

Nel **processo magmatico** si ha la formazione di minerali per solidificazione di **magmi**, cioè di masse fuse (ad alte T e P), costituite essenzialmente da silice, ossidi metallici, gas e vapori.

Il processo magmatico può essere suddiviso in 5 fasi

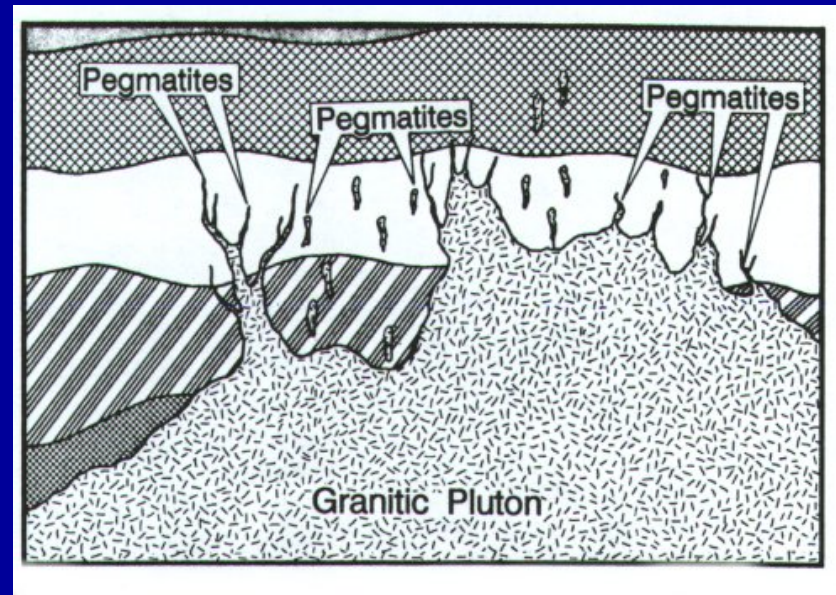
1. Fase ortomagmatica (>650–700 ° C)
2. Fase pegmatitica (<700–650 ° C)
3. Fase pneumatolitica (550–370 ° C)
4. Fase idrotermale (<370 ° C)
5. Fase esalativa

**Fase ortomagmatica (>650-700 ° C):** Cristallizzazione della maggior parte del magma. I componenti volatili (vapore acqueo, fluoro, boro e cloro) si concentrano nelle porzioni ancora fuse aumentando la pressione e mantenendo la fluidità a temperature più basse. Tra i minerali essenziali cristallizzano per primi quelli femici (olivina, pirosseni, anfiboli, biotite) e plagioclasti (da calcici a sodici).



**Fase 1**

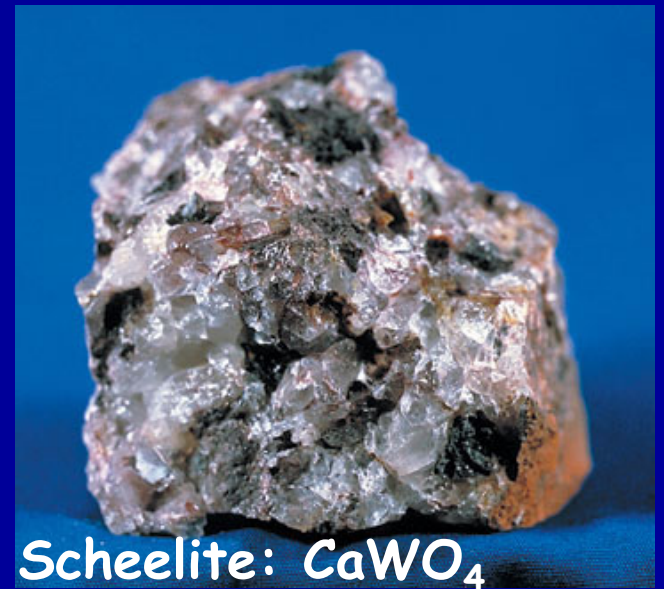
**Fase pegmatitica (<math>700-650\text{ }^{\circ}\text{C}</math>):** In questa seconda fase cristallizza il residuo magmatico ancora fuso, ricco di sostanze volatili ed elementi chimici non allocati nei reticoli cristallini dei minerali consolidati nella fase precedente. Tra i più comuni componenti delle pegmatiti: feldspati alcalini (ortoclasio, microclino, amazzonite, albite), quarzo e miche (muscovite, flogopite, biotite).



**Fase 2**

Le favorevoli caratteristiche di fluidità e l'elevata pressione facilitano la penetrazione del residuo fuso nelle fratture della roccia solidificata, dando origine a filoni caratterizzati da cristalli ben sviluppati di silicati e altri minerali, tra cui alcuni anche preziosi (berillo, corindone, zircone, topazio).

Fase pneumatolitica (550-370 ° C):  
Fase quasi ultimata di  
cristallizzazione del magma.  
Rimangono piccole quantità di  
sostanze residue e una grande  
quantità di vapori e gas che  
tendono a liberarsi dal magma  
stesso. I vari componenti gassosi  
reagiscono chimicamente tra loro  
e, se sono presenti calcari, danno  
origine a un metamorfismo di  
contatto. Tra i minerali più  
comuni della fase pneumatolitica:  
topazio, tormalina, apatite,  
arsenopirite, pirite, calcite,  
quarzo e oro.



Scheelite:  $\text{CaWO}_4$



$(\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18})$

Fase 3

**Fase idrotermale (<370 ° C):** L'ultima fase del processo magmatico. **Condensazione del vapore acqueo** – che in questa fase è uno dei componenti volatili più abbondanti – con la formazione di soluzioni acquose che iniziano a circolare nelle fratture della roccia. Tali soluzioni depositano i sali disciolti dando origine alla maggior parte dei **filoni metalliferi**. A seconda della temperatura alla quale avviene la cristallizzazione si parla di genesi ad alta, media e bassa termalità. Alta termalità: giacimenti auriferi, argentiferi e uraniferi, di pirite e calcopirite; Media termalità: giacimenti di solfuri misti di Cu, Pb, Zn, Au, Ag. Bassa termalità: antimonite, cinabro, realgar, orpimento.



**Fase 4**

**Fase esalativa: minerali di esalazione** che, solo raramente, formano giacimenti di una certa importanza economica. Sono minerali che prendono origine da gas e vapori che si liberano dal magma sottostante un vulcano. Tali gas possono reagire tra di loro, con l'aria, con le rocce incassanti oppure con le sostanze disciolte nelle acque superficiali e generare cristalli per sublimazione. Tra i minerali che hanno questa genesi: zolfo, orpimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), realgar ( $\text{As}_4\text{S}_4$ ), ematite, borace, sassolite/acido borico, atacamite ( $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ), cinabro. Famosi a questo riguardo sono la solfatara di Pozzuoli, le fumarole del Vesuvio e di Vulcano, i soffioni di Larderello.



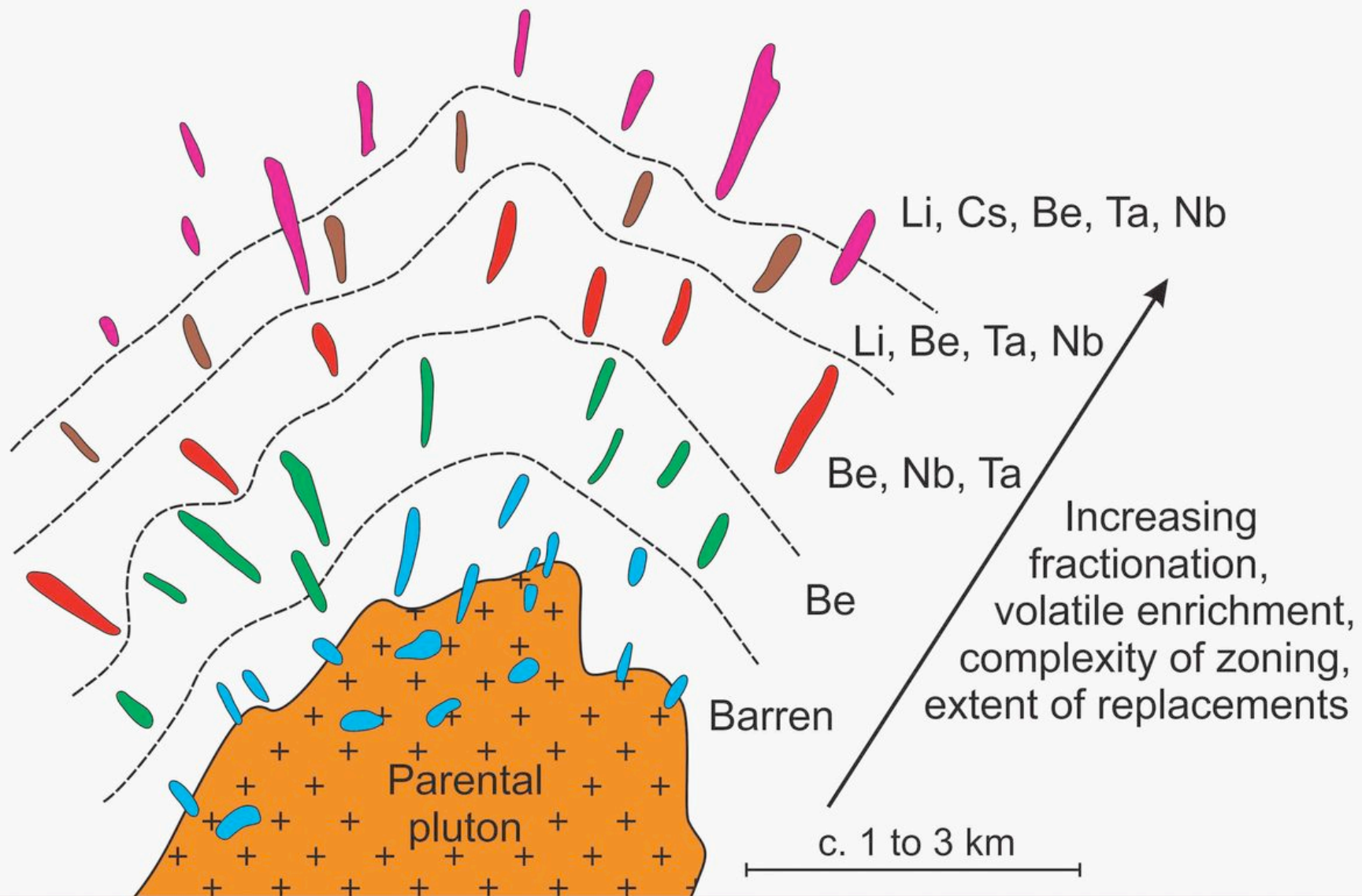
**Fase 5**











Georg Pauer (Agricola), 1556:

