

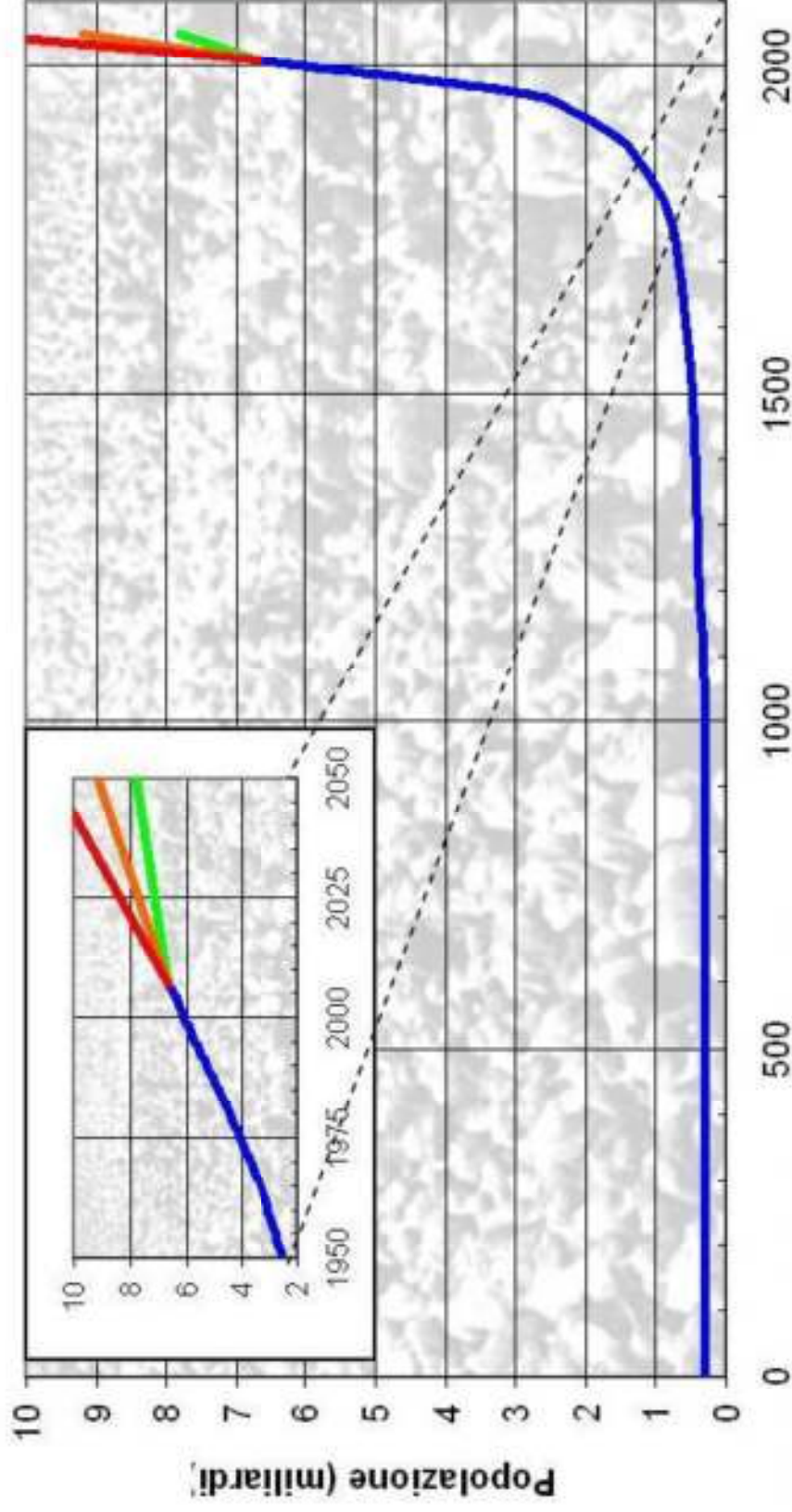
Geotermia stimolata. Dove? In Sardegna!

*Un piccolo tributo a chi in Sardegna ha cercato
l'acqua con grande passione*

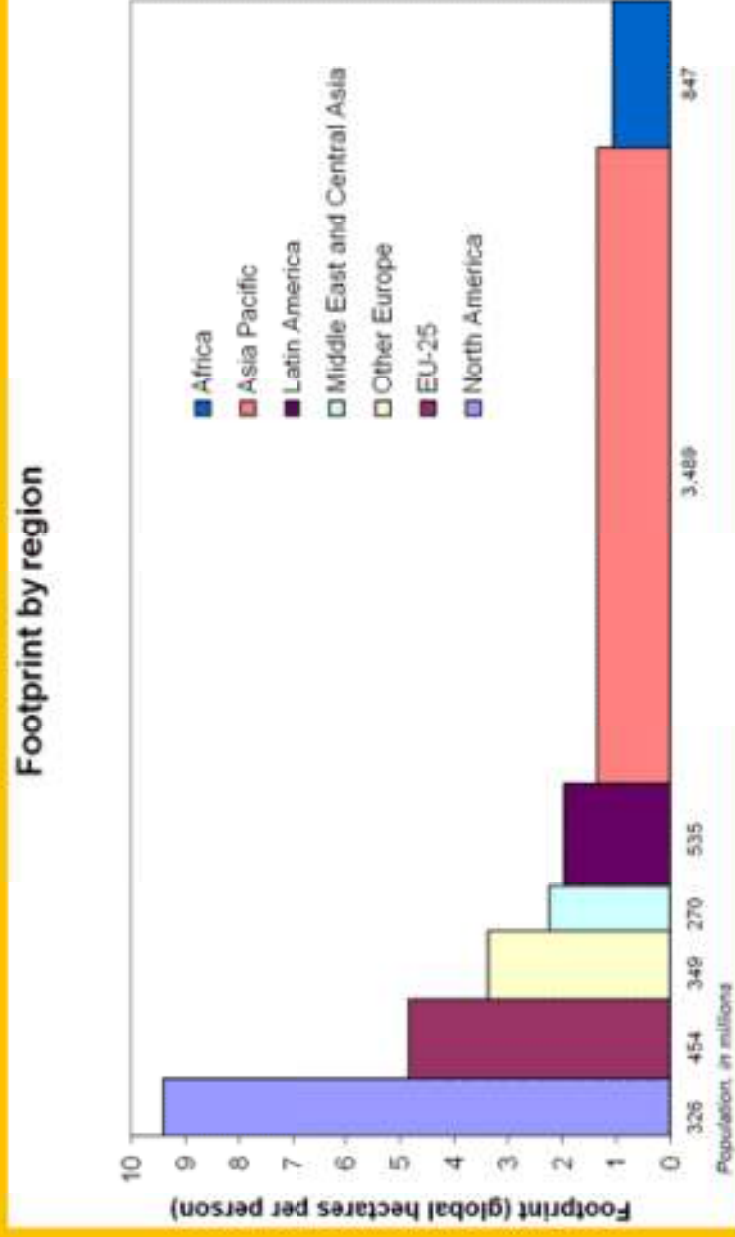
Francesco Mulargia

Dipartimento di Fisica
Università di Bologna

L'aumento esponenziale della popolazione mondiale



e le abitudini di vita “moderne”

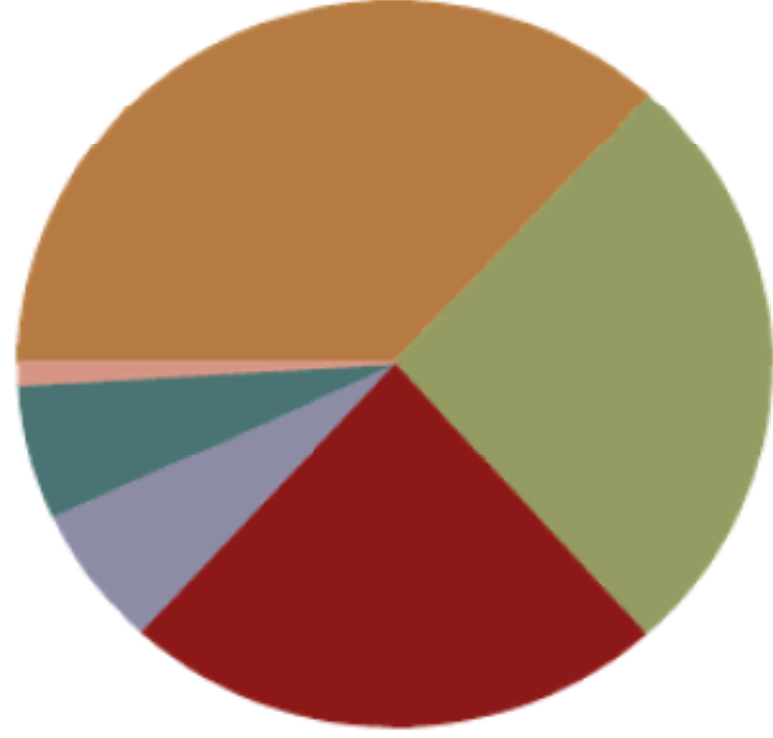


portano ad una fame crescente di
energia



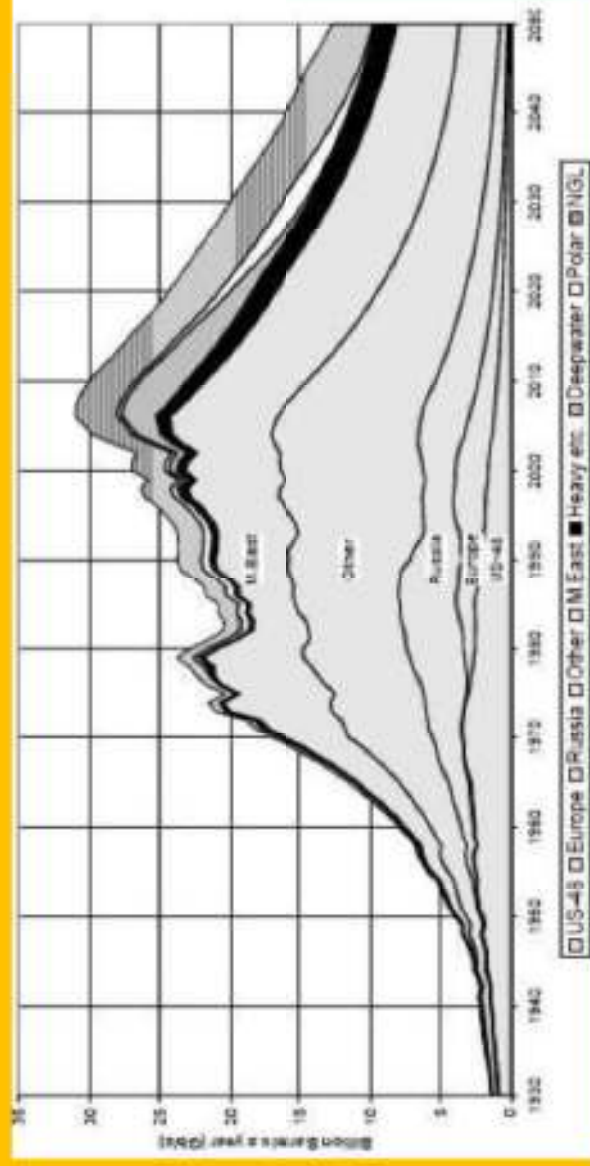
Quale energia?

