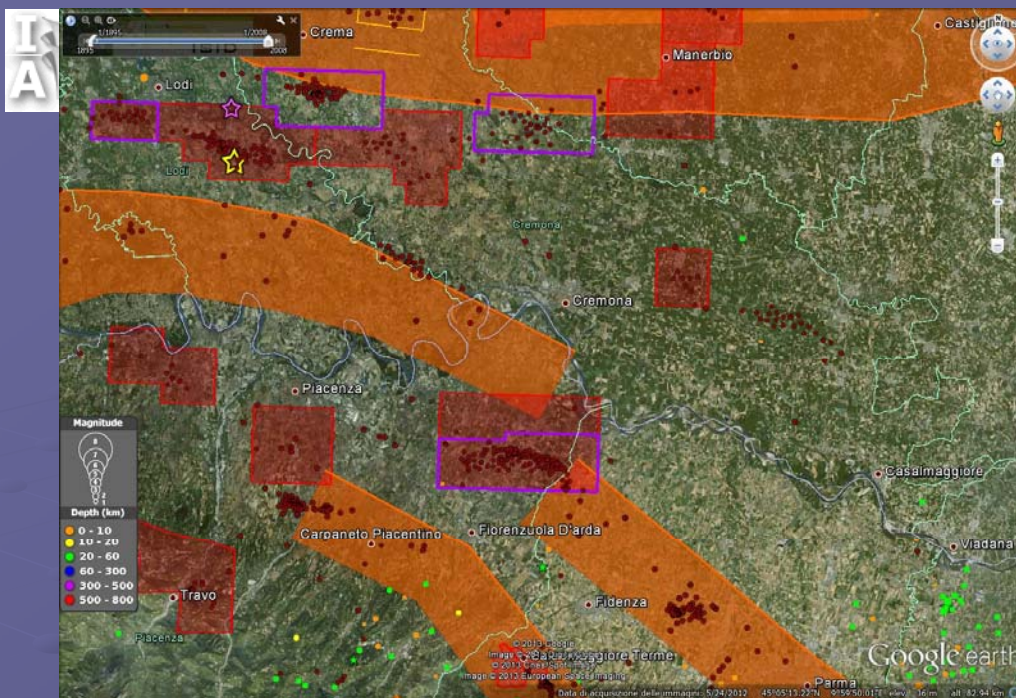
AGIP (1957)

PRODUZIONE:				AGIP (1957)			
Anno	N. pozzi in prod.	Gas mc. (*)		Gasolina mc.		Acqua mc.	
		Annuale	Progressivo	Annuale	Progr.	Annuale	Progr.
1944 . .	1	788.418	788.418	—	—	—	—
1945 . .	1	2.398.935	3.187.353	—	—	—	—
1946 . .	1	2.726.323	5.913.676	—	—	—	—
1947 . .	3	10.447.203	16.360.879	5	5	25	25
1948 . .	6	21.262.143	37.623.022	86	91	51	76
1949 . .	8	83.529.845	121.152.867	276	367	201	277
1950 . .	11	195.103.137	316.256.004	473	840	472	749
1951 . .	21	385.087.284	701.343.288	984	1.824	927	1.676
1952 . .	19	441.214.570	1.142.557.858	1.163	2.987	1.061	2.737
1953 . .	24	584.625.560	1.727.183.418	1.233	4.220	1.540	4.277
1954 . .	33	1.158.671.485	2.885.854.903	2.535	6.755	4.263	8.540
1955 . .	35	1.257.389.679	4.143.244.582	1.850	8.605	12.008	20.548
1956 . .	36	1.280.505.284	5.423.749.866	2.286	10.891	11.194	31.742

- Al 15/05/1951 era stato estratto dal giacimento un volume di idrocarburi compreso tra 316 e 701 MSm³; cioè c. 4% del volume estratto a fine 2012
- Da stime di Caloi et al. (1956) ipocentro localizzato a c. 5 km di profondità, cioè ben al di sotto dell'accumulo di gas (posto a c. 1.2-1.5 km)

Alcuni dubbi...