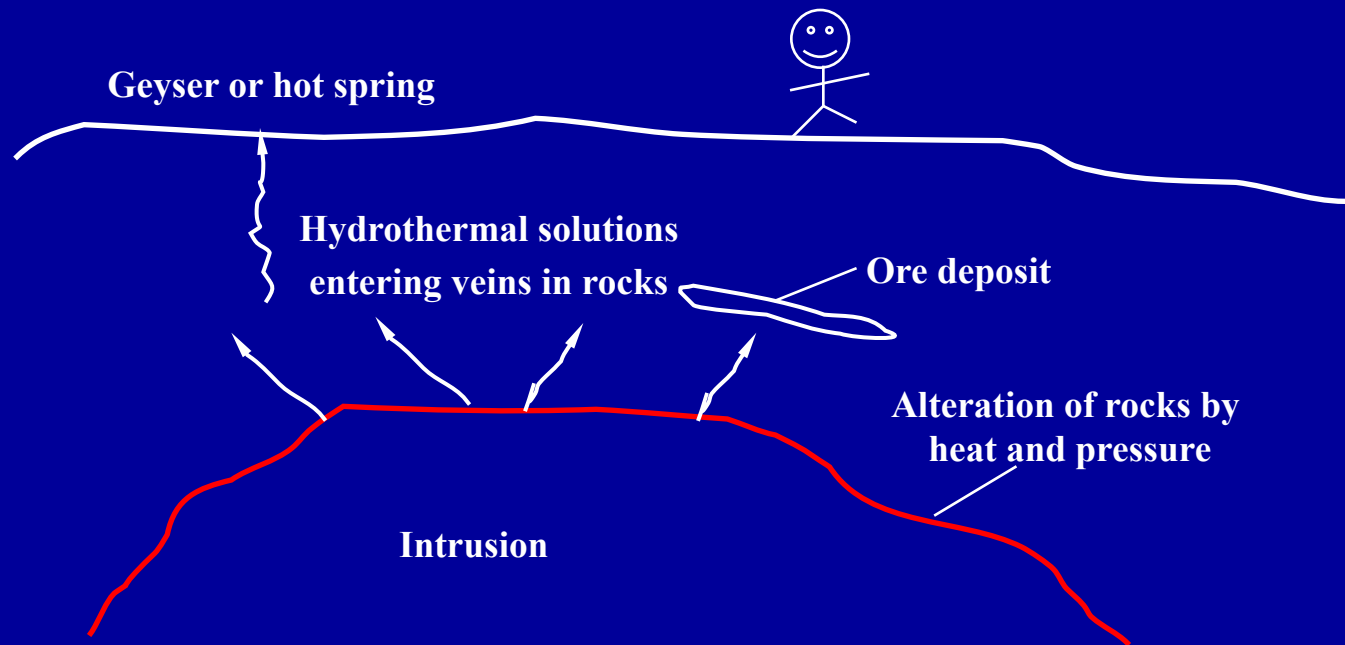
# Non reagent nisi soluti

E' la presenza dei fluidi ad innescare molti dei processi geologici, determinando una serie di processi "geochimici" complessi che vanno sotto il nome di interazioni acqua/roccia o fluido/roccia

# Hydrothermal Ore Deposits

La solidificazione del magma comporta la liberazione di fluidi che possono andare a costituire una soluzione idrotermale (*Stadio pneumatolitico-idrotermale*)

Da tali soluzioni possono precipitare minerali in crack e/o vene presenti nelle rocce.



# Cos'è un deposito minerario?

Sistema caratterizzato dalla presenza di minerali o metalli in concentrazioni sufficientemente elevate da rendere proficua la loro estrazione usando la tecnologia disponibile in base alla situazione economica del momento.

- i) Ipotermali:  $> 300^{\circ} \text{C}$
- ii) Mesotermali:  $200 - 300^{\circ} \text{C}$
- iii) Epitermali:  $100 - 200^{\circ} \text{C}$
- iv) Teletermali:  $50 - 100^{\circ} \text{C}$

# Energia geotermica e Geotermia

- L'energia geotermica è quella parte di calore stoccato all'interno del pianeta e disponibile per l'utilizzo da parte dell'uomo. Questo significa che ci si riferisce a quell'energia (calore) presente nei livelli più superficiali della Terra.
- Sebbene possiamo considerare il calore terrestre teoricamente finito, l'enorme quantità a disposizione fa sì che lo possiamo considerare infinito e definire l'energia geotermica come una risorsa rinnovabile.
- La geotermia è la scienza che si occupa degli studi relativi al regime termico del pianeta così come agli aspetti ingegneristici per l'utilizzo del calore.

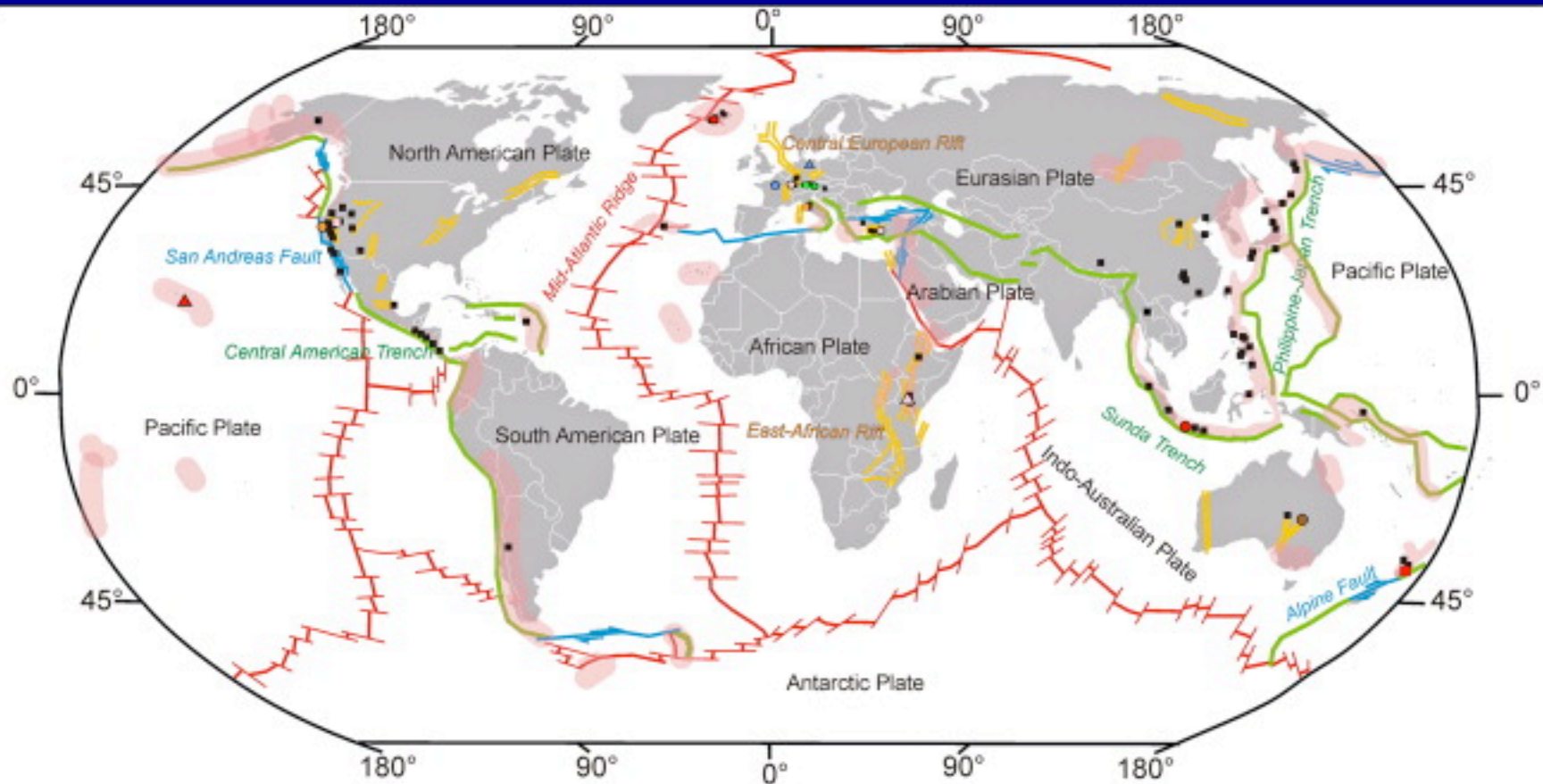


Plate boundary types

- +— Divergent type: Mid-oceanic ridges transected by transform faults
- Convergent type: Subduction zone
- |— Transform type: Strike-slip zone

- Major zones of active volcanism
- ⚡ Intracontinental rifts
- Installed geothermal fields (pilots + commercial)

Examples of geothermal play types with current production

- CV1 - Magmatic - Volcanic field type:** ■ Taupo (New Zealand), ● Kamojang (Indonesia), ⬢ Reykjanes (Iceland), ▲ Puna (Hawaii/USA)
- CV1 - Magmatic - Plutonic type:** ■ Larderello (Italy), ● The Geysers (USA)
- CV3 - Extensional domain type:**  Bradys (Nevada/USA),  Kizildere (Turkey),   Soulz-sous-Forets (France), ▲ Olkaria (Kenya)
- CD1 - Intracratonic basin type:** ▲ Neustadt-Glewe [heat] (Germany), ● Paris Basin [heat] (France)
- CD2 - Orogenic belt/foreland basin type:** ■ Unterhaching (Germany), ● Altheim (Austria)
- CD3 - Basement (hot dry rock) type:** ● Habanero (Australia)