Le fonti attuali



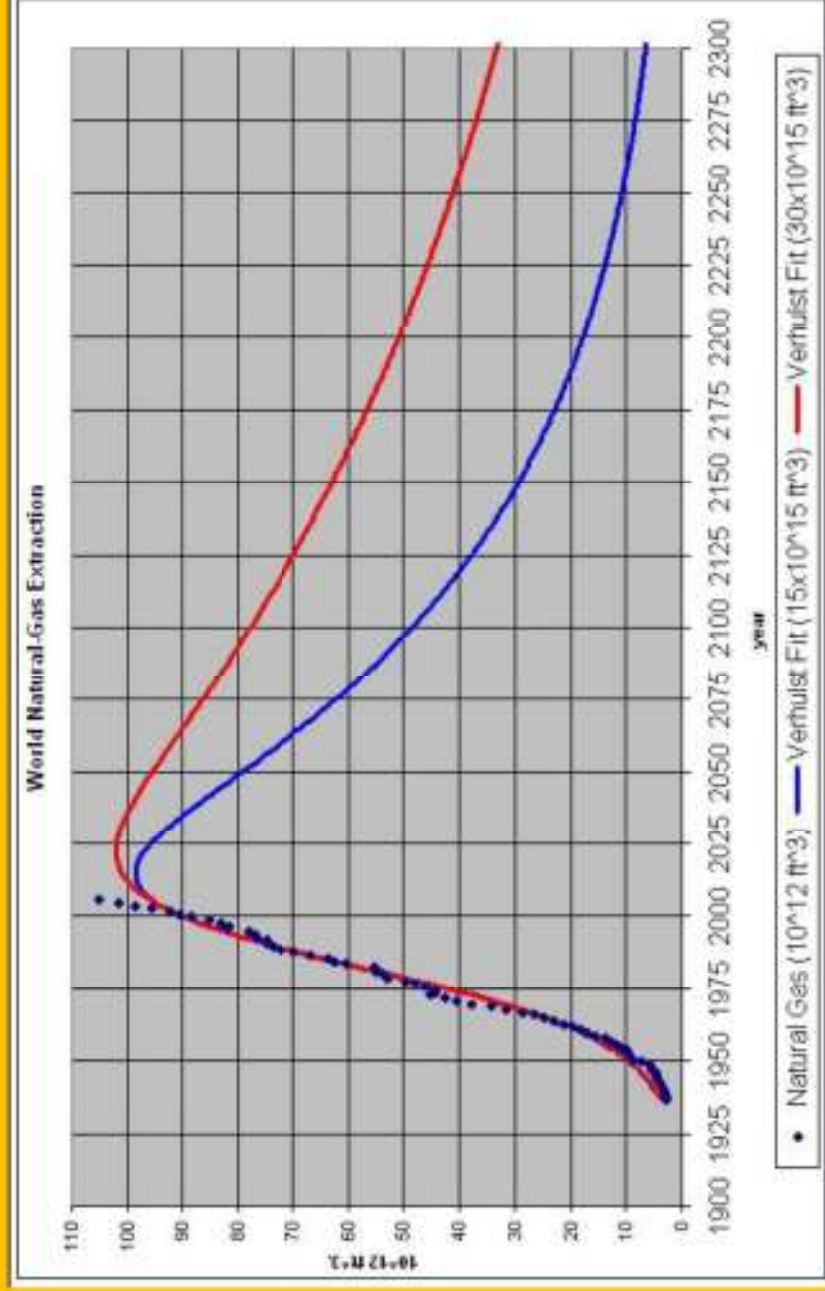
* Includes geothermal, solar, wind, and wood and waste electric power.
Source: Energy Information Administration, 2005 data.

Quasi tutte in esaurimento: Petrolio – il picco di Hubble

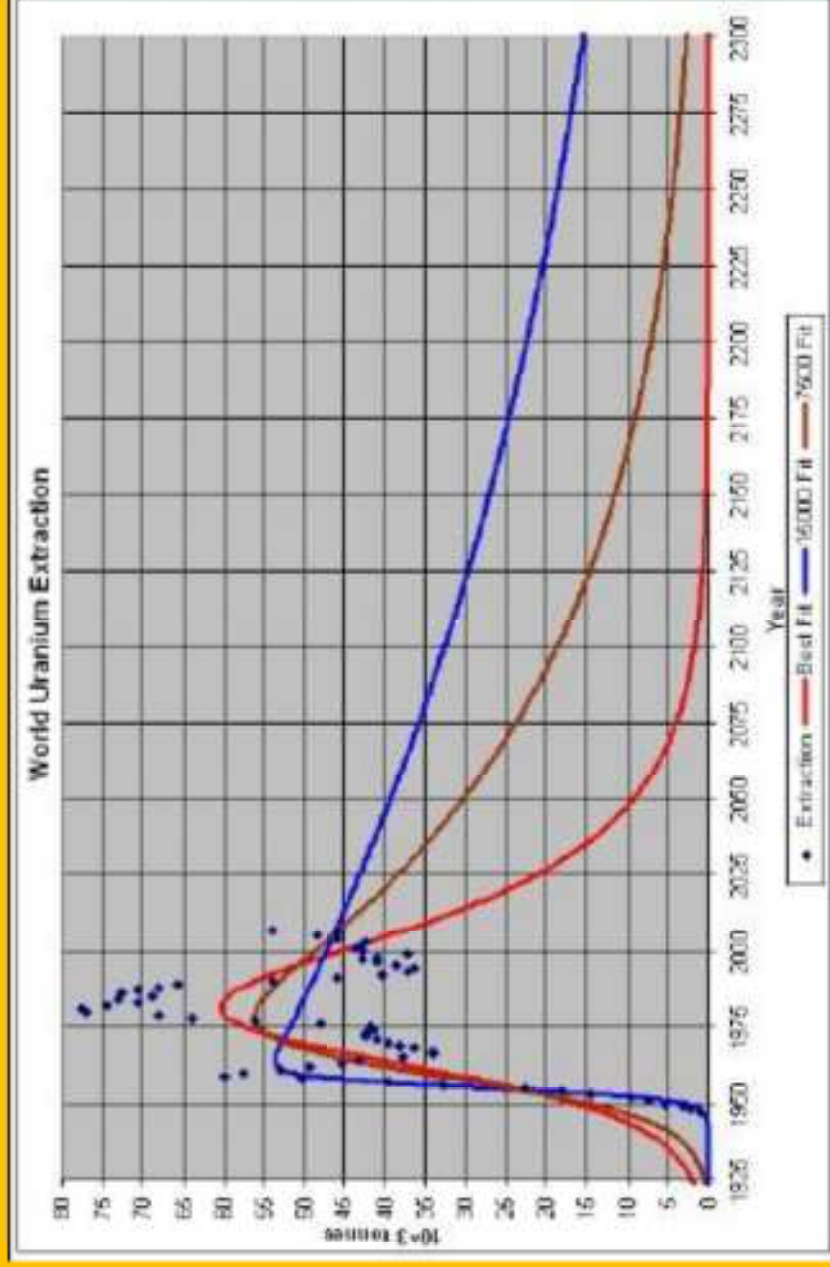


Picco di produzione attorno al 2010. Poi verso l'esaurimento

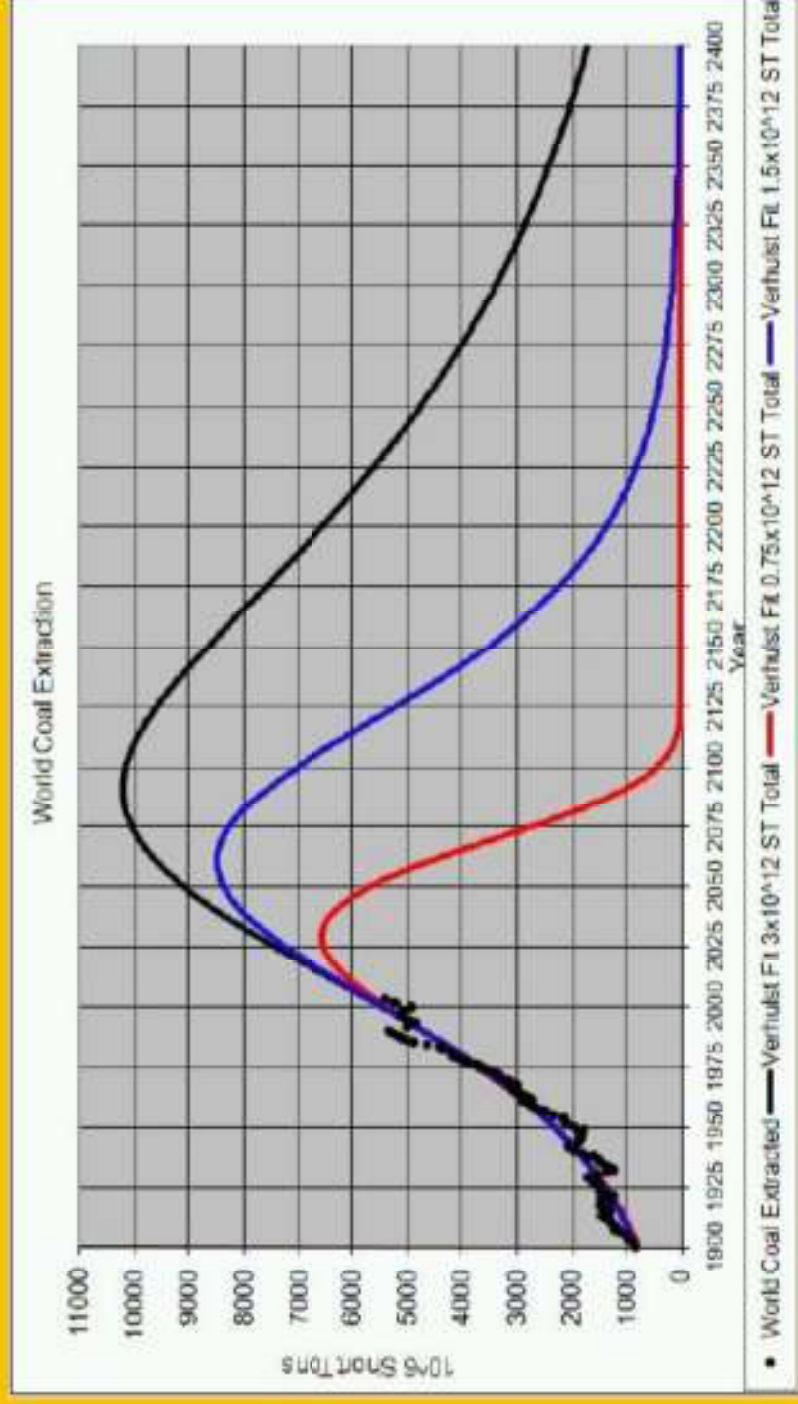
Il gas - il picco di Verhulst



L'uranio – il picco del boh?!