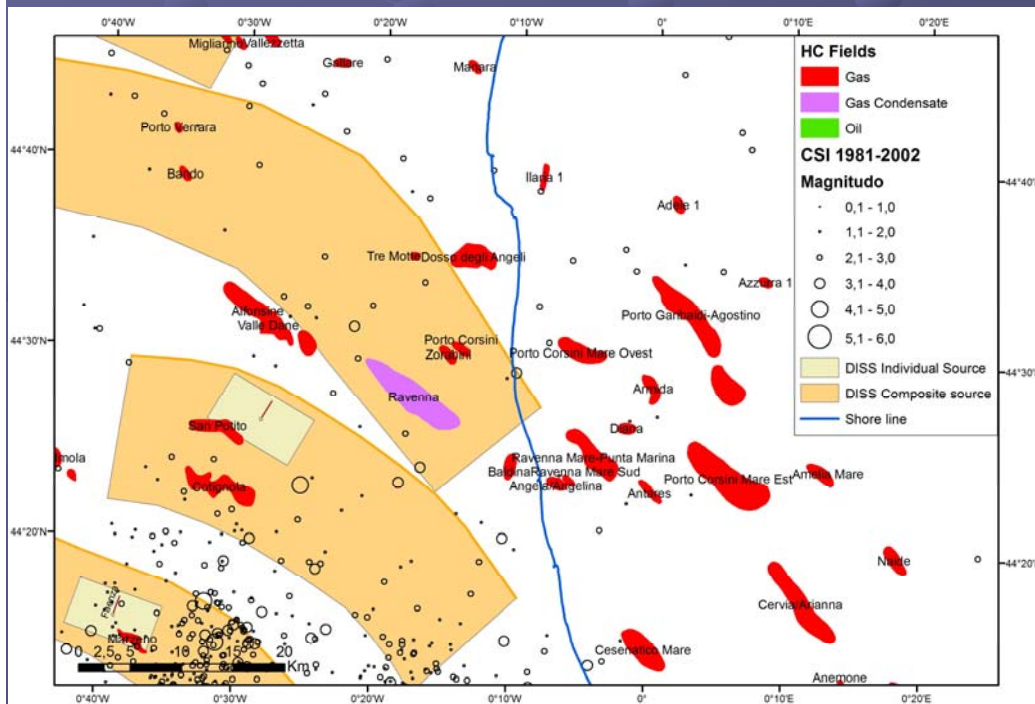
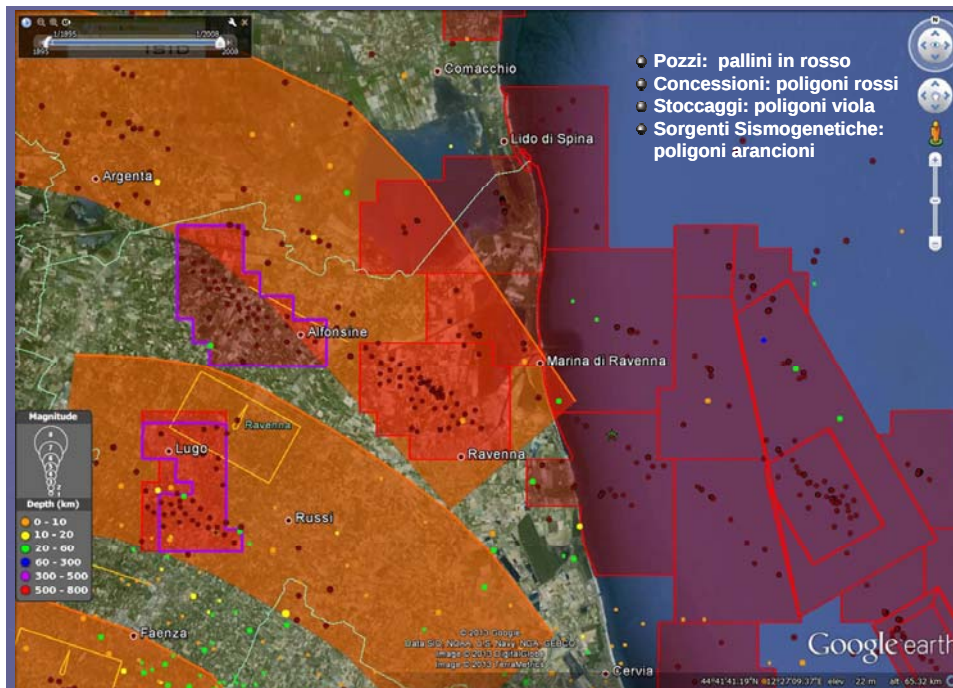
- Se, come suggerito dai dati disponibili, l'area è in realtà interessata da tettonica attiva potrebbe essersi trattato di un fenomeno di sismicità innescata?
- Se sismicità innescata da estrazione (e.g, come conseguenza di stress poroelastici, poiché i piccoli volumi estratti al 1951 rendono poco plausibile effetti isostatici) perché non si è più registrata sismicità nell'area con l'aumentare dei volumi estratti?



Analisi Sismicità Giacimenti: 1

- Caviaga (giacimento a gas condensati in esaurimento): nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISDe
- Cortemaggiore (uno dei più grandi giacimenti di gas condensati ora adibito a stoccaggio): qualche piccolo evento su CSI 1.1, nessuna evidenza su ISDe
- Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISDe (2005-2013)
- Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
- Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
- Giacimenti da IHS