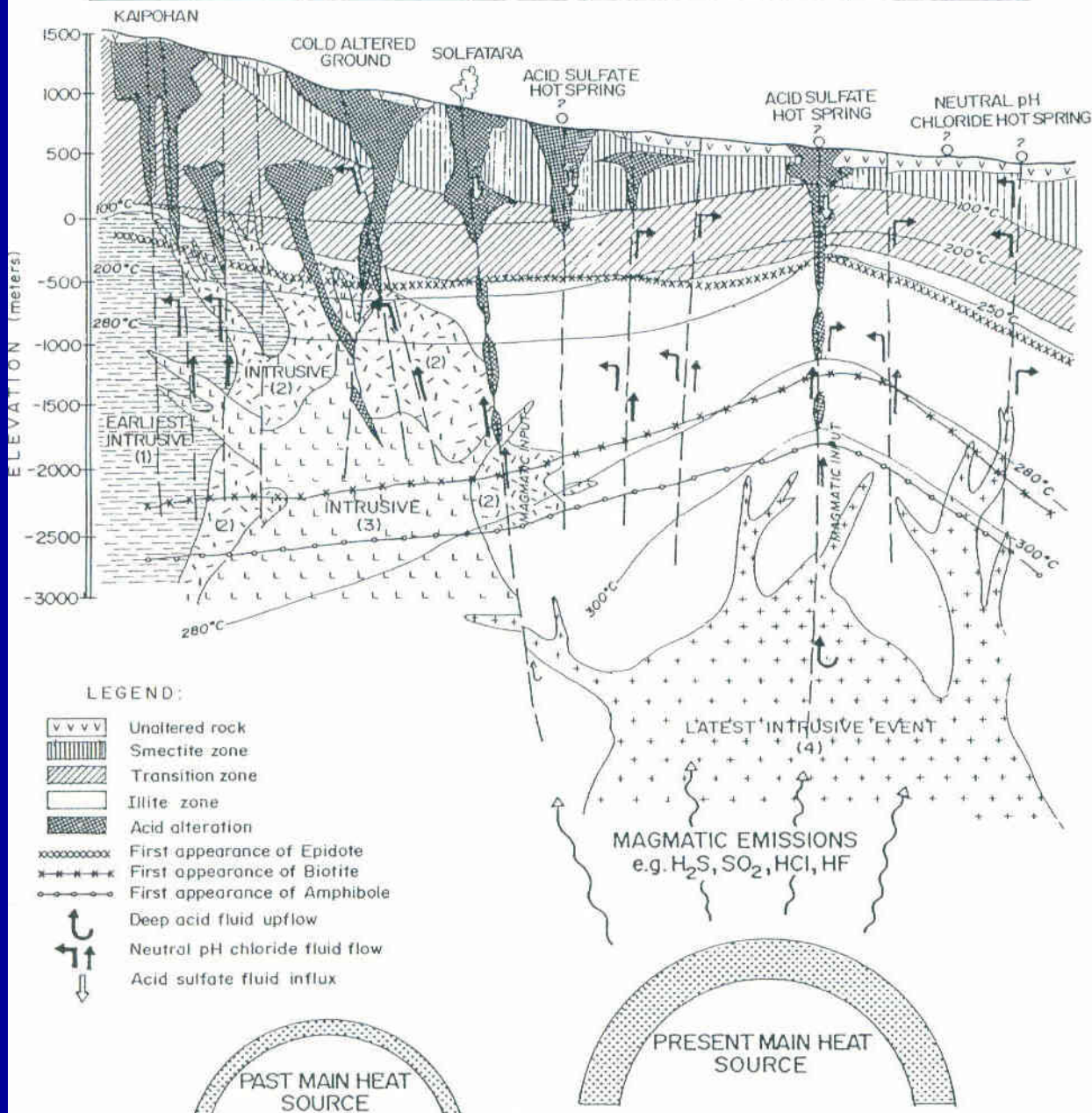
SURFACE  
ITERATION  
EMBLAGE

1

2

3

4



LATE PLEISTOCENE TO RECENT

YOUNGEST  
LAVA FLOWS  
AND  
VOLCANICLASTICS

LATE PLEISTOCENE TO PLEISTOCENE

TERRESTRIALLY  
LAID VOLCANICS  
  
HYALOCLASTITE

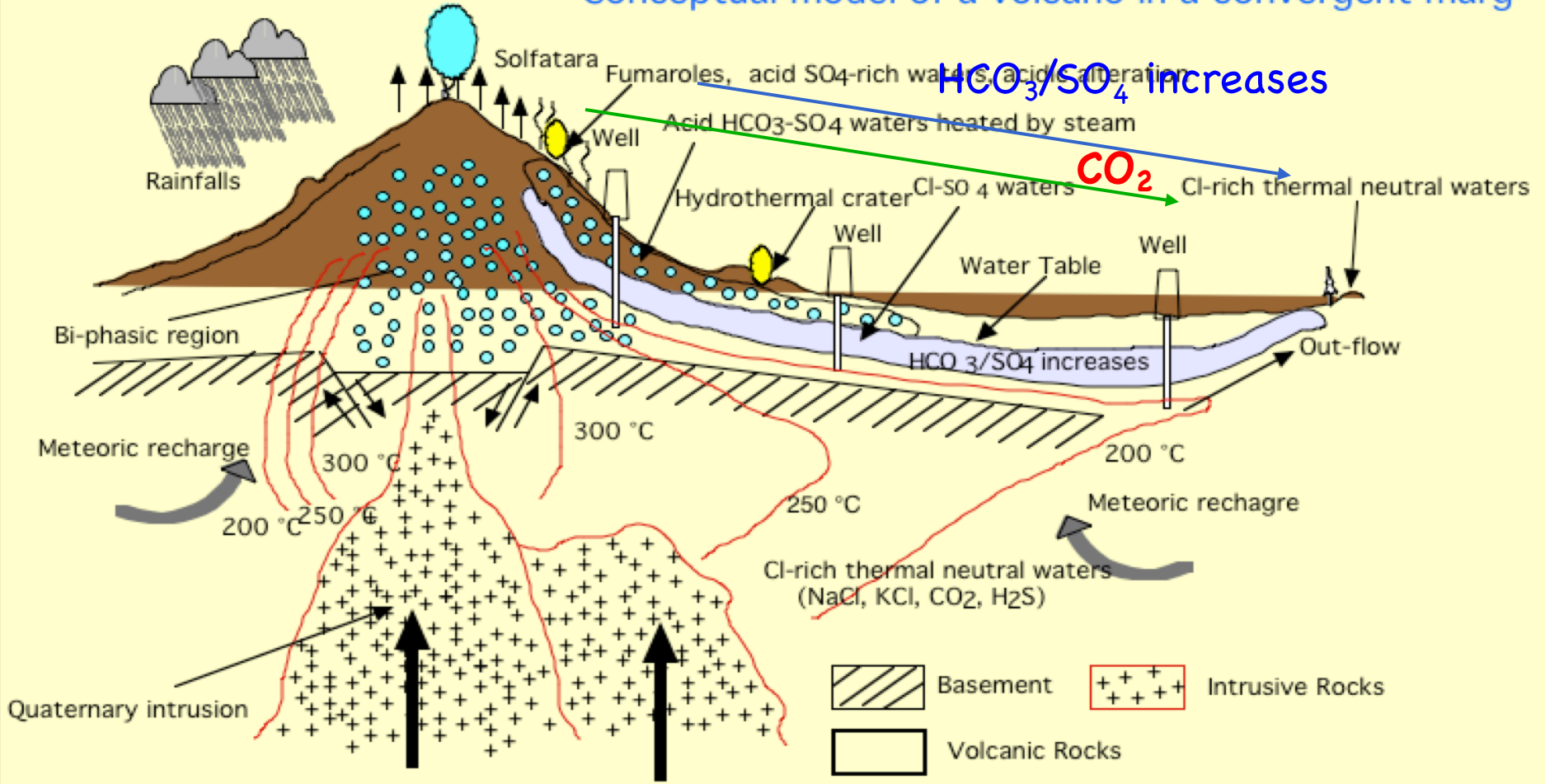
LATE MIOCENE TO LATE PLEISTOCENE

LIMESTONE,  
SILTSTONE,  
SANDSTONE,  
SEDIMENTARY  
BRECCIAS

INTRUSIVE EVENTS  
RANGE FROM LATE  
MIOCENE TO  
PLEISTOCENE

INTRUSIVES

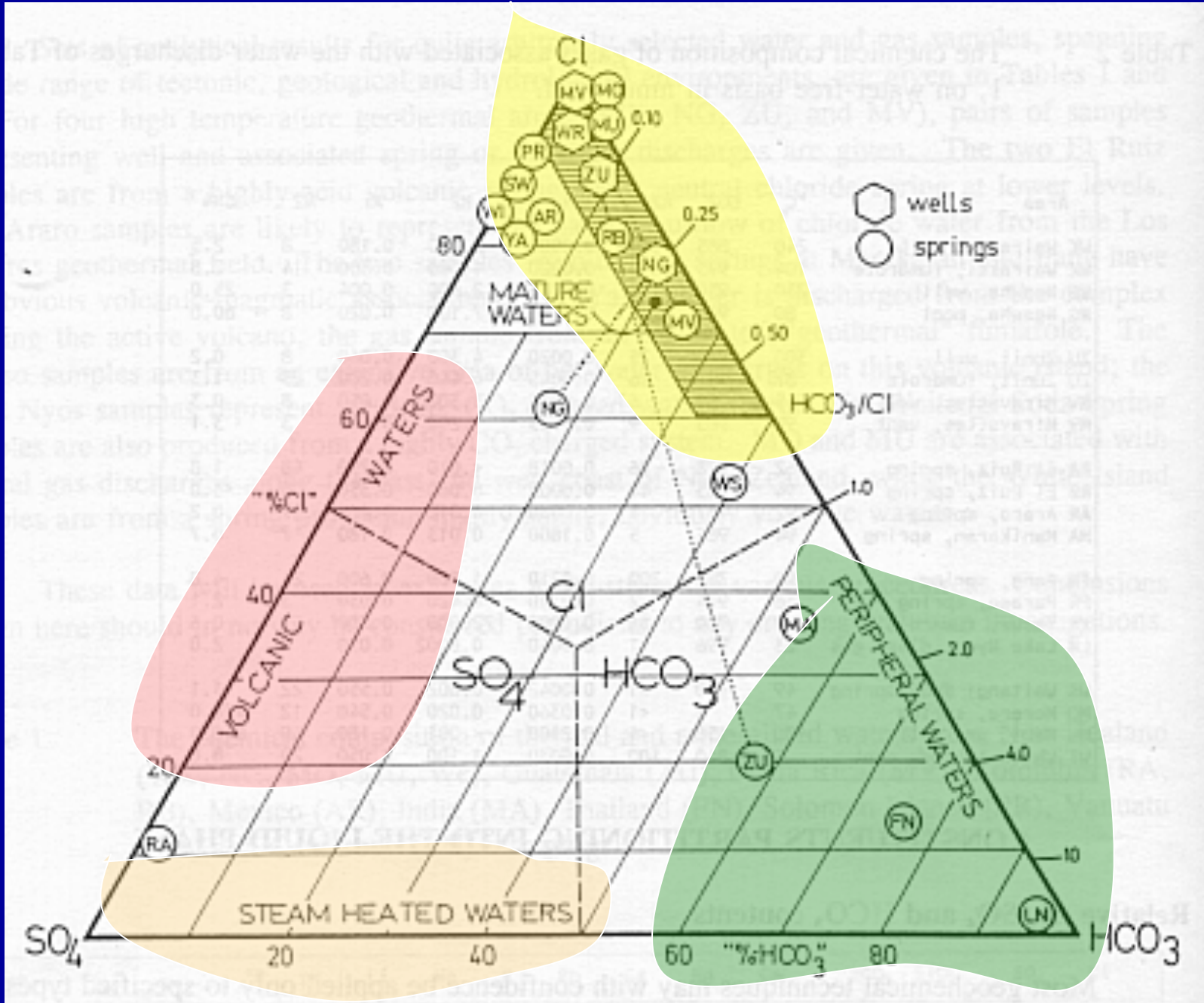
# Conceptual model of a volcano in a convergent margin