Il carbone – il picco?



Come facciamo? Non lo sappiamo!

- 1) Limitare la popolazione mondiale
Come?
- 2) Cambiare stile di vita
Chi?
- 3) Trovare nuove risorse
Dove?
- 4) Scoprire nuove forme di energia
Quando?

La grande speranza

- 5) Utilizzare energie rinnovabili

E' realizzabile?

In linea di principio, la Geotermia puo' giocare un ruolo fondamentale

- I primi 10 km di crosta terrestre immagazzinano sotto forma di calore 50000 volte l'energia ricavabile da tutti i giacimenti di idrocarburi

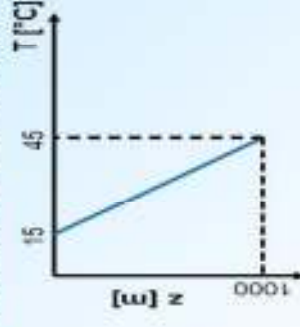
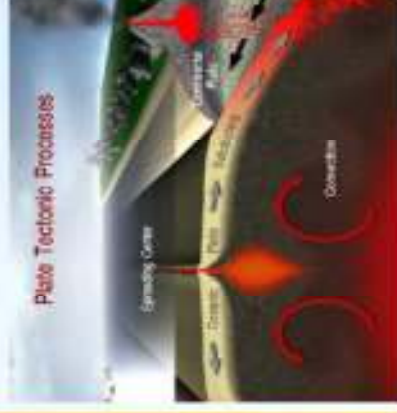
- *Il vero problema e' estrarlo!*

Il calore della Terra

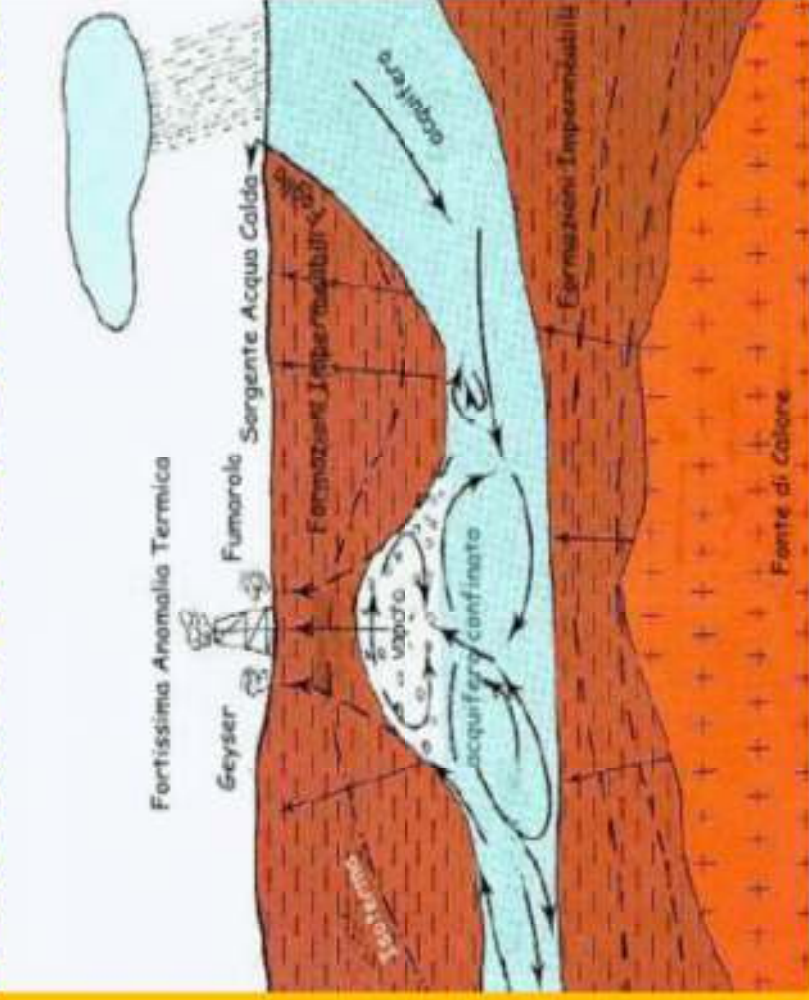
Massa terrestre:

- > 99% $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- > 0.1% $T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gradiente: $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$



L'acqua come veicolo di estrazione: il pozzo di calore a circolazione naturale



Pozzo a circolazione naturale d'acqua



Larderello, Toscana

Pozzo a circolazione naturale d'acqua



Nesjavellir, Islanda

Pozzo a circolazione naturale d'acqua



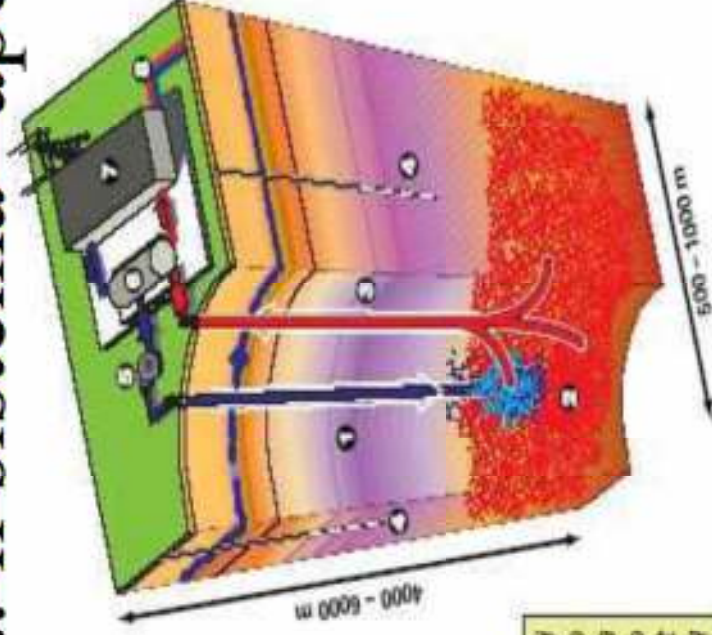
The Geysers, California

I pozzi a circolazione naturale d'acqua producono energia!

- Attualmente i pozzi a circolazione naturale coprono lo 0.3% del fabbisogno energetico mondiale (1/20 di tutte le centrali nucleari)
- In Islanda coprono il 40%, nel Salvador il 35%, in Toscana il 25%, in California il 5%.
- Queste però sono in pratica le uniche zone al mondo

E' possibile "crearne" artificialmente altre?

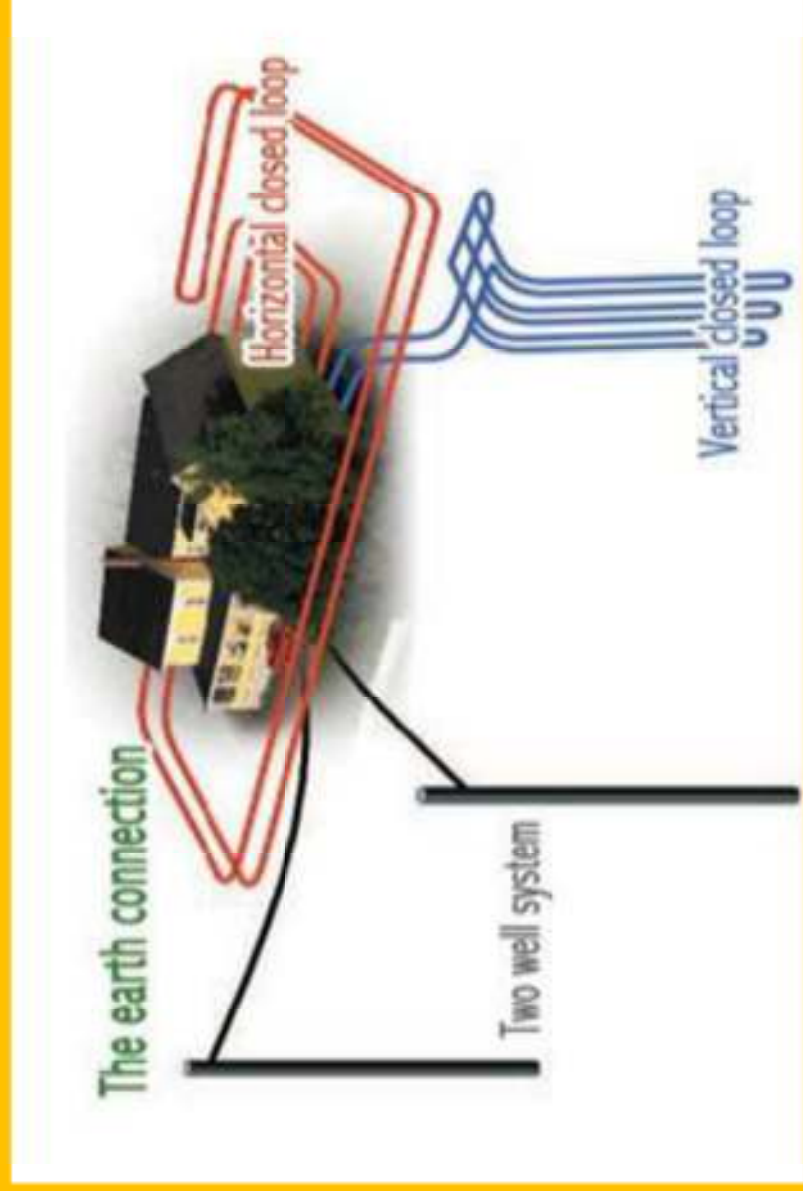
Pozzo di calore a circolazione d'acqua indotta: il sistema "aperto"



Principio di
funzionamento
di un sistema
geotermico
Deep Heat
Mining

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 - Pozzo d'iniezione | 5 - Pompa di circolazione |
| 2 - Serbatoio roccioso fratturato | 6 - Scambiatore del calore |
| 3 - Pozzo di produzione | 7 - Centrale elettrica |
| 4 - Pozzo d'osservazione | 8 - Rete di distribuzione di calore |