Analisi Sismicità Giacimenti: 2

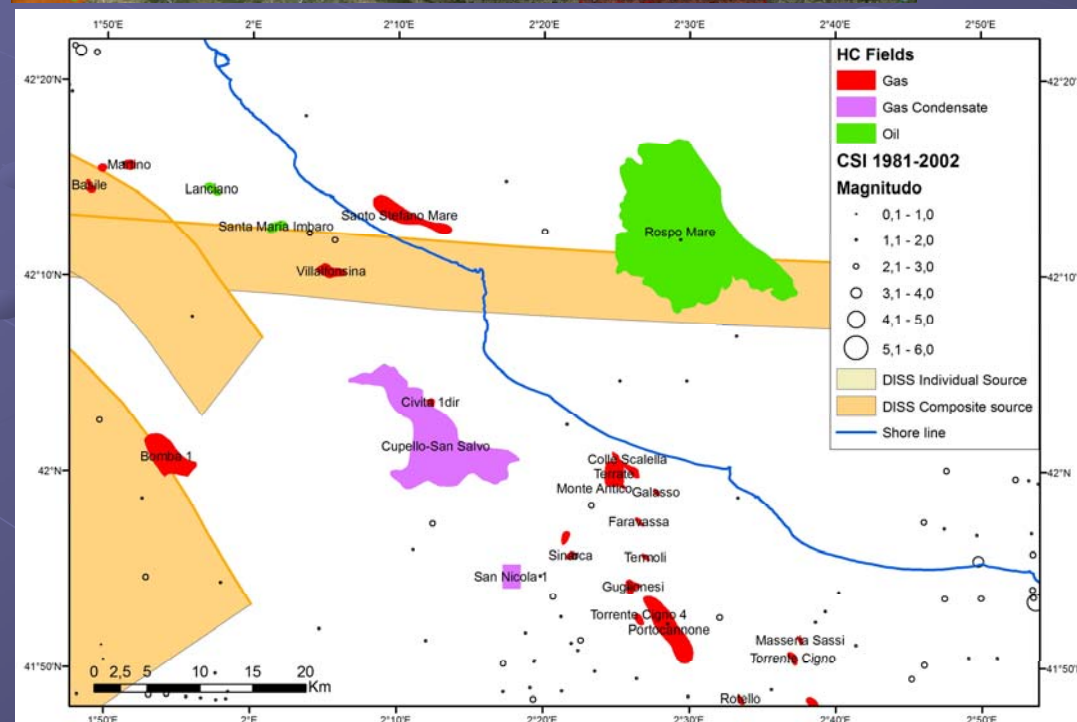
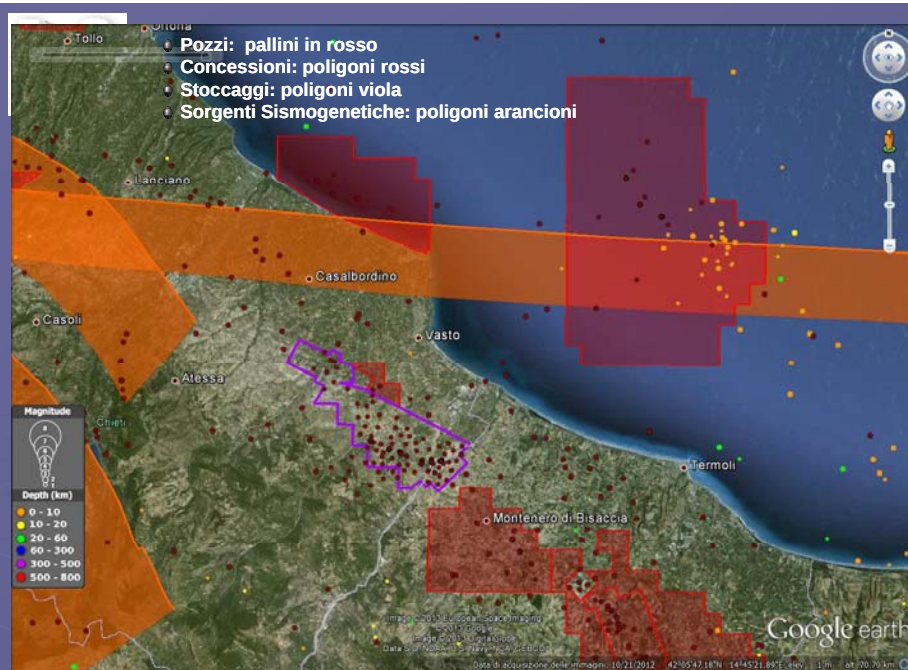


- Dosso degli Angeli e Ravenna (i due giacimenti di gas on-shore più grandi in Italia): nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISide
- In generale scarse evidenze in tutto il settore sia on-shore che off-shore