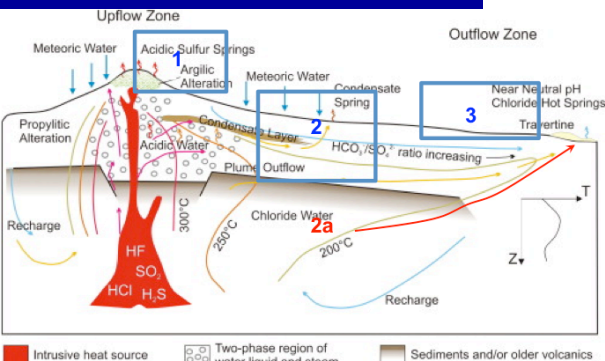
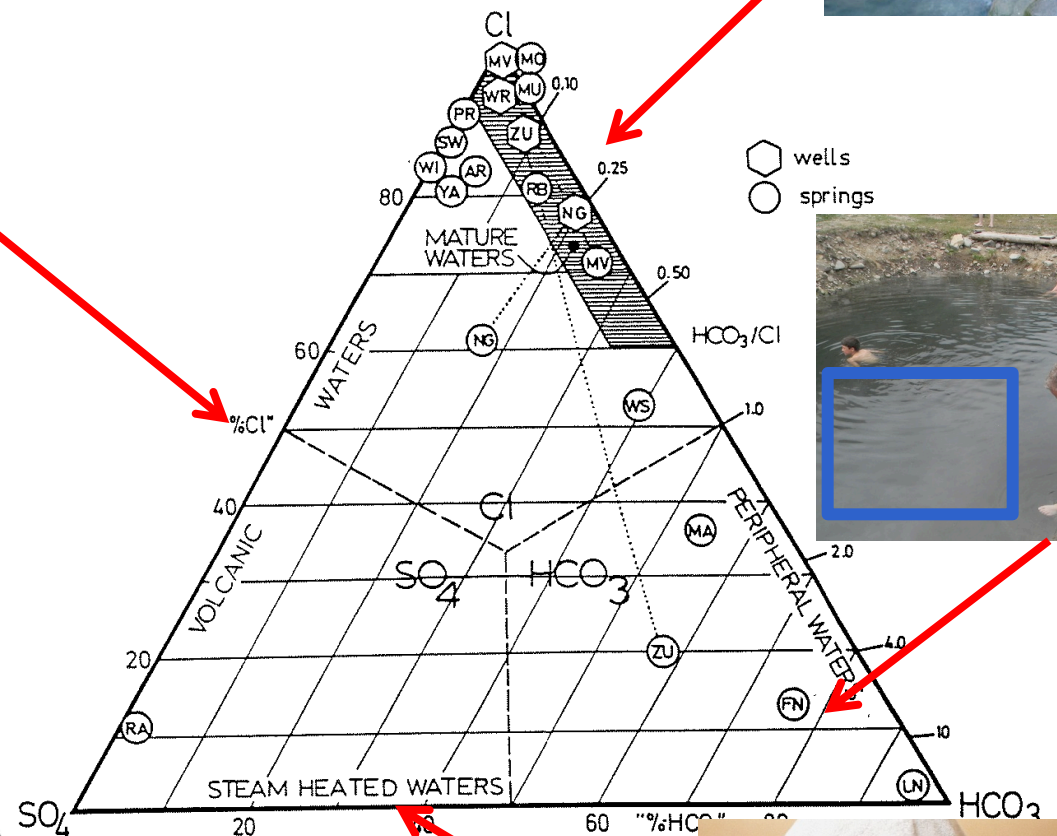
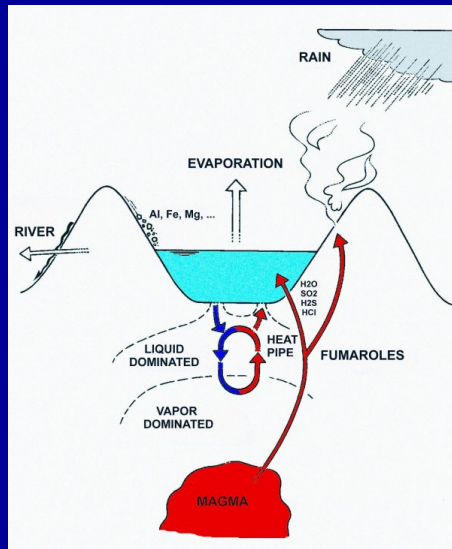
HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> increases

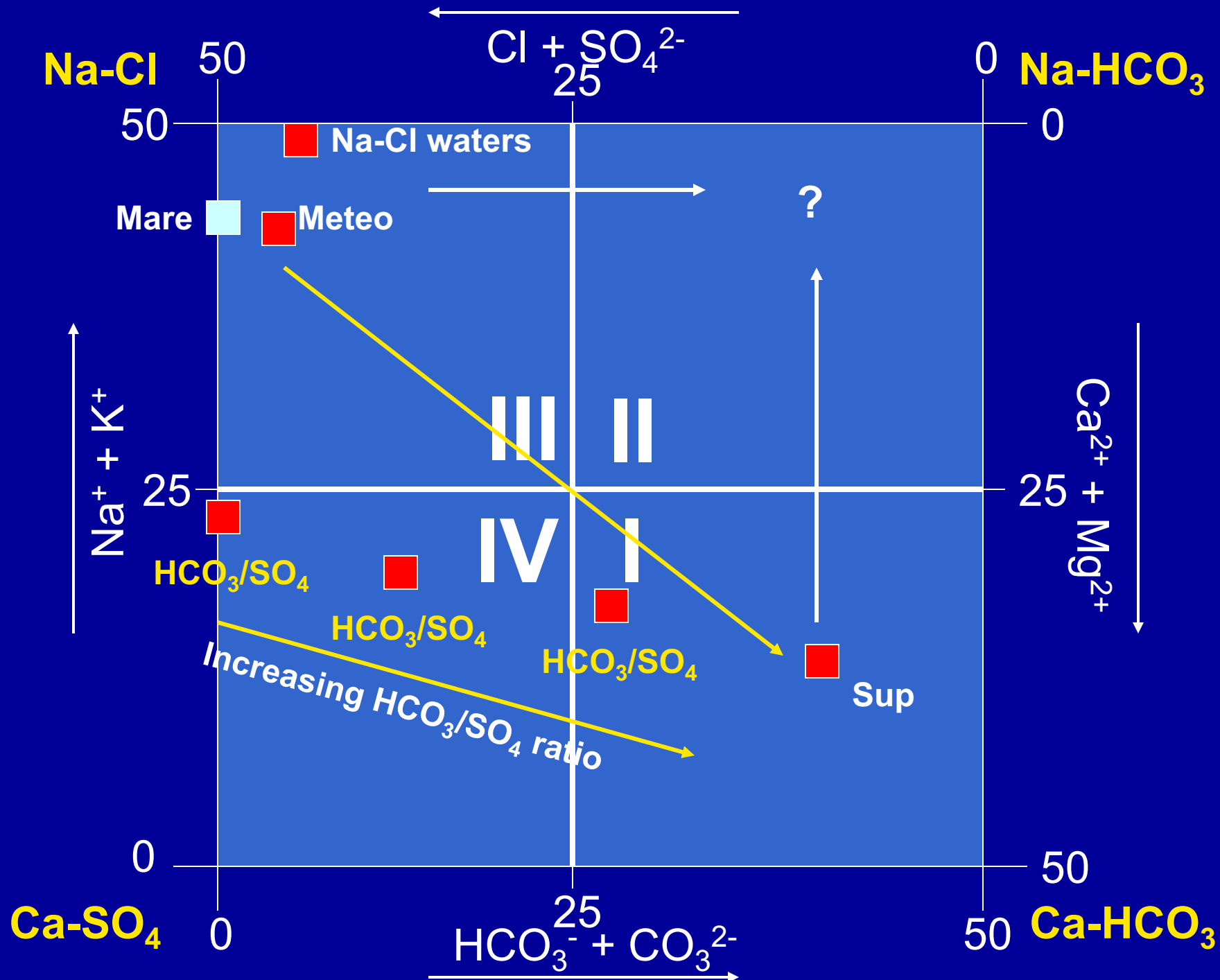
CO<sub>2</sub>

Processi di scrubbing: rimozione di gas acidi per la loro dissoluzione nelle acque superficiali in ebollizione.



The waters at depth are initially acidic and turn to be neutral Na-Cl waters due to WRI processes and removal of magmatic sulfur species by transformation to sulfate/sulfide.