Pozzo di calore a circolazione d'acqua
indotta: il sistema chiuso, un
geoscambio su grande scala

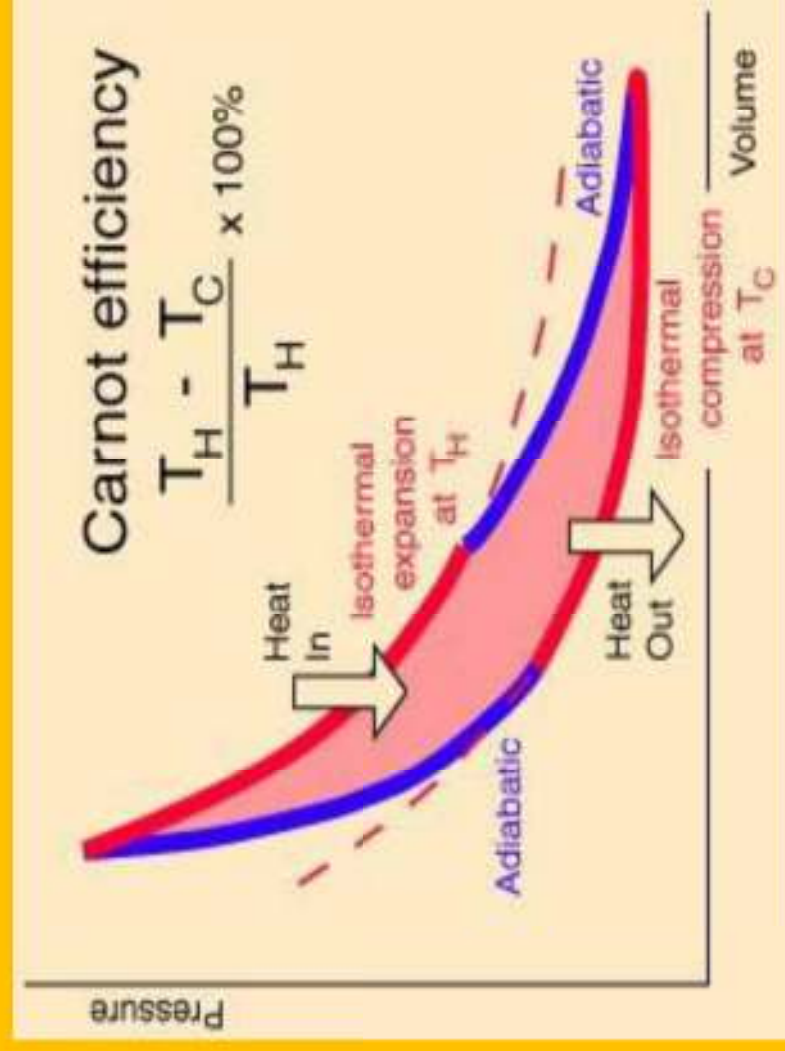


Impianti pilota sono stati realizzati in molti paesi

- 1) *Los Alamos, New Mexico, USA*
- 2) *Falkenberg e Urach, D*
- 3) *Soultz, Alsazia, F*
- 4) *Camborne, UK*
- 5) *Ogachi, JPN*

*In qualche caso hanno anche prodotto
energia elettrica (≈ 3 MW)*

Alla base della generazione (geo)termica di energia c'è il ciclo di Carnot



Purtroppo la produzione geotermica di energia ha bassa efficienza

- Ciclo aperto $\eta = 120 - 30 / 180 = 0.5$

Flusso alto : Alta potenza

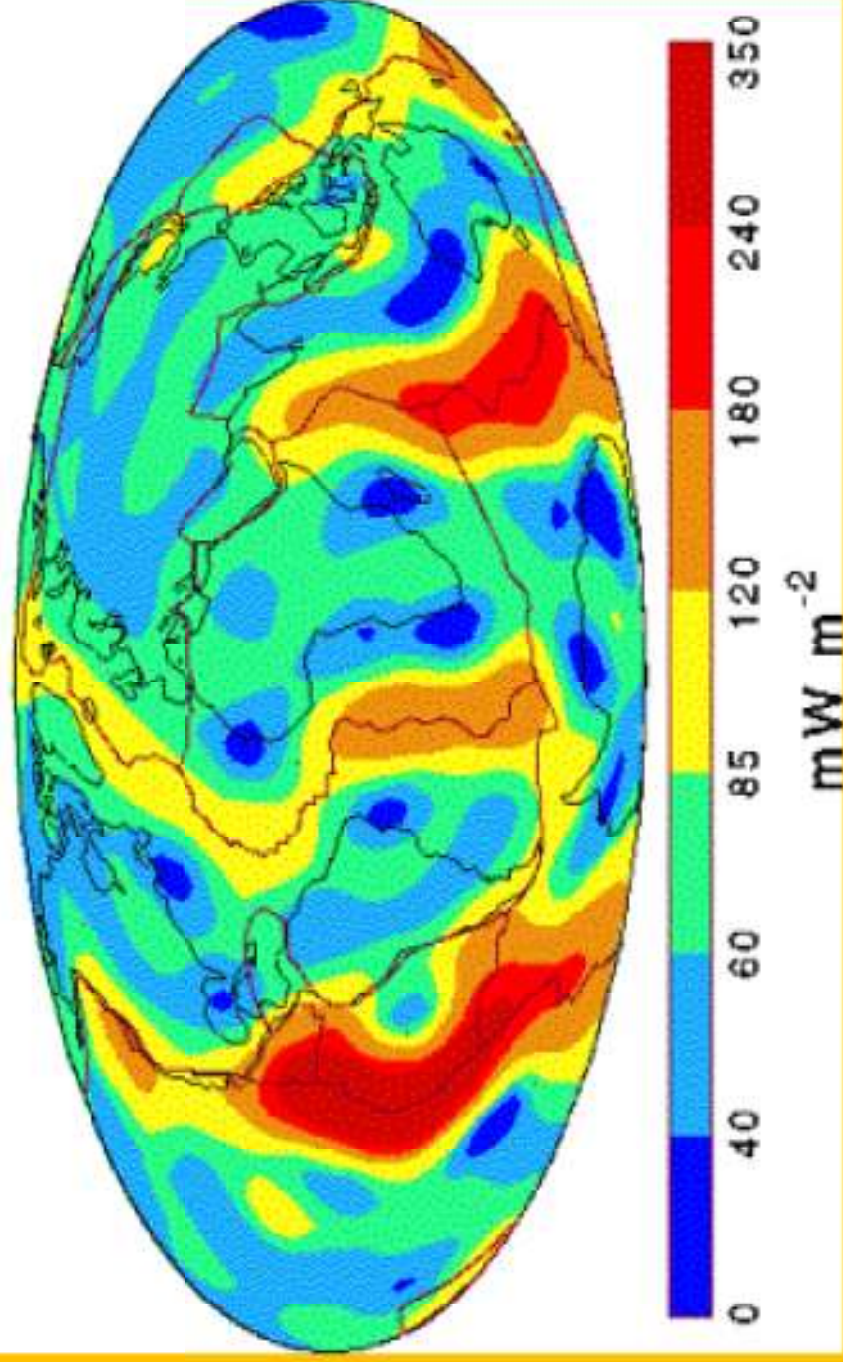
- Ciclo chiuso $\eta = 90 - 30 / 180 = 0.3$

Flusso molto basso : Potenza molto bassa

Solo il sistema a ciclo aperto appare sfruttabile, e solo dove il gradiente e' alto

Dove e' calda la crosta?
Molto sulle dorsali, ma tiepida e' ovunque

Heat Flow



e localmente... ecco le zone calde
d'Europa



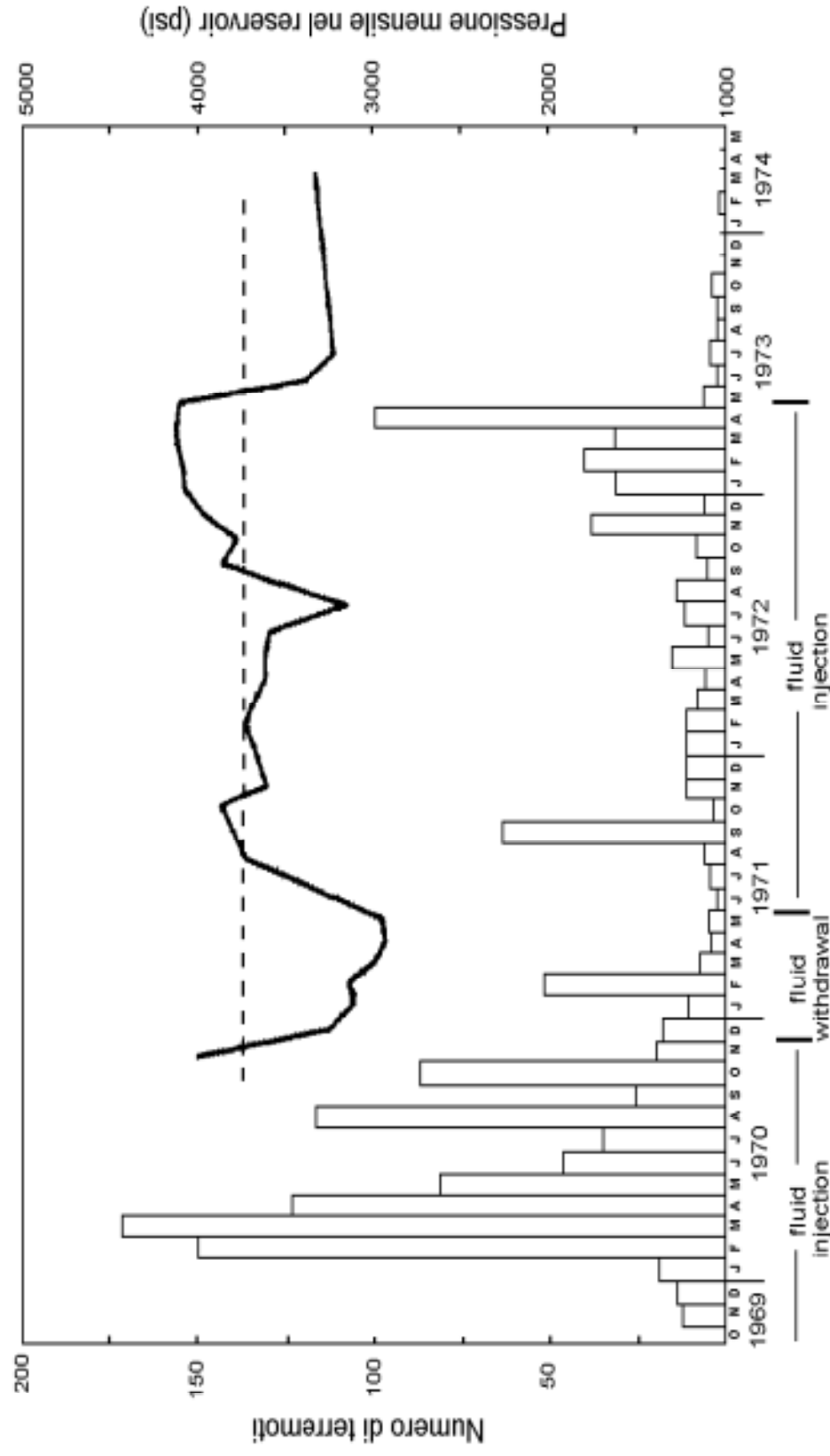
Luci ed ombre della produzione geotermica di energia