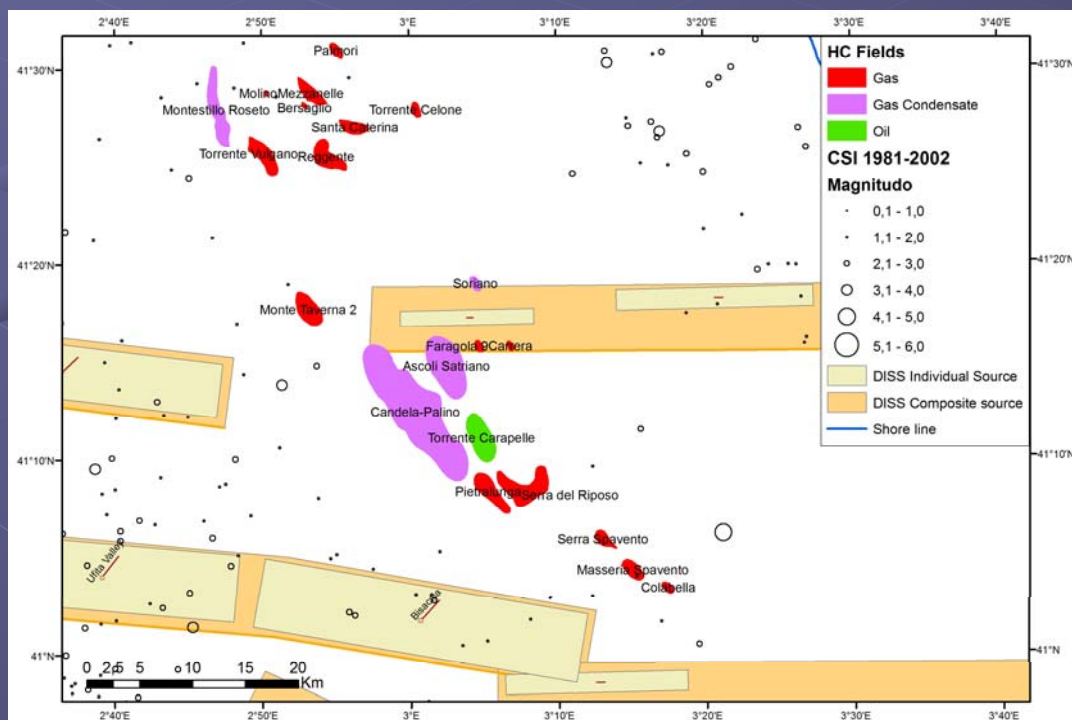
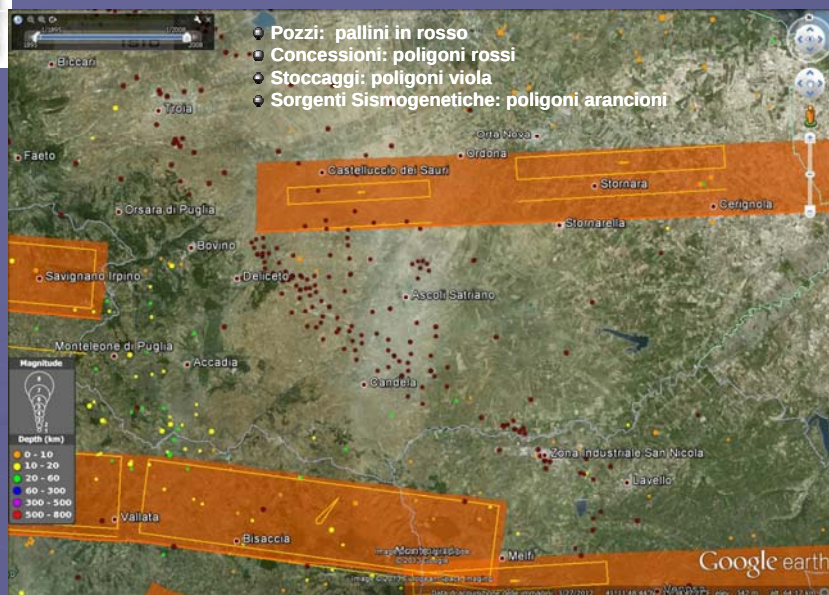
- Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISide (2005-2013)
- Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
- Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
- Giacimenti da IHS

Analisi Sismicità

Giacimenti: 3



- Rospo Mare (uno dei giacimenti di petrolio off-shore più grandi in Italia): qualche evidenza in ISIDe sul settore orientale del giacimento
- Cupello-San Salvo (uno dei più grandi giacimenti di gas condensati ora adibito a stoccaggio): nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISIDe
- Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISIDe (2005-2013)
- Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
- Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
- Giacimenti da IHS



Analisi Sismicità

Giacimenti: 4

- Candela-Palino (uno dei più grandi giacimenti di gas on-shore in Italia): nessuna evidenza sia su CSI 1.1, due eventi di M 1-2 su ISide
- In generale scarse evidenze di sismicità associabile ai giacimenti in tutto il settore
- Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISide (2005-2013)
- Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
- Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
- Giacimenti da IHS

Terremoto Emilia - Maggio 2012

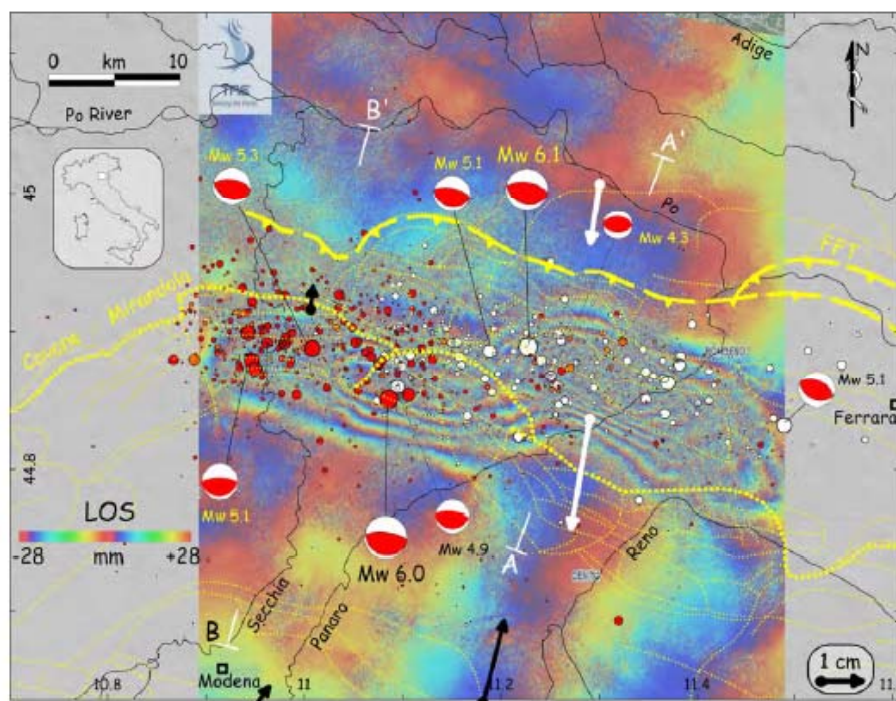
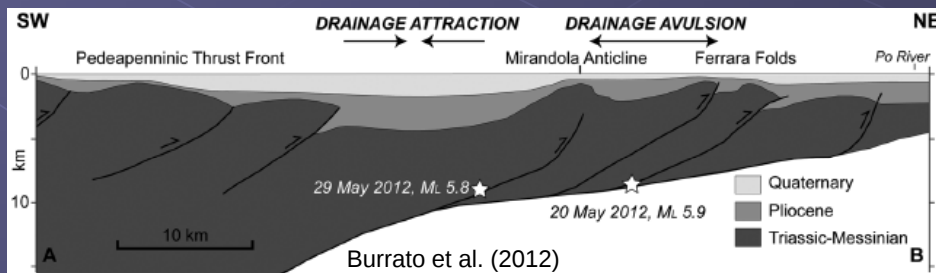