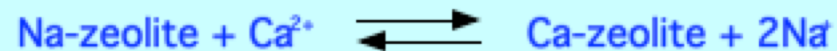


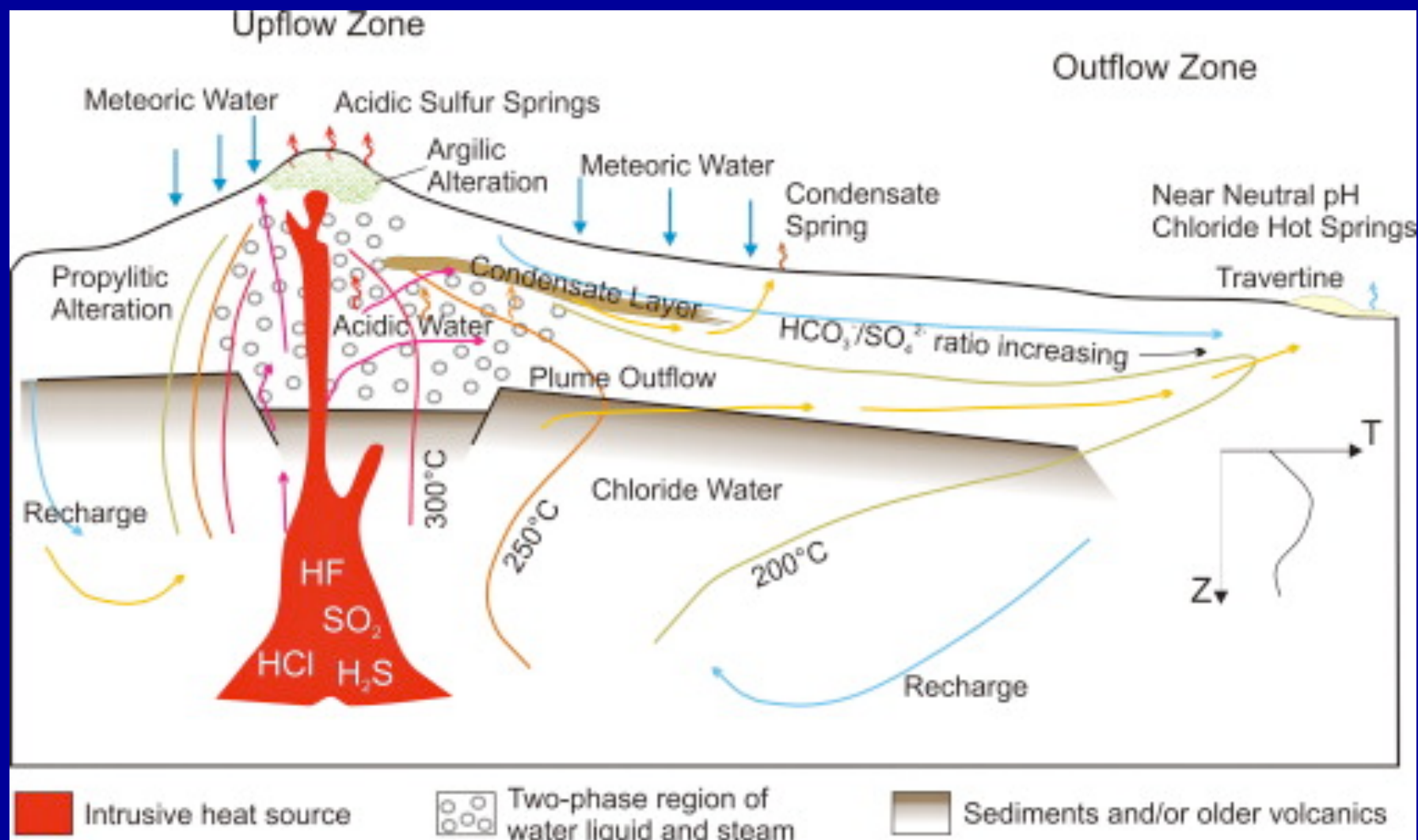


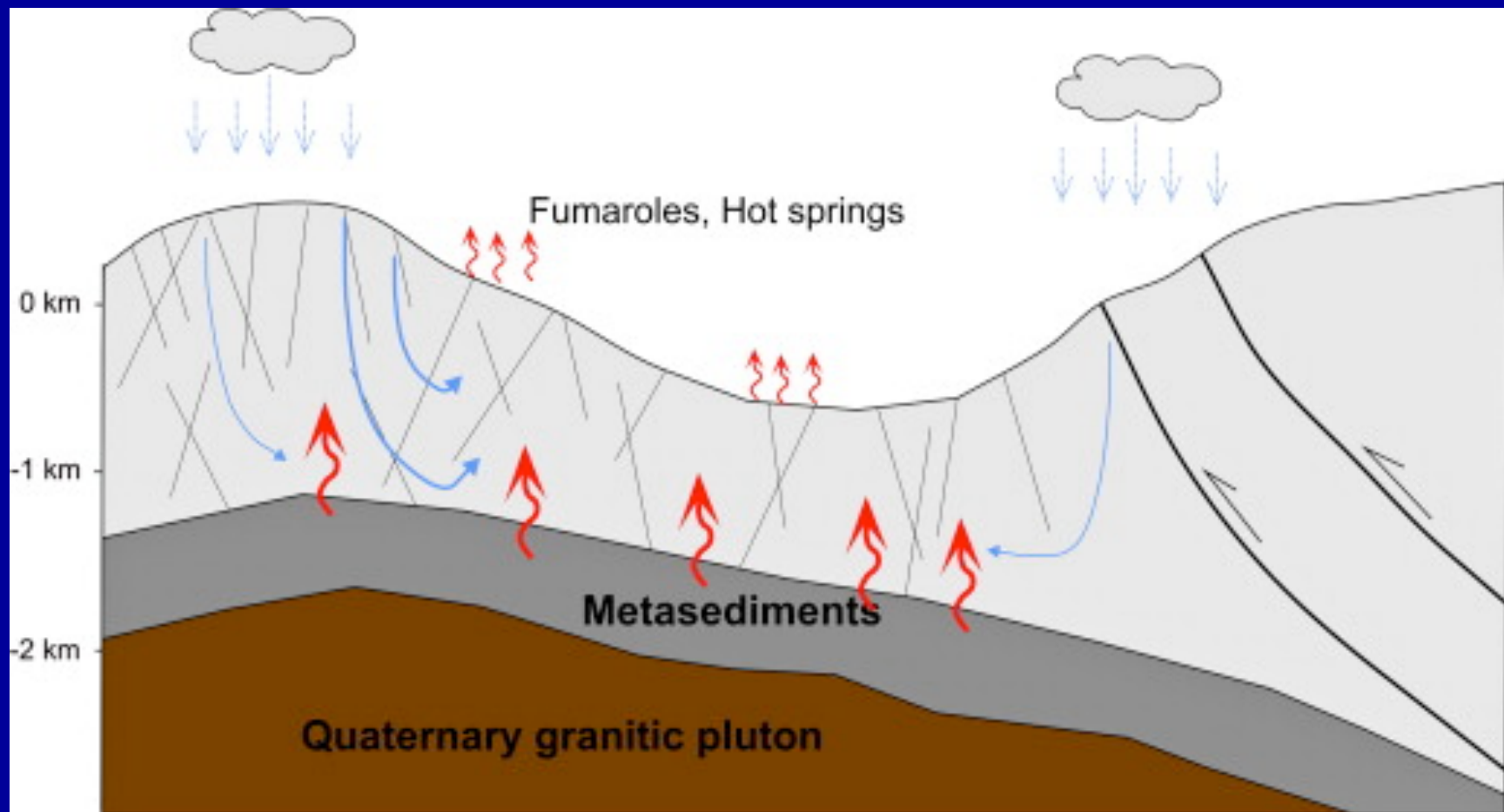
## Reazioni di scambio ionico

Se un minerale con un certo tipo di ioni adsorbiti sulla sua superficie è messo in una soluzione elettrolitica contenente ioni differenti, alcuni ioni originali saranno rilasciati in soluzione mentre altri, dalla soluzione, saranno adsorbiti nel minerale.

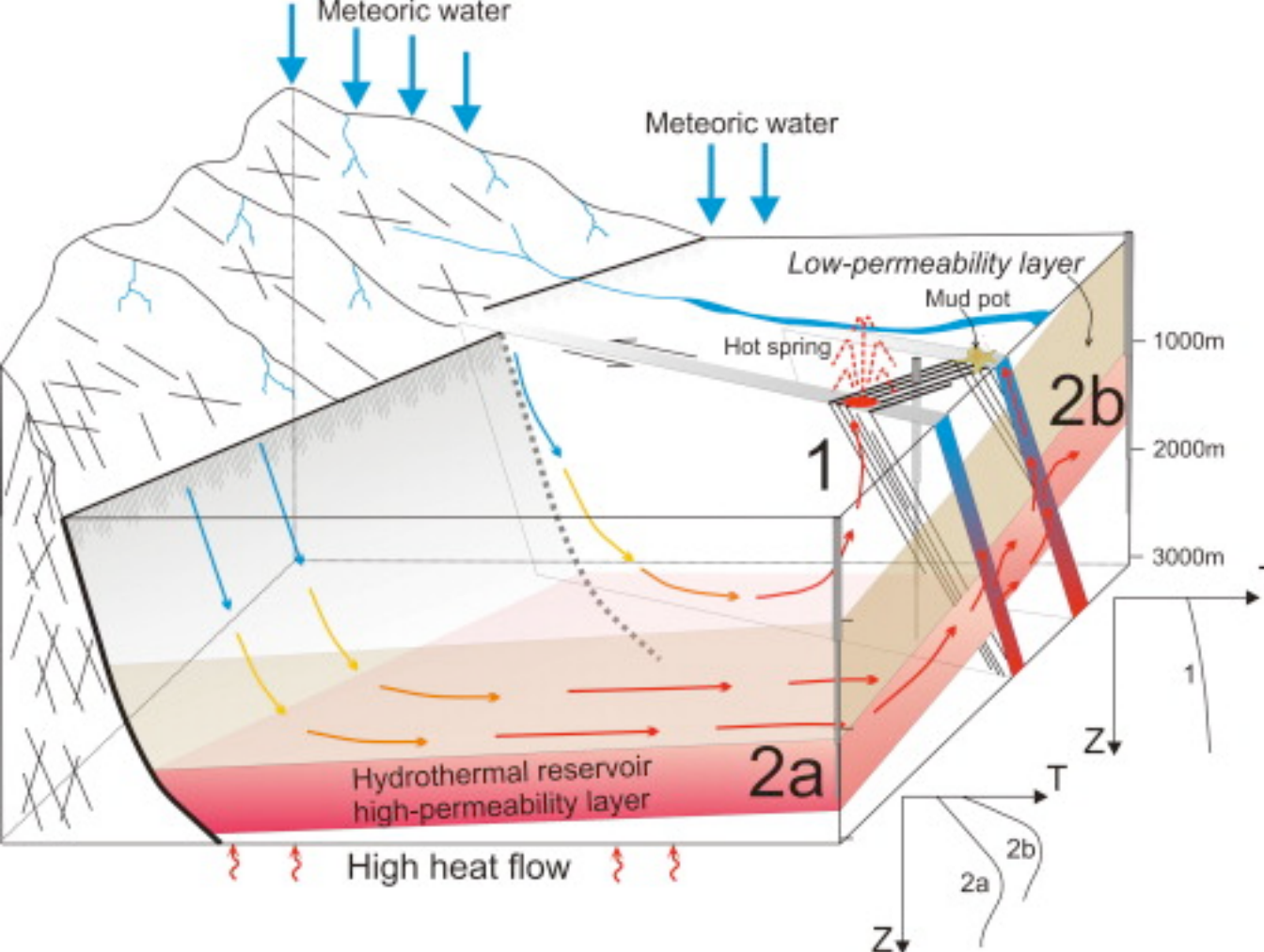
Esempi classici sono quelli degli addolcificatori:







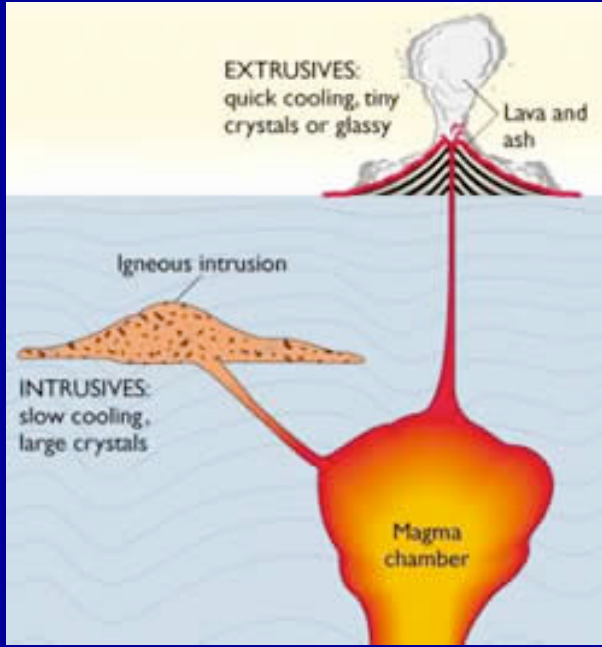




Type 1: cella convettiva dall'infiltrazione al punto di discharge (scarico) lungo una faglia. Il gradiente di T aumenta gradualmente al pozzo 1.

Type 2a e 2B sono leakage controllati dalle faglie. Il gradiente di T di un pozzo in quest'area aumenta nel livello permeabile e diminuisce sotto tale livello (pozzi 2a e 2b).

# Come funziona l'energia geotermica

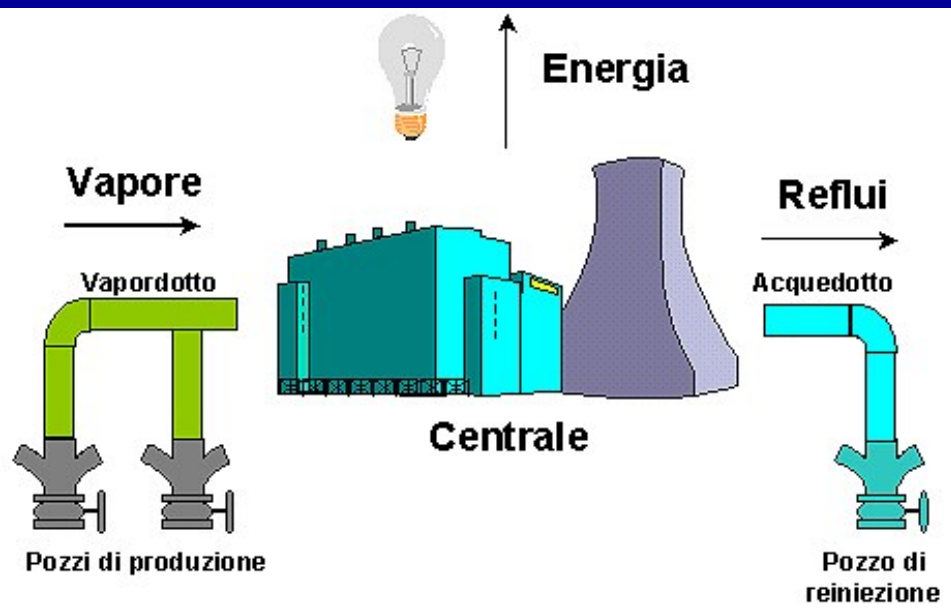


- Calore terrestre
- Acqua → vapore → generatori elettrici
- Turbine
- Aree specifiche
  - L'energia geotermica è localizzata