- Basso uso del territorio 1-8 ha/MW contro 5-10 ha/MW per il nucleare e 19 ha/MW del carbone
- Basso costo operativo: 40-100 €/MWh

ma anche

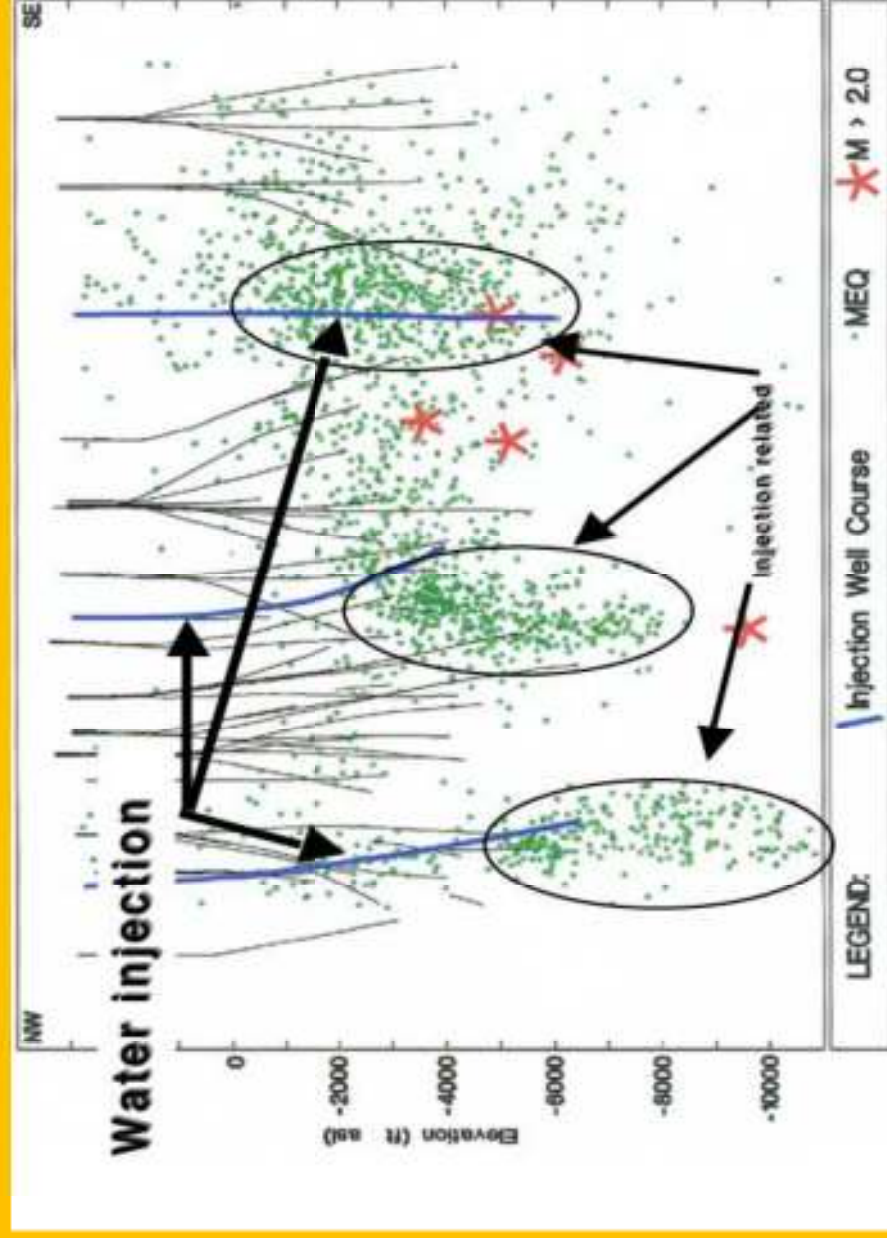
- Alti costi di perforazione: 2-5 M€/MW
- Inquinamento chimico: 90-120 kg di CO₂/MWh
- Perturbazione dell'acquifero
- E soprattutto, in zone sismiche: instabilità tettoniche indotte dall'iniezione d'acqua

Iniezione d'acqua e terremoti: un effetto poco desiderato



Sismicità e pressione idraulica nel campo petrolifero di Rangely (Colorado) [Raleigh et al., 1976].

L'iniezione (e l'estrazione) di fluidi nel suolo induce terremoti



Ciò avviene per l'aumento della
pressione idrostatica anche sotto i bacini
artificiali

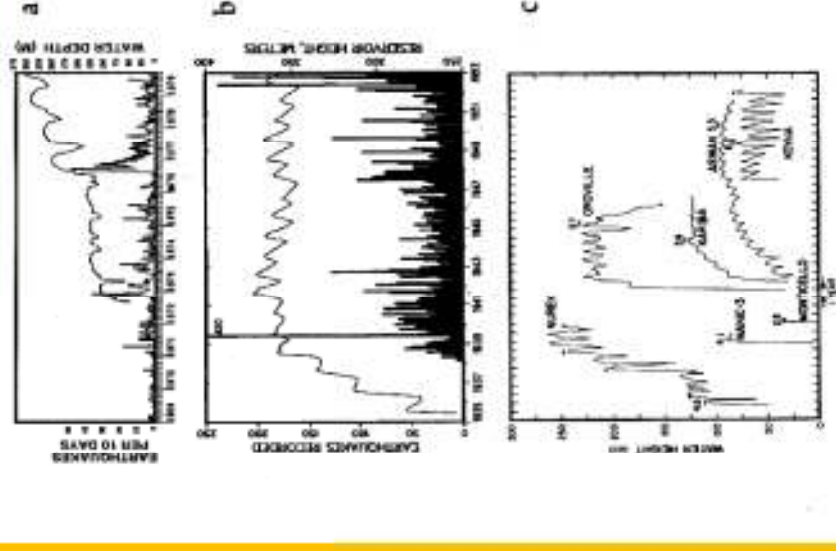
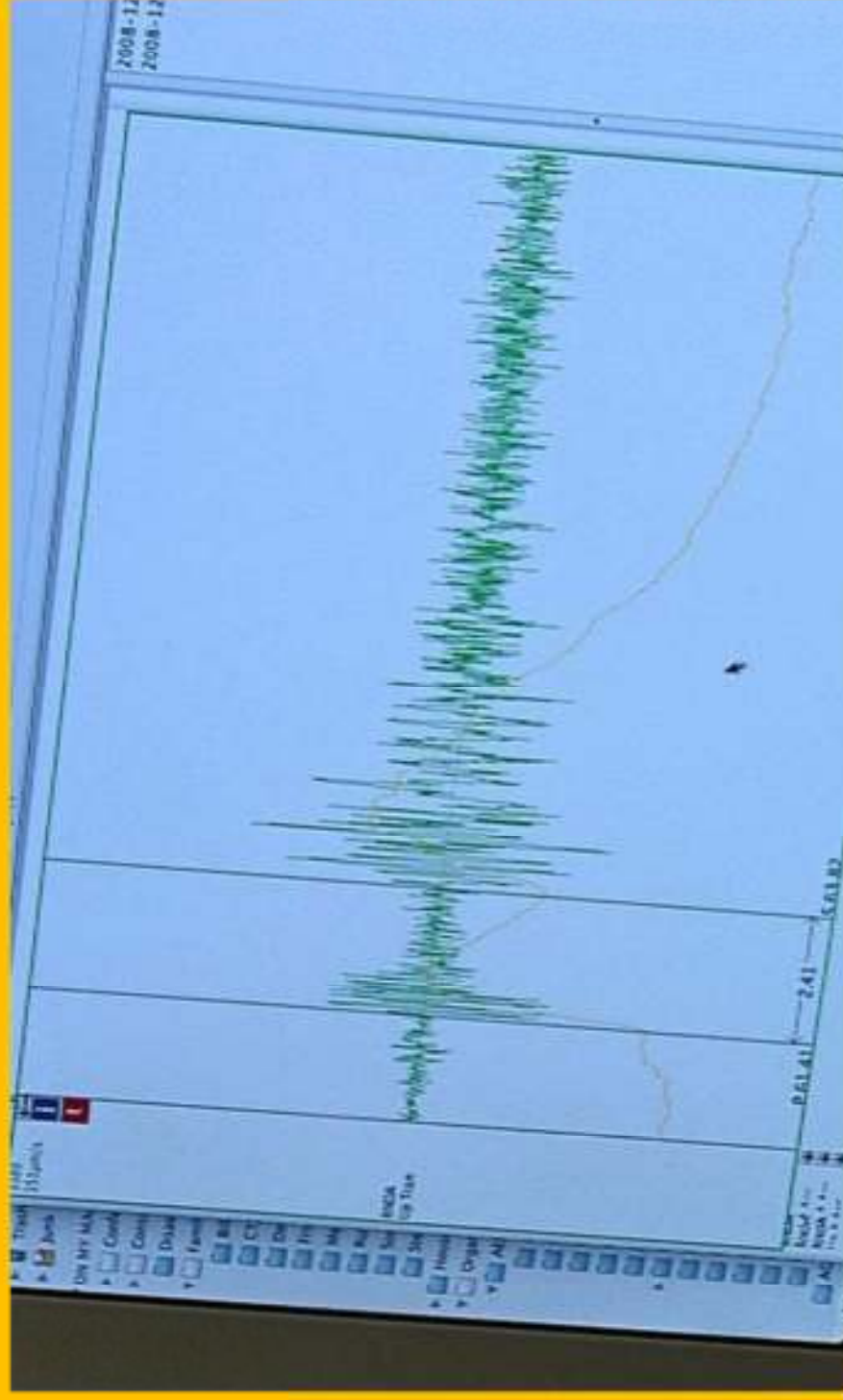


Fig. 3. Water level and seismicity rates at (a) the North reservoir from Engman and Agnew (1981), and (b) Lake Mead, from Aravigh (1985). (M) 1.5 magnitude within 10 km of the reservoir as plotted for Nevada. The rate of earthquake clusters in both cases during impoundment. (c) The association between reservoir impoundment and subsequent earthquakes for seven reservoirs, from Zeng and Zeng (1986). The vertical scale is water depth at the dam. Numbers above the water level curves give the magnitude of the largest recorded earthquake. Bars indicate times of reservoir floods at each site.