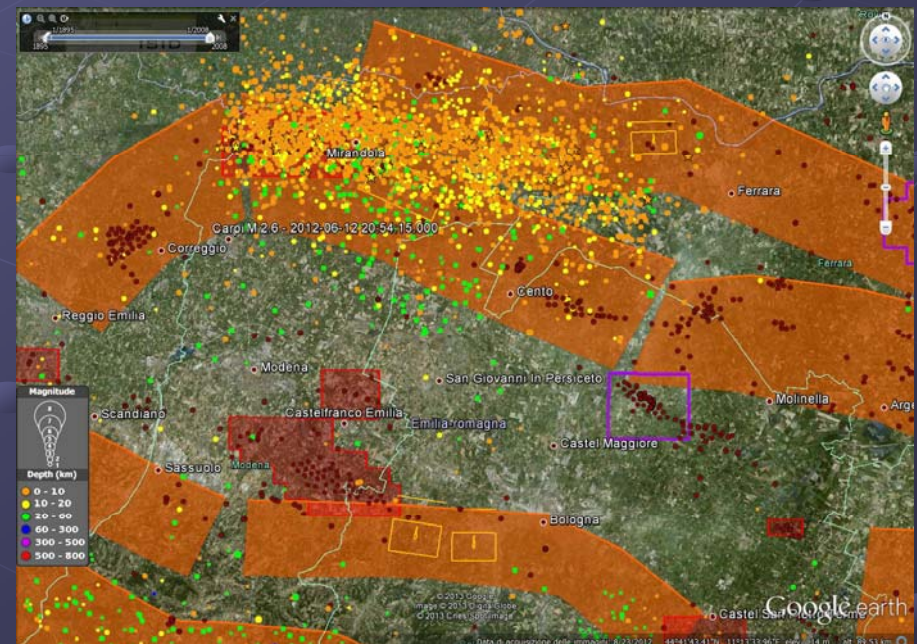
Fig. 1 - Structural map of the area affected by the 2012 seismic sequence (yellow dotted lines, buried thrusts, from Bigi et al., 1992; dashed line, front of Ferrara thrusts: FFT. Bold dots, front of Cavone-Mirandola thrusts. Circles, 2012 earthquakes, proportional to $M_l > 2.0$. White, 19-28 May sequence; red, 29 May-5 June sequence; orange, up to July 5. ISIDE, 2012). Focal mechanisms from QRCMT (2012) and TDMT (2012). Black and white arrows are GPS horizontal coseismic offsets measured after the May 20 event, accounting for ~4 cm of shortening between Serride (northernmost arrow) and San Giovanni in Persiceto (southernmost arrow; Anderlini et al., 2012). In background the differential interferogram elaborated by TRE (2012) from descending Radarsat satellite data (see line of sight color-scale: LOS, May 12-June 6), which magnificently shows the two "anticlines" grown on May 20 (~14 cm) and 29 (~11 cm), respectively. Sections A-A' and B-B' are in Figs. 2-3, respectively.

Galli et al. (2012)



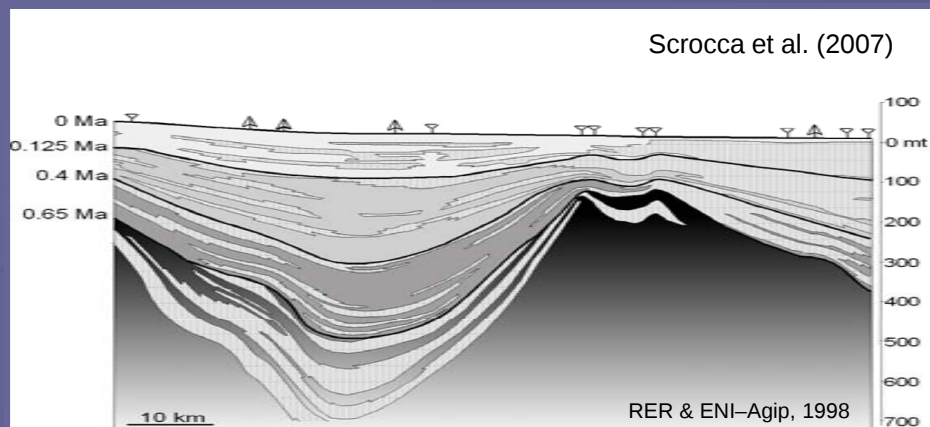
Burrato et al. (2012)

- Eventi e sequenza del 20 e 29 maggio 2012 associati a riattivazione rampe sovrascorrimenti
- Evento del 29 maggio collocabile sul sovrascorrimento di Mirandola