# Energia endogena e sfruttamento energetico



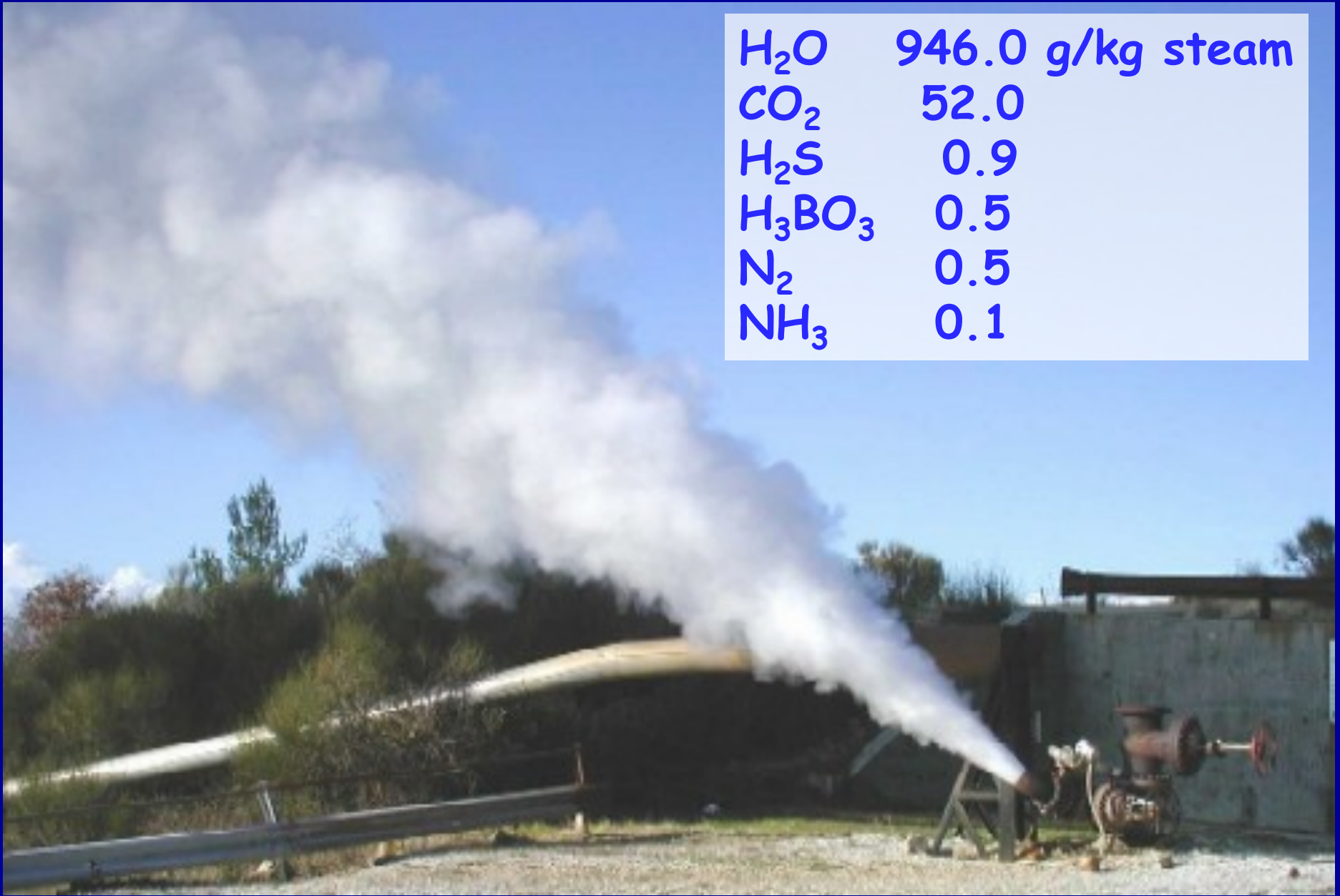
Un campo geotermico può essere economicamente sfruttabile



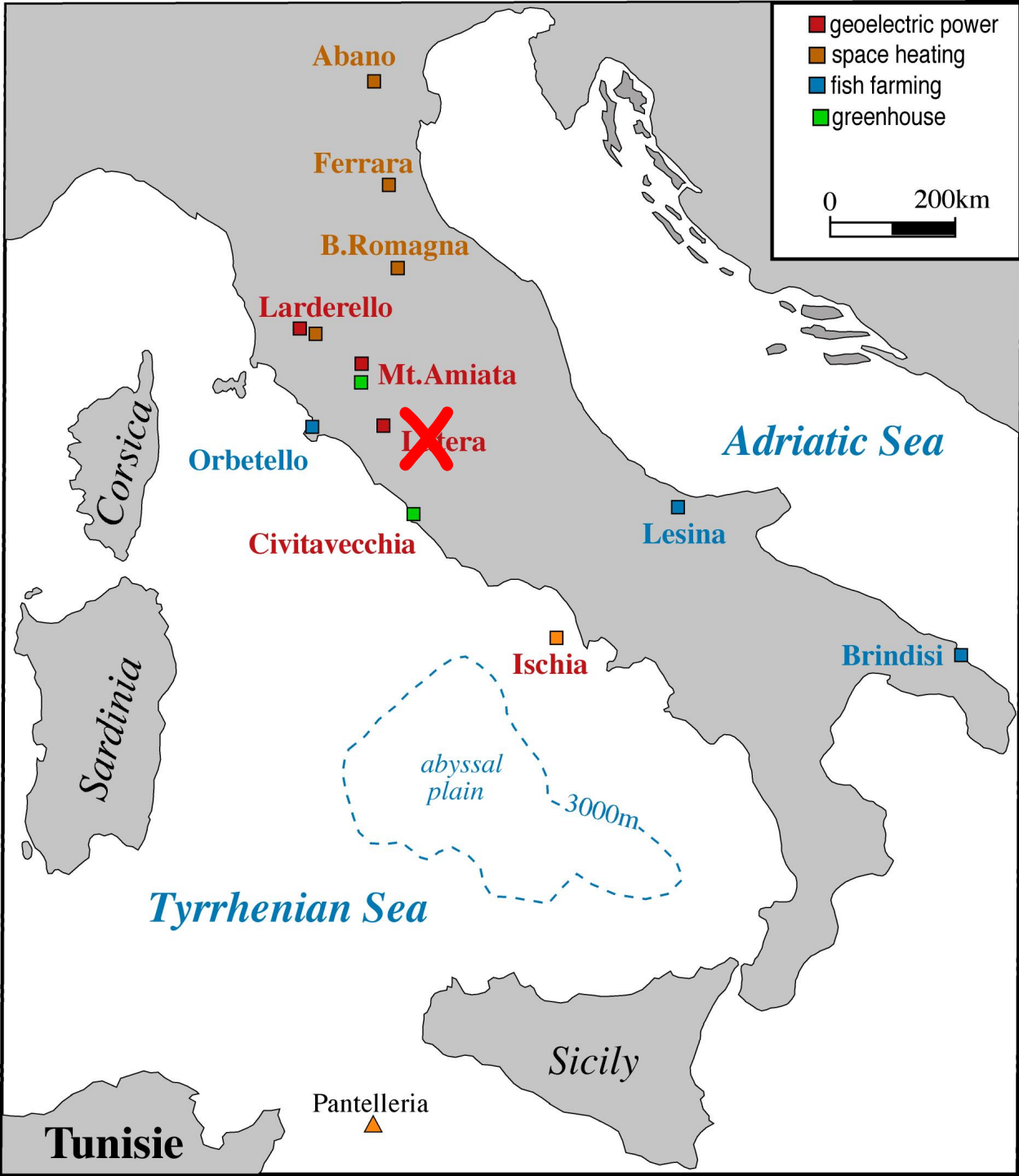
Questo dipende da:

- entalpia nel sistema
- dimensioni del reservoir
- composizione dei fluidi
- richiesta d'energia

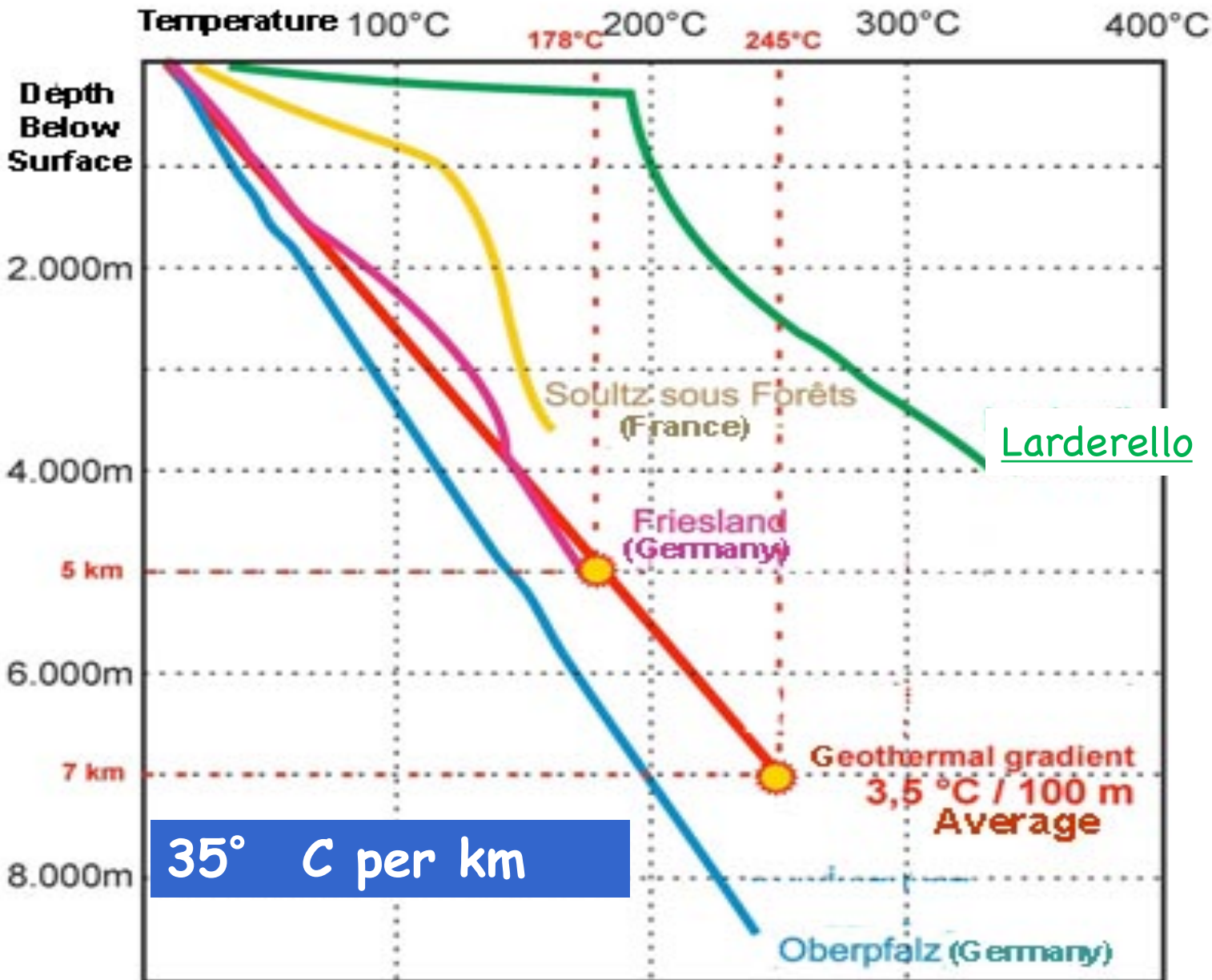
$H_2O$	946.0	g/kg steam
$CO_2$	52.0	
$H_2S$	0.9	
$H_3BO_3$	0.5	
$N_2$	0.5	
$NH_3$	0.1	