In generale produce microeventi avvertiti
solo dagli strumenti

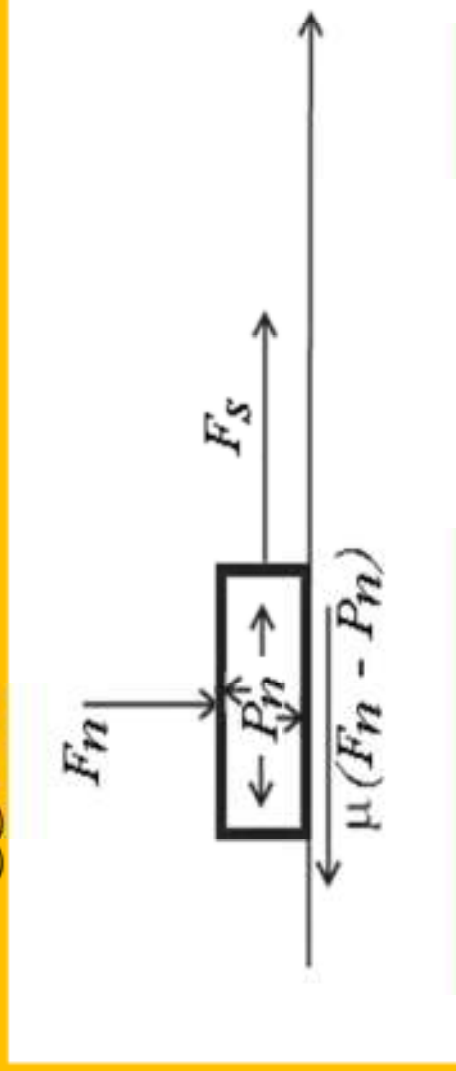


Ma in alcuni casi ha prodotto terremoti
distruttivi



La Fisica di base della sismicità
indotta è semplice:

la legge di Coulomb-Amonton



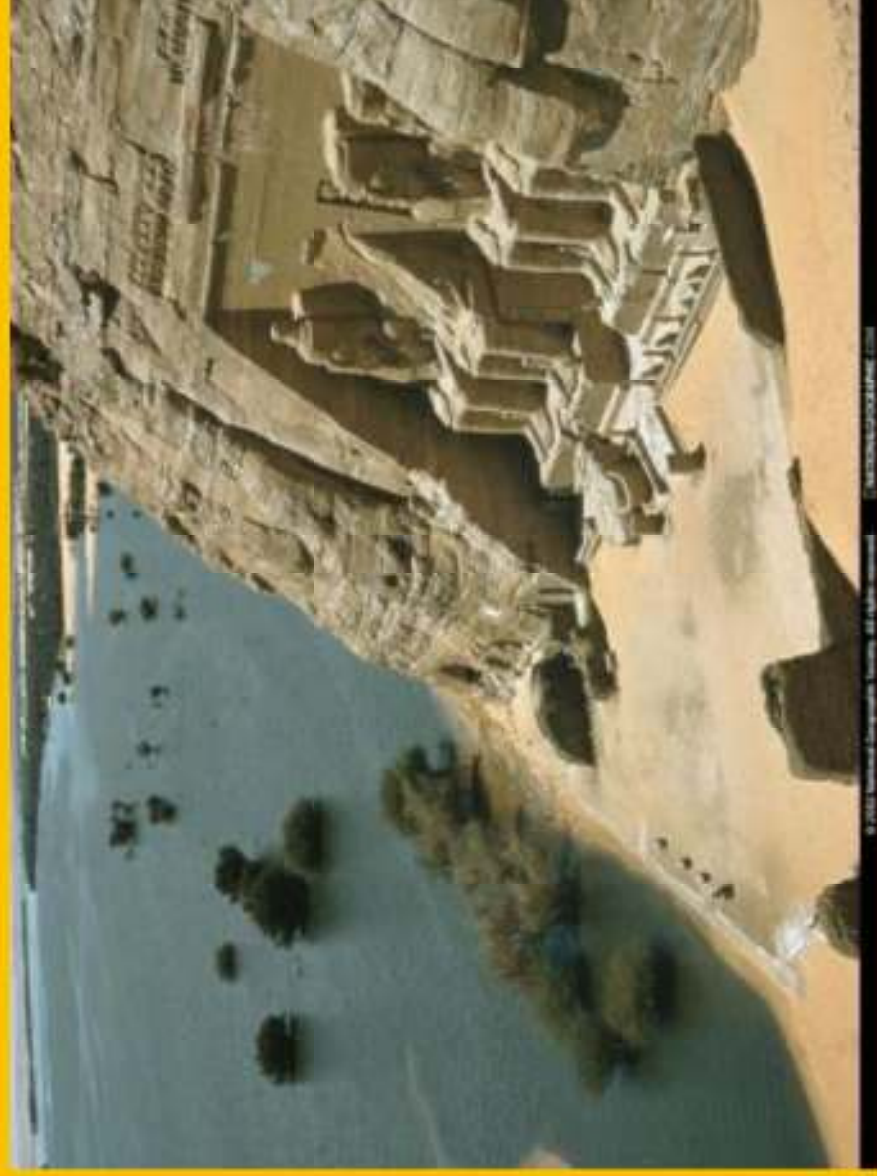
$$F_e = F_s - \mu(F_n - P_n)$$

$$F_e \geq F_R \rightarrow \text{TERREMOTO}$$

Ci sono due tipi di sismicità indotta

- I terremoti di bassa energia (magnitudo) che vengono sempre indotti localmente da variazioni di carico: *preoccupano poco*
- I terremoti di alta energia *che accadrebbero comunque*, ma il cui accadimento viene “facilitato e anticipato”: *preoccupano molto*
- Quest’ultima viene più propriamente detta *Sismicità attivata*

Un caso famoso di sismicità attivata: il terremoto di Aswan, ML=5.7, 1981



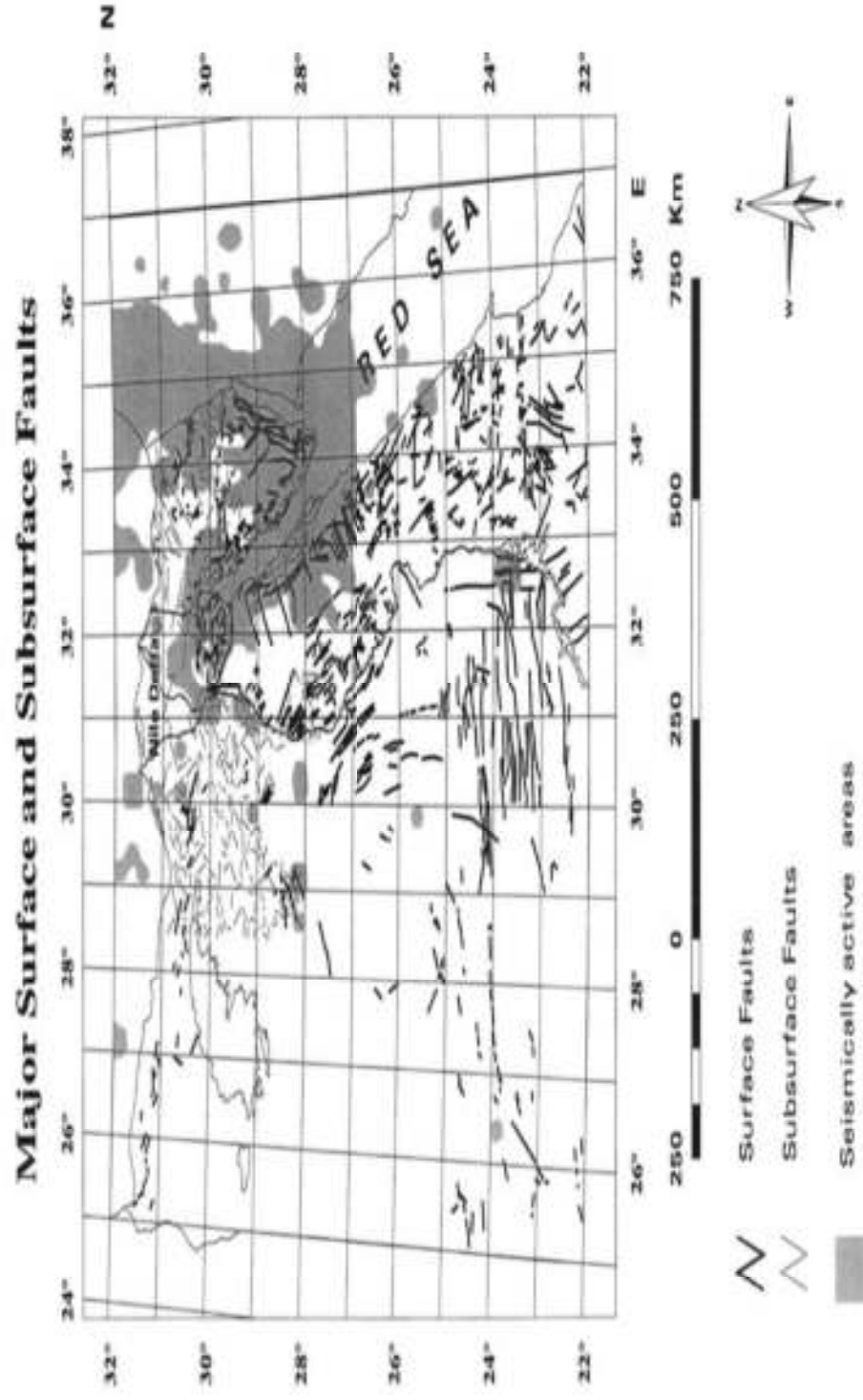
La diga di Aswan



Il lago Nasser



Il bacino e' stato creato in una zona ricca di faglie e sismicamente attiva



La mappa delle faglie e della sismicita' d'Egitto
(da El-Araby e Sultan, SRL, 2000)