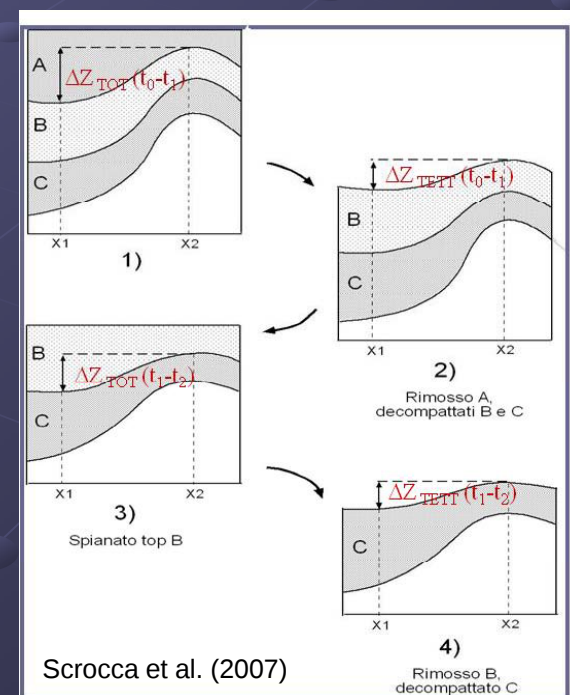
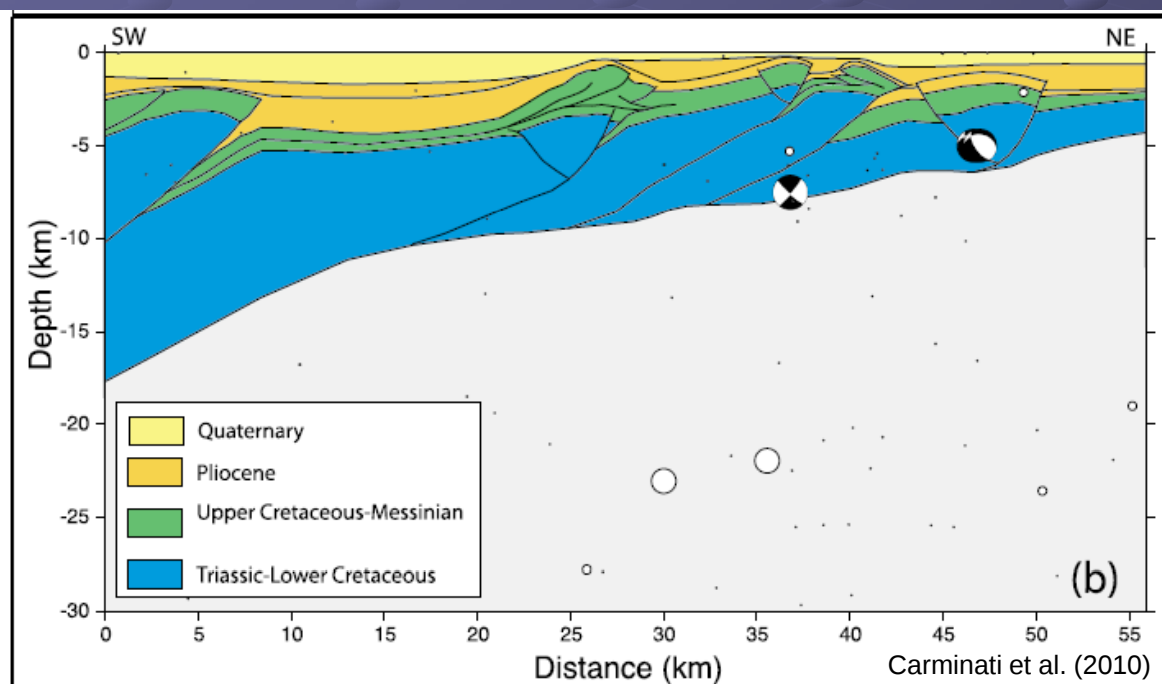