# La geotermia in Italia

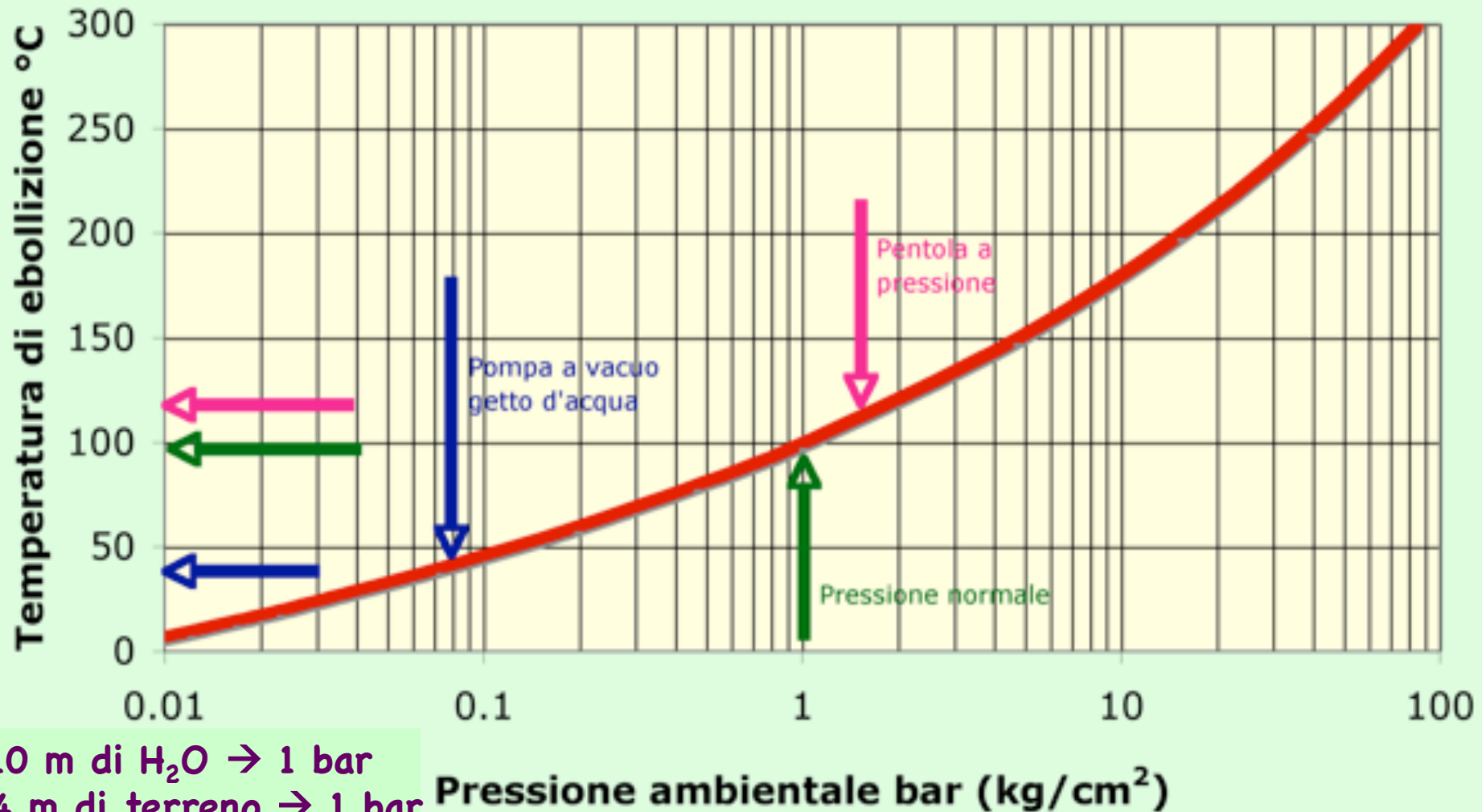


# Earth's Crust Temperature Profile at Different Locations

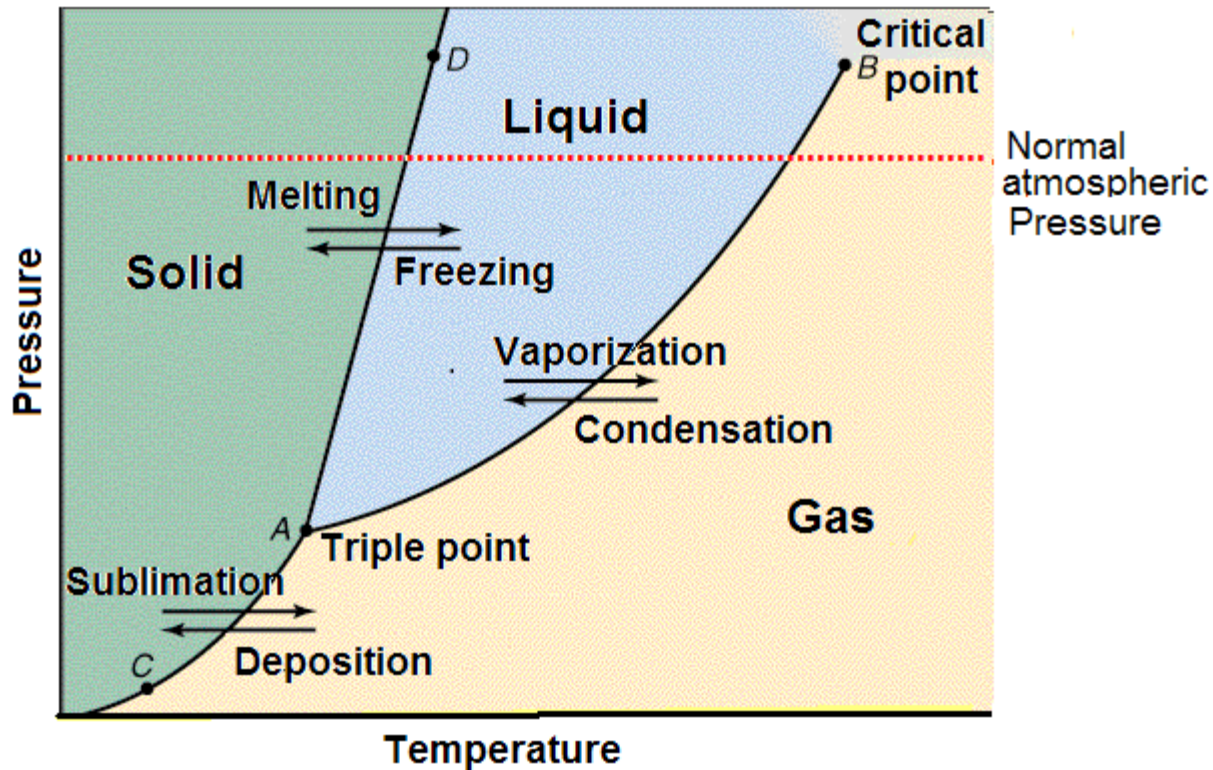


# Diagrammi di fase

Temperatura di ebollizione dell'acqua in funzione della pressione ambientale



# Diagrammi di fase

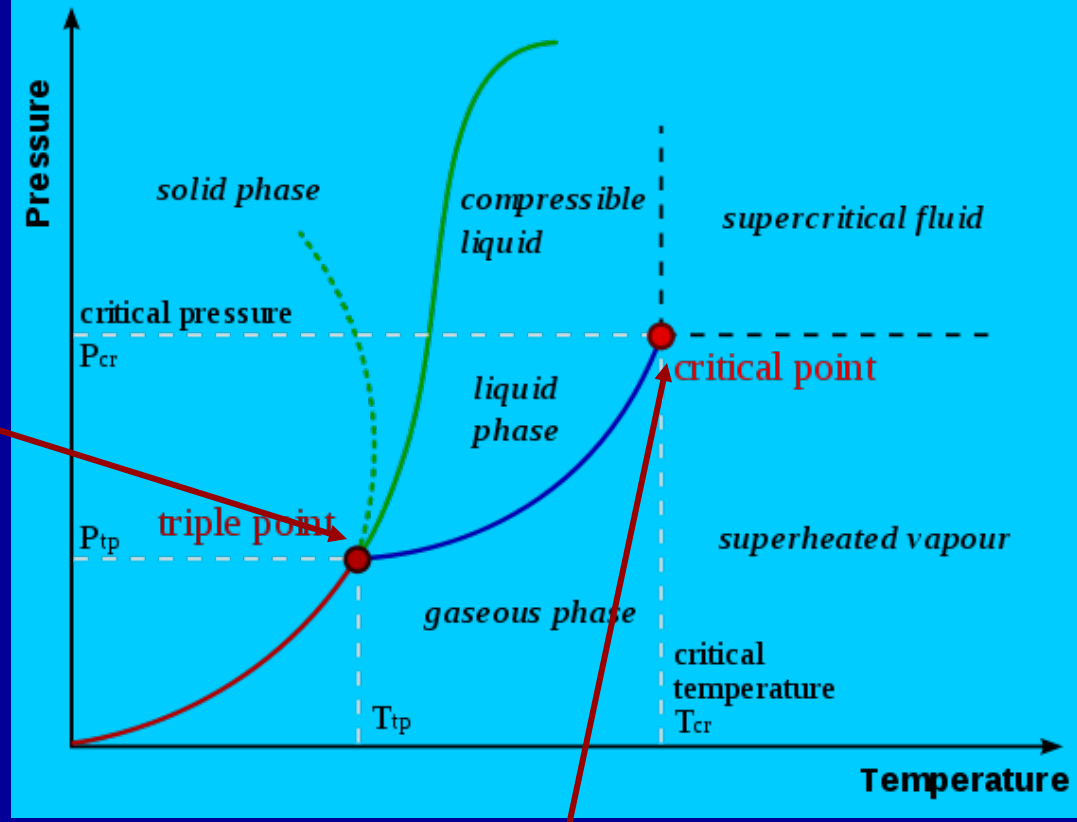


Il punto di ebollizione di un liquido è la temperatura alla quale la pressione di vapore è uguale a quella atmosferica  
Al punto triplo tutte le fasi sono in equilibrio.