La zona del lago Nasser era stata ben studiata e ben strumentata

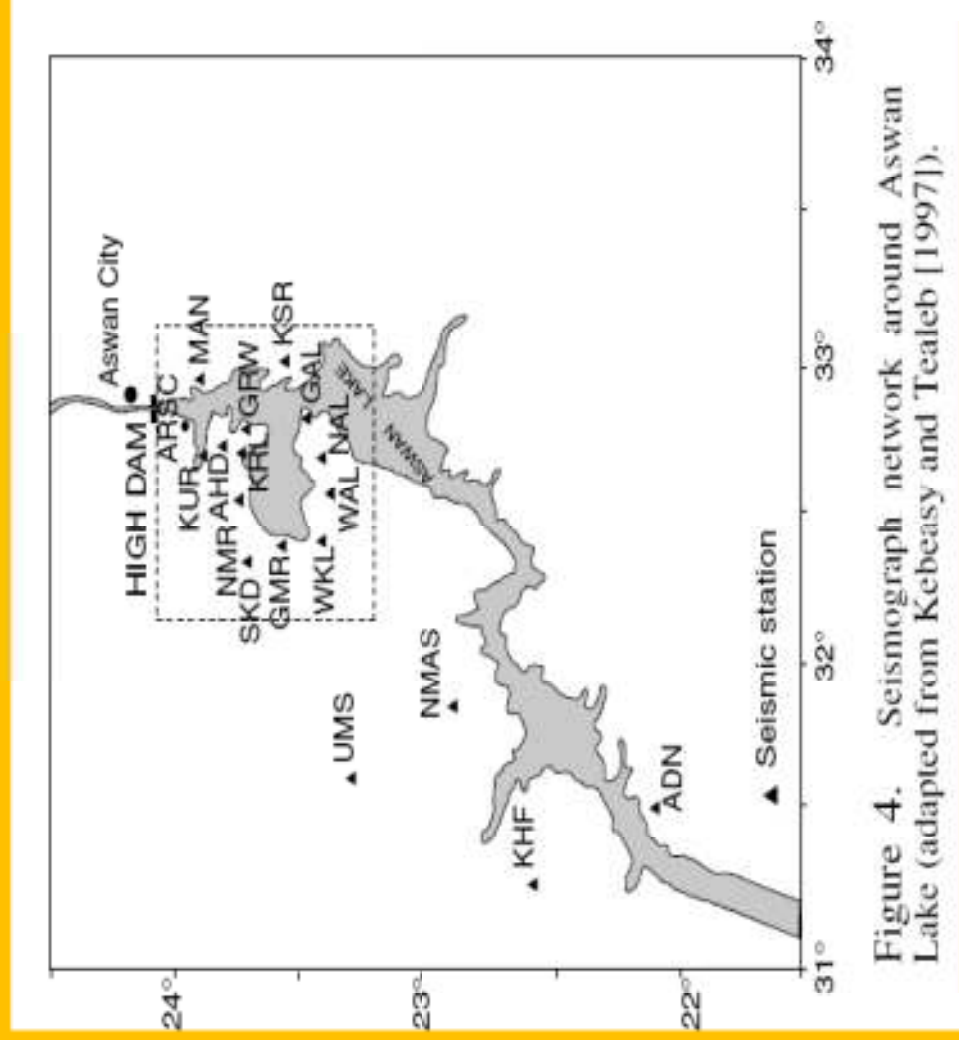


Figure 4. Seismograph network around Aswan Lake (adapted from Kebeasy and Tealeb [1997]).

La rete sismica locale

Dopo poco che l'invaso va a regime si attiva una forte sismicità

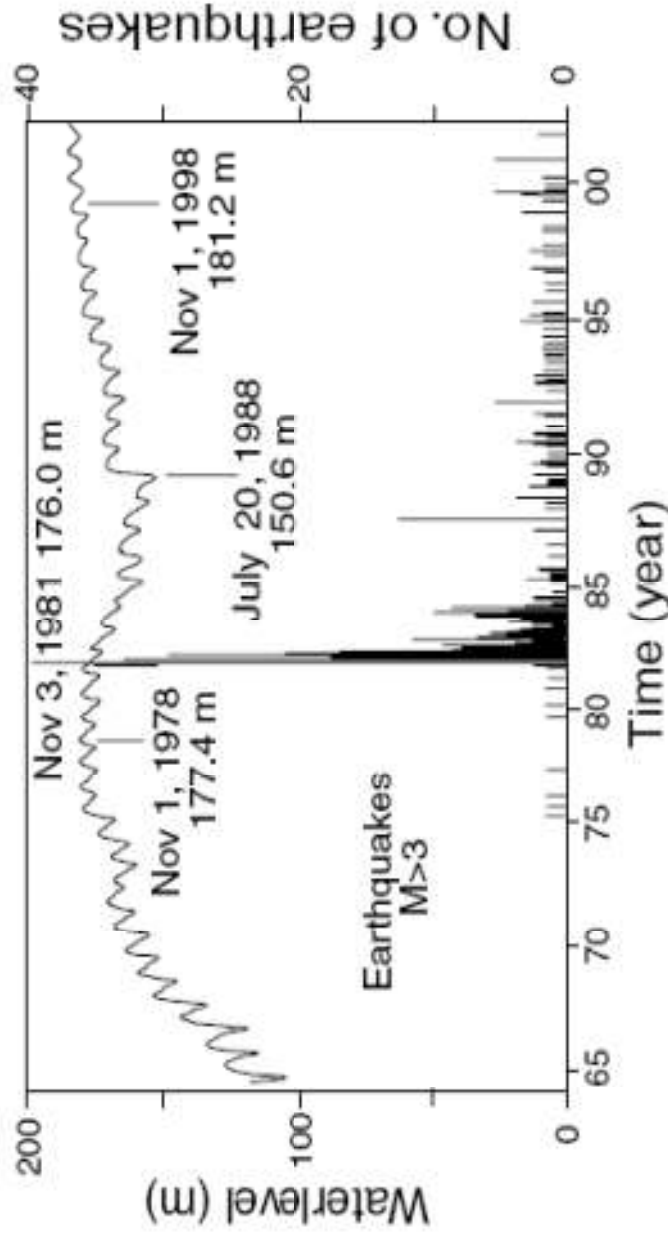


Figure 3. Water level (in meters) relative to sea level and seismicity ($M \geq 3$) on Aswan Lake (1965–2002). The 110-m level corresponds to the lake floor.

La sismicità è inizialmente superficiale, poi anche profonda. Non è concentrata vicino all'invaso. L'evento principale, $M=5.7$, poco più piccolo del terremoto dell'Aquila, è a circa 15 km di profondità e 15 km dal lago

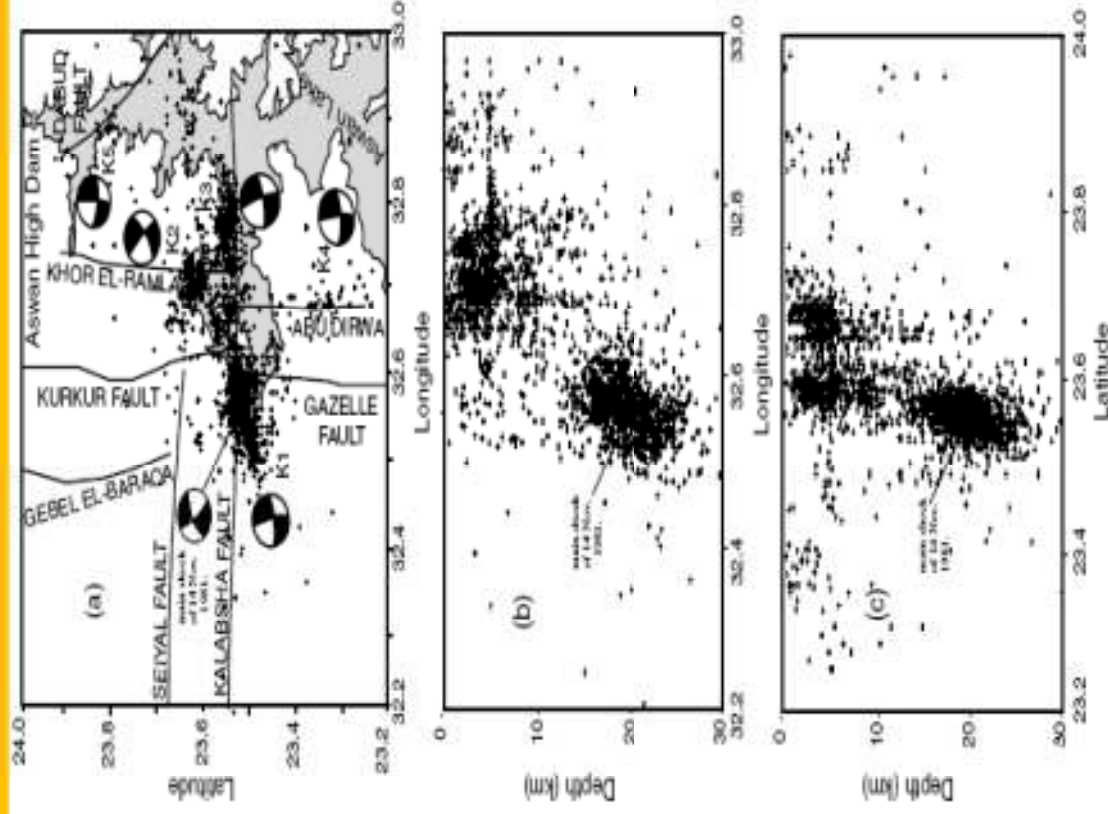


Figure 5. (a) The spatial distribution of earthquakes in the Aswan area, $M > 2.2$. The seismicity is concentrated in main cluster zones: Gebel Marawa (K1), Khor El-Ramla (K2), East Gebel Marawa (K3), Abu Dirwa (K4), and an old stream zone (K5). (b,c) Vertical cross sections for $M \geq 2.2$ events. The black arrow locates the hypocenters of the 14 November 1981 M 5.4 mainshock.