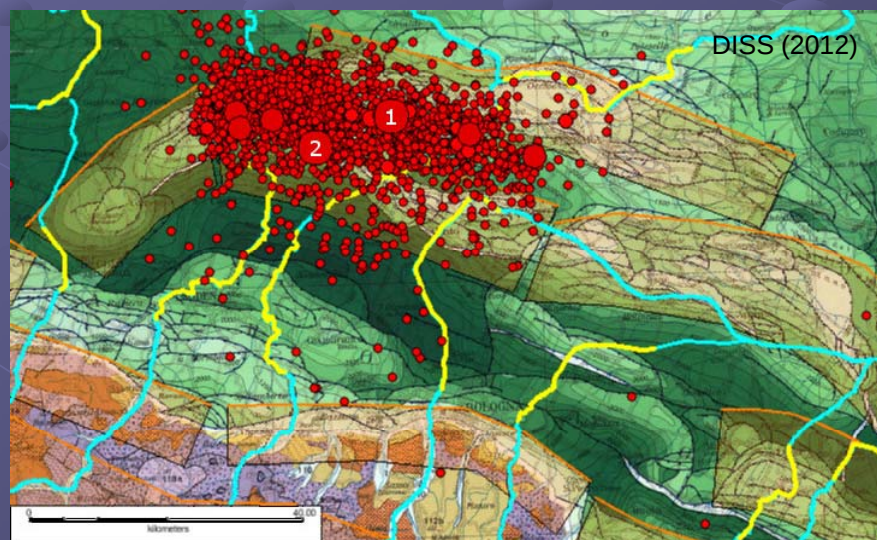
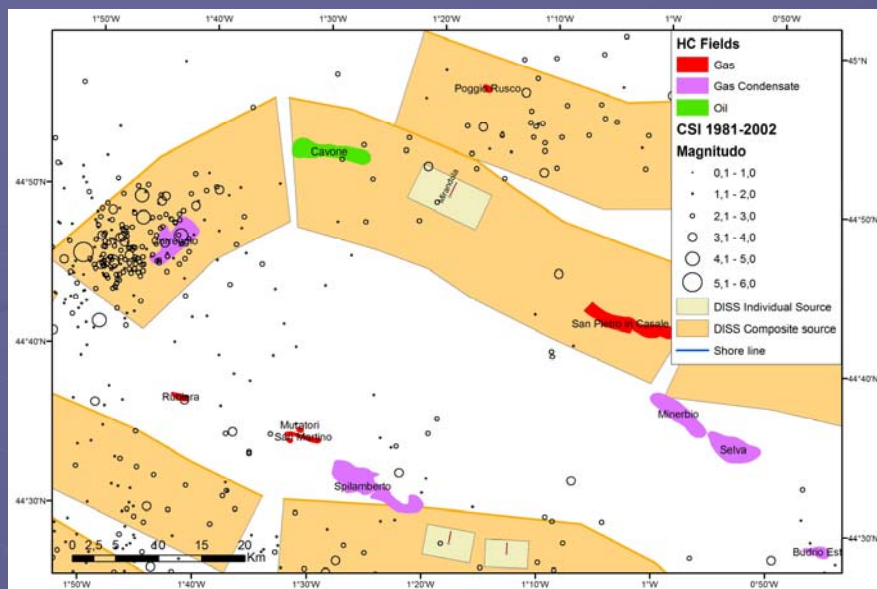
Sorgente Sismogenetica di Mirandola



DISS 3.1.1: Seismogenic Source ITIS107 - Mirandola	
Source Info Summary	Commentary
References	Pictures
General information	
Code	ITIS107
Name	Mirandola
Compiled By	Burrato, P., E. Carminati, C. Doglioni and D. Scrocca
Latest Update	19/09/2007
Parametric information	
Parameter	Qual. Evidence
Location (Lat/Lon)	44.8390 / 11.1351
Length (km)	8.7
Width (km)	5.8
Min Depth (km)	3.9
Max Depth (km)	7.6
Strike (deg)	113
Dip (deg)	40
Rake (deg)	90
Slip Per Event (m)	0.45
Slip Rate (mm/y)	0.25 - 0.5
Recurrence (y)	900 - 1800
Magnitude (Mw)	5.9
Q-keys:	LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement

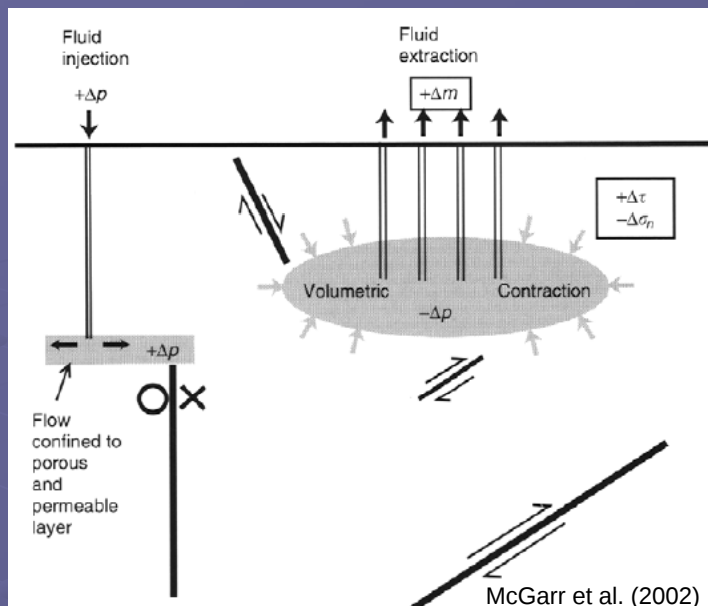


Terremoto Emilia 2012: ...Innescato?



- Assenza di giacimenti vicini alle zone epicentrali (a meno di 20 km) a parte Cavone
- Il reservoir di Cavone è costituito da rocce carbonatiche fratturate: effetti poroelastici poco probabili
- Cavone è un giacimento molto piccolo: effetti isostatici poco plausibili
 - Volumi estratti c. 20 Mbo (vs 480 Mbo di riserve della Val d'Agri)
 - Produzione attuale c. 517 bo/d (30000 m3/a, UNMIG), iniziale c. 3500 b/d (200000 m3/a, UNMIG), vs 85000 b/d Val d'Agri
- Volumi di acqua eventualmente reiniettata non noti; probabilmente stimabili in qualche m3/h o, al massimo, in 20-30 m3/h sulla base dei valori massimi di produzione noti (vs i 400 m2/h reiniettati dall'impianto geotermico di Casaglia presso Ferrara)
- Due eventi principali: il primo si sviluppa sulla struttura di Ferrara, il secondo sul quella di Mirandola. Comportamento poco plausibile nel caso di innesco dovuto alle attività di Cavone