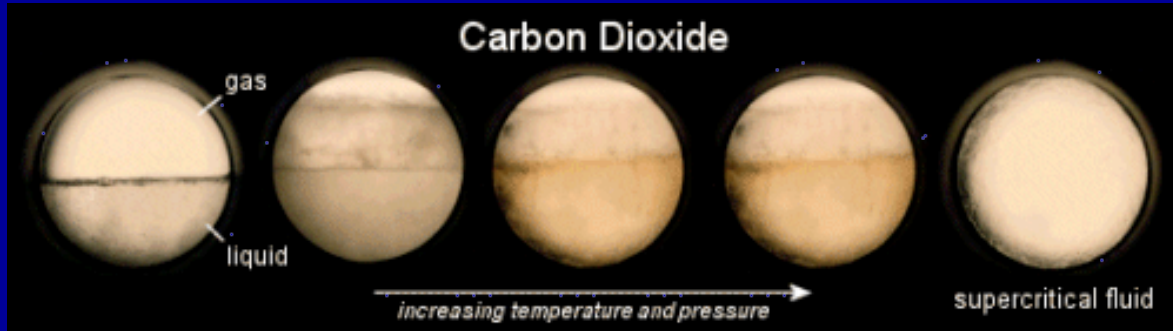
- *Temperatura critica* di una sostanza è la temperatura al di sopra della quale questa non può esistere allo stato liquido.
- *Pressione critica* è la pressione richiesta per liquefare un gas alla sua temperatura critica

**Punto triplo:** condizioni PT per cui abbiamo coesistenza di una fase liquida, solida e gassosa,  $T=273.16\text{ K}$  e  $P=1\text{ atm}$ :  $\text{H}_2\text{O} = 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $4.58\text{ mmHg}$



**Punto critico (stato critico):** condizioni PT per cui una separazione di fase cessa di esistere. In un sistema liquido-vapore riscaldato in uno spazio confinato, all'aumento di  $T$ , la densità del liquido diminuisce mentre quella del vapore aumenta. Il Punto Critico è quel valore di PT in cui le densità diventano uguali. Oltre questo punto non c'è distinzione fra le due fasi...si parla di fluido supercritico

Il Punto critico dell'Acqua è di  $647\text{ K}$  ( $374\text{ }^\circ\text{C}$  e  $218\text{ atm}$ ). Al di sotto della  $T$  critica abbiamo condensazione per ogni incremento di pressione



# Esempi di campo geotermico

- A vapore dominante:  
Larderello, Italia
- A liquido dominante:  
Islanda



alta entalpia:  
alta redditività energetica  
energia esportabile

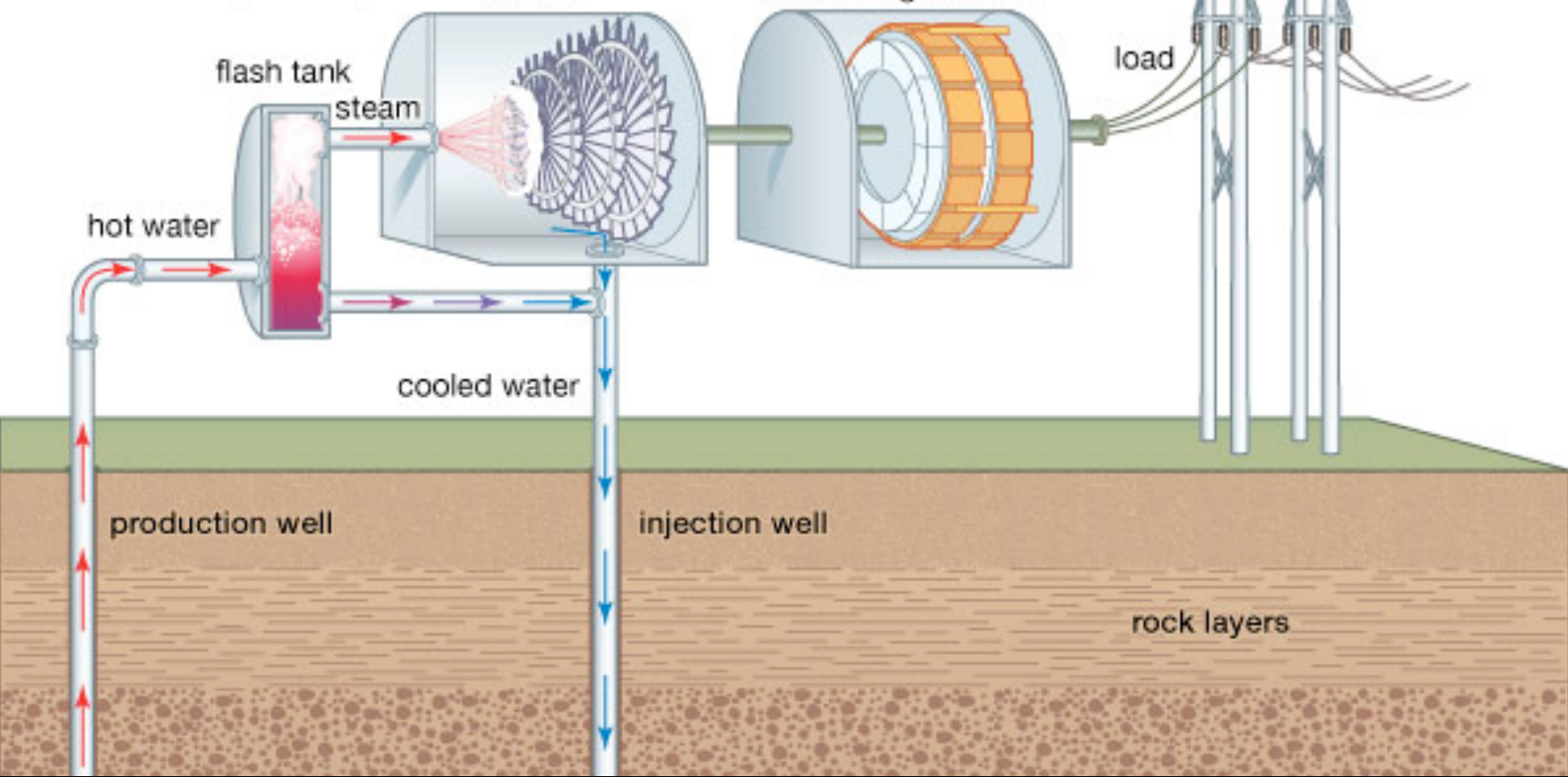


bassa entalpia  
semplicità di sfruttamento  
energia non esportabile

Temperature (°C) 0 20 40 60 80 100 120 140 200 350



# Flash steam power plant



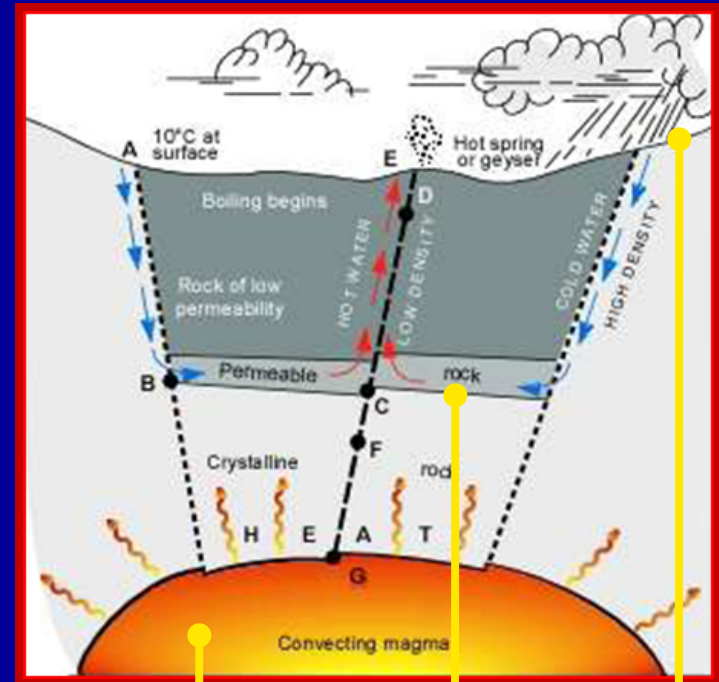
# I sistemi geotermici: descrizione generale

## Definizione

Un sistema geotermico si può definire come una convezione di acqua (fluidi) nella porzione superficiale del pianeta che in uno spazio confinato trasferisce calore da una sorgente "calda" a un dispersore di calore, normalmente la superficie.

## Elementi

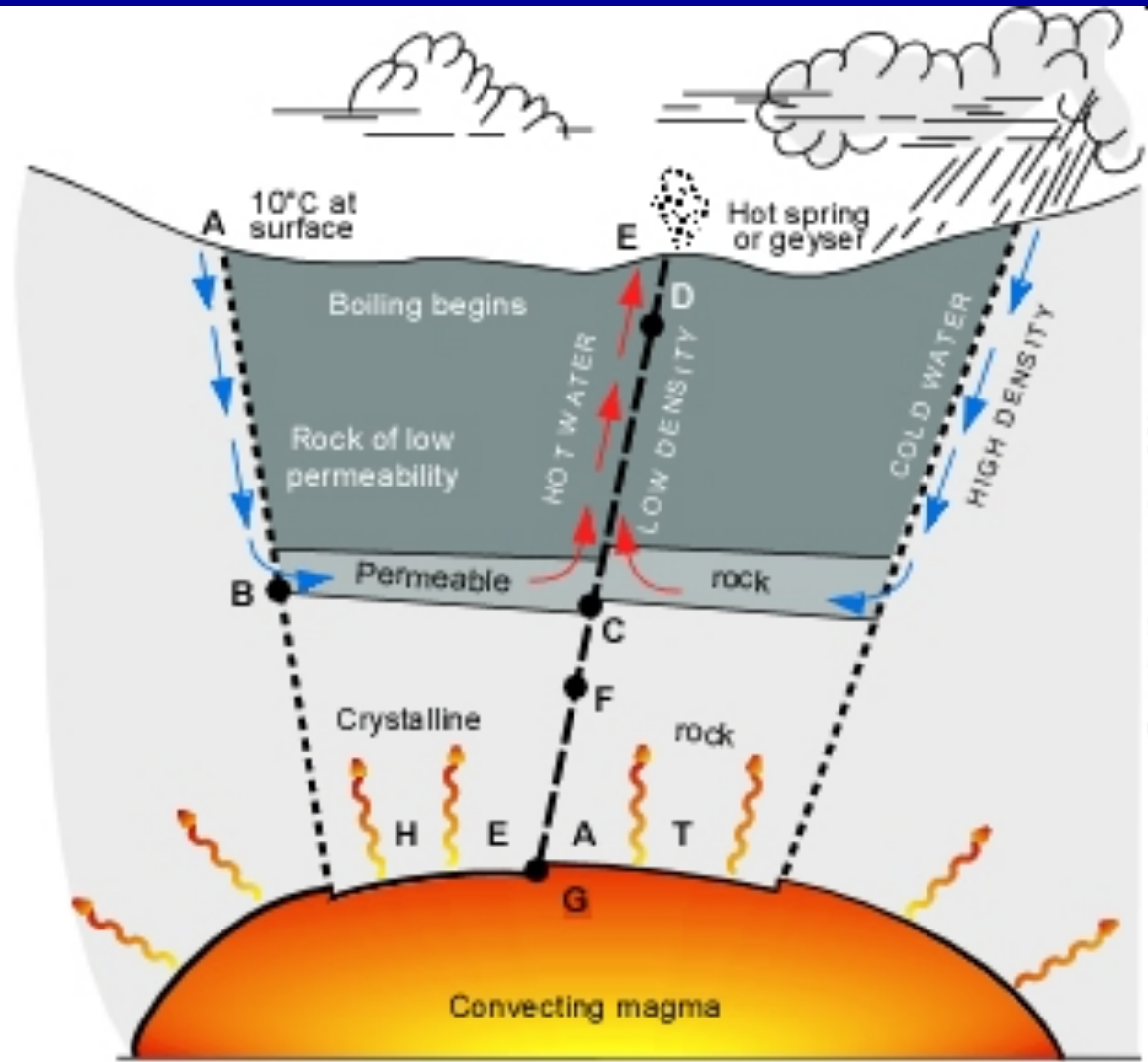