*La domanda e' quindi:
Ci sono zone calde in cui si può
iniettare acqua senza rischiare di
attivare terremoti?*

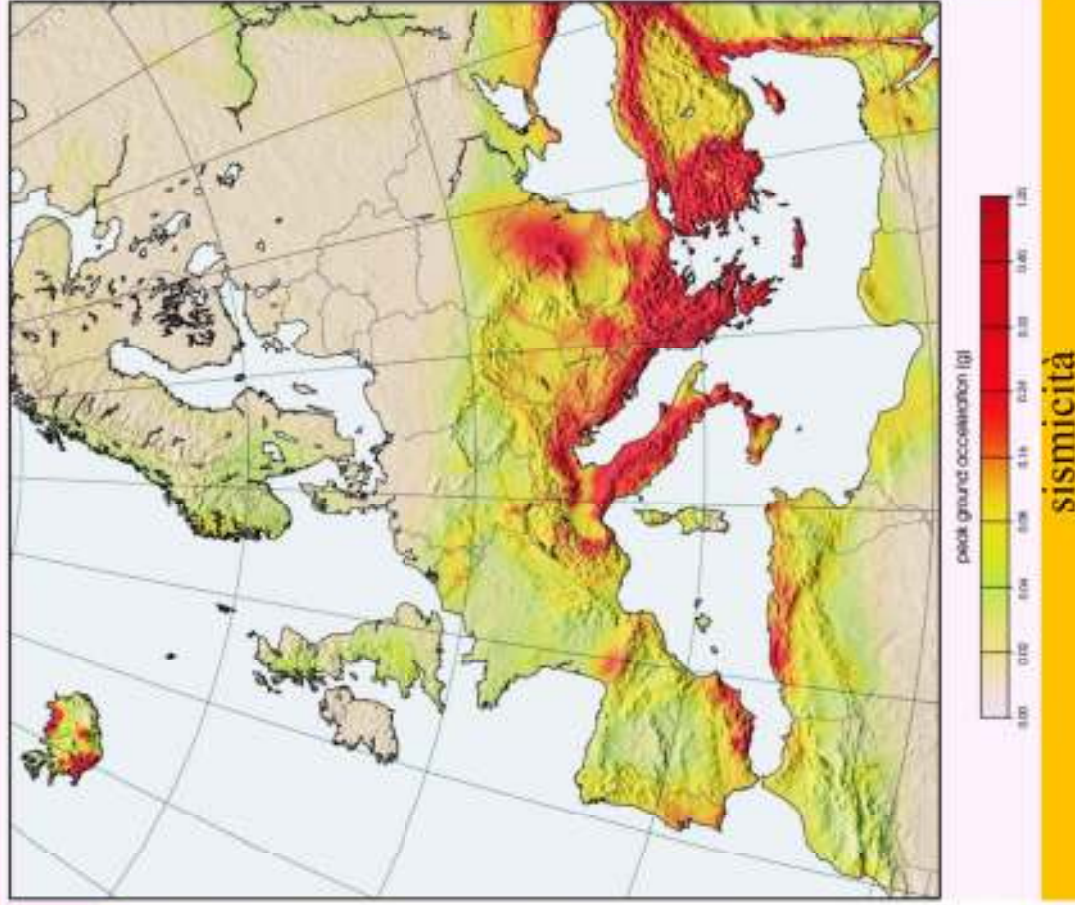
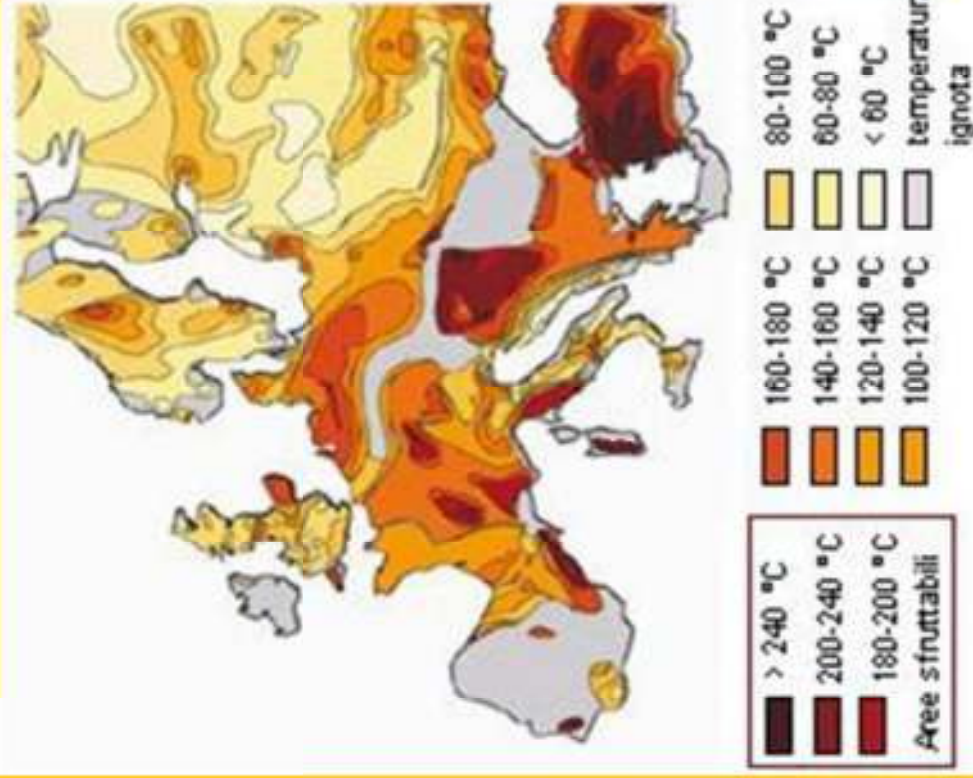
E

Servono

- 1) Gradiente superficiale termico elevato
(>60 °C/km)
- 2) Bassa sismicità
- 3) Acqua

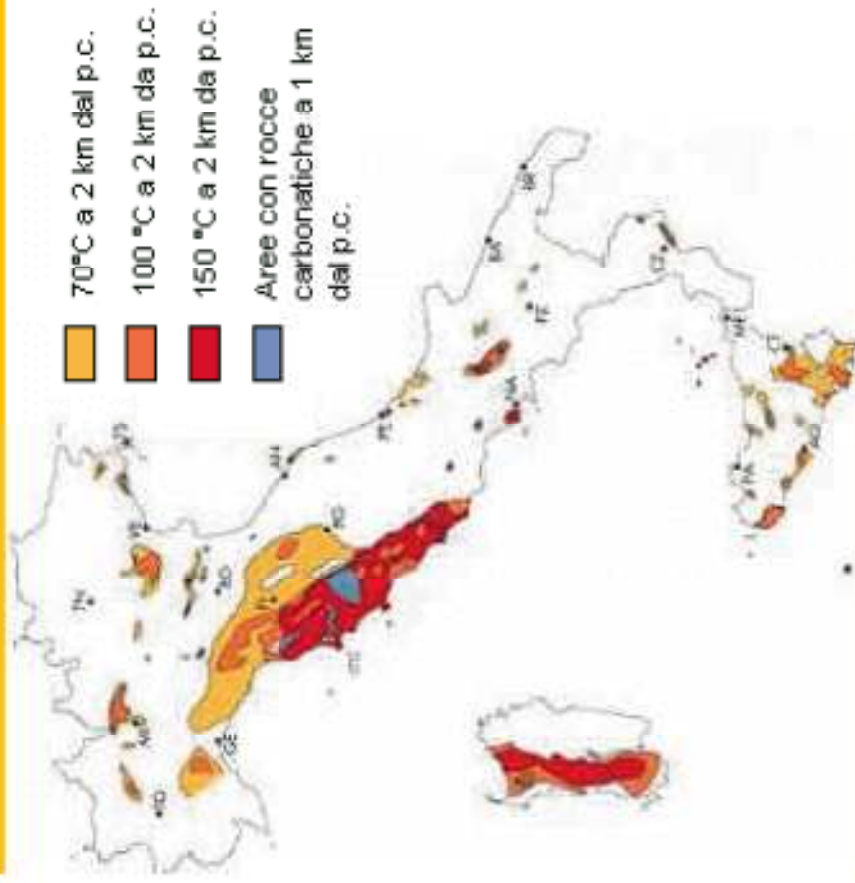
Situazione europea

temperature a 3000 m



Situazione italiana

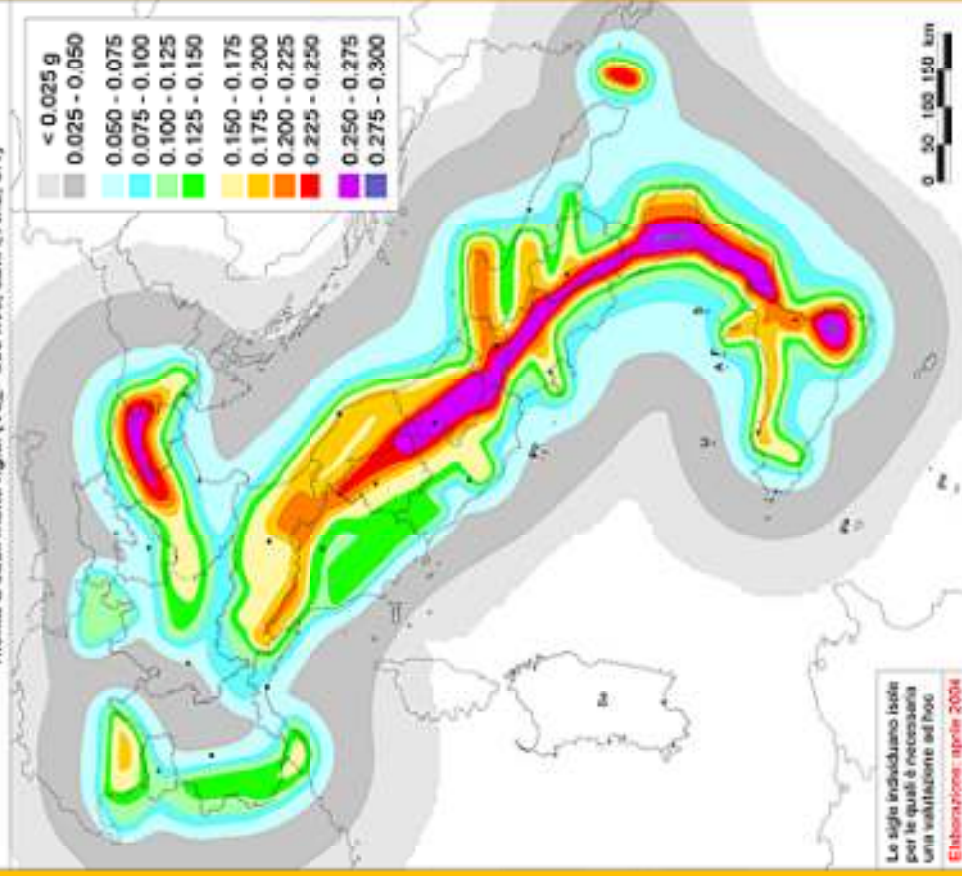
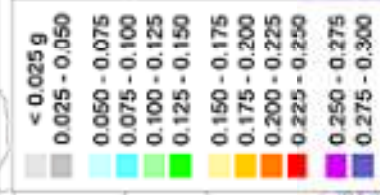
temperature



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale

(riferimento: Ordinanza PCM del 20 marzo 2003 n. 3274, All.1)
espressa in termini di accelerazione massima del suolo (amax)
con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni
riferita a suoli molto rigidi ($V_s > 600$ m/s, cat. A, All.2, 3.1)



Le sigle individuano isole per le quali è necessaria una valutazione ad hoc

Elaborazione: aprile 2004

Dove?

In Sardegna, che ha anche acqua in abbondanza, soprattutto nella piana del Campidano