Conclusioni1/3: Processi Generali



- Lo strato crostale sismogenetico è in uno stato di stress prossimo a rottura quasi ovunque. Piccole perturbazioni (e.g., 0.01 Mpa) possono innescare sismicità
- I diversi fenomeni che possono indurre sismicità in giacimenti di idrocarburi spesso interagiscono (e.g., estrazione di idrocarburi può essere associata ad iniezione di fluidi). Con l'esclusione di pochi chiari casi la determinazione dei rapporti di causa-effetto è sempre molto complessa

1. Riduzione della resistenza a taglio causata dall'aumento della pressione di poro conseguente all'immissione di fluidi nel sottosuolo
 - Fratturazione idraulica ($ML \leq 2$ principalmente all'interno del reservoir)
 - Recupero secondario (ML sino a 4-5 per innesco di strutture sismogenetiche)
2. Effetti Poroelastici dovuti ad estrazione di fluidi con $ML \leq 5$ sviluppati sopra e sotto il reservoir a distanze contenute dal giacimento (Grasso, 1992)
3. Per alcuni eventi con $ML \geq 6$ (e.g., Gasli e Coalinga) di controversa interpretazione è stata proposta quale possibile causa per un effetto di innesco il disequilibrio isostatico indotto da estrazione di ingenti quantità di fluidi



Conclusioni 2/3: Analisi Database

I giacimenti in cui è stata registrata una sismicità correlabile con l'attività estrattiva sono solo una minima frazione dei giacimenti sfruttati

- A scala globale solo 70 casi sospettati (database certamente incompleto) rispetto ad un totale di oltre 65000 giacimenti di idrocarburi (Li Guoyu, 2011):
 - 0.1% di casi
- Statistiche negli USA (dove esiste forse il database più completo - NRC, 2012):
 - Estrazione idrocarburi: 0.33% (campi)
 - Smaltimento H₂O: 0.03%
 - Recupero secondario: 0.02% (pozzi)
- In Italia riportato 1 solo caso dubbio (Caviaga). Scarse evidenze per gli altri giacimenti

Table 3.4 Summary Information about Historical Felt Induced Seismic Caused by or Likely Related to^a Related to Energy Technology Development in the United States

NRC (2012)

Energy technology	Number of Projects	Number of Felt Induced Events	Maximum Magnitude of Felt Event	Number of Events M _≥ 4.0 ^d	Net Reservoir Pressure Change	Mechanism for Induced Seismicity
Vapor-dominated geothermal	1	300-400 per year since 2005	4.6	1 to 3 per year	Attempt to maintain balance	Temperature change between injectate and reservoir
Liquid-dominated geothermal	23	10-40 per year	4.1 ^b	Possibly one	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase
Enhanced geothermal systems	~8 pilot projects	2-10 per year	2.6	0	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase and cooling
Secondary oil and gas recovery (waterflooding)	~108,000 (wells)	One or more felt events at 18 sites across the country	4.9	3	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase
Tertiary oil and gas recovery (EOR)	~13,000	None known	None known	0	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase (likely mechanism)
Hydraulic fracturing for shale gas production	35,000 wells total	1	2.8	0	Initial positive; then withdraw	Pore pressure increase
Hydrocarbon withdrawal	~6,000 fields	20 sites	6.5	5	Withdrawal	Pore pressure decrease
Waste water disposal wells	~30,000	8	4.8 ^c	7	Addition	Pore pressure increase
Carbon capture and storage, small scale	1	None known	None known	0	Addition	Pore pressure increase
Carbon capture and storage, large scale	0	None	None	0	Addition	Pore pressure increase

^aNote that that in several cases the causal relationship between the technology and the event was suspected but not confirmed. Determining whether a particular earthquake was caused by human activity is often very difficult. The references for the events in this table and the way in which causality may be determined are discussed in the report. Also important is the fact that the well numbers are those wells in operation today, while the numbers of events listed extend over a total period of decades.



Conclusioni 3/3: Giacimenti Italiani

- Caviaga: dubbi sulla effettiva interpretazione come terremoto innescato da attività estrattiva
- Le ipotesi su un eventuale innesco del terremoto dell'Emilia del maggio 2012 sono in realtà prive di oggettivi elementi di supporto
- In Italia, dai database sismologici disponibili e per i principali giacimenti on-shore, si hanno scarse evidenze di sismicità stimolata chiaramente attribuibile alle attività estrattive con magnitudo superiore alla soglia percepibile dalla popolazione:
 - Assenza di applicazioni di fracking s.s. per assenza di significativi spessori di "shale gas". Recupero secondario con iniezione di grandi volumi di acqua molto raro
 - In Italia in genere giacimenti medio piccoli. Per sviluppo di significativi effetti dovuti a disequilibrio isostatico necessario avere giacimenti di dimensioni significative
 - Per sviluppo di effetti poroelastici necessario avere reservoir di porosità elevata e compattabile, eventualmente associato a presenza di faglie pre-esistenti, con presenza in strati sopra o sottostanti di formazioni rigide. Tali condizioni sono generalmente assenti nei principali reservoir italiani
- In generale, rimane comunque necessario approfondire gli studi ed estendere e migliorare le reti di monitoraggio, con un'attenzione particolare rispetto ai maggiori giacimenti (e.g., Val d'Agri) e ai progetti che prevedono la re-iniezione di fluidi nel sottosuolo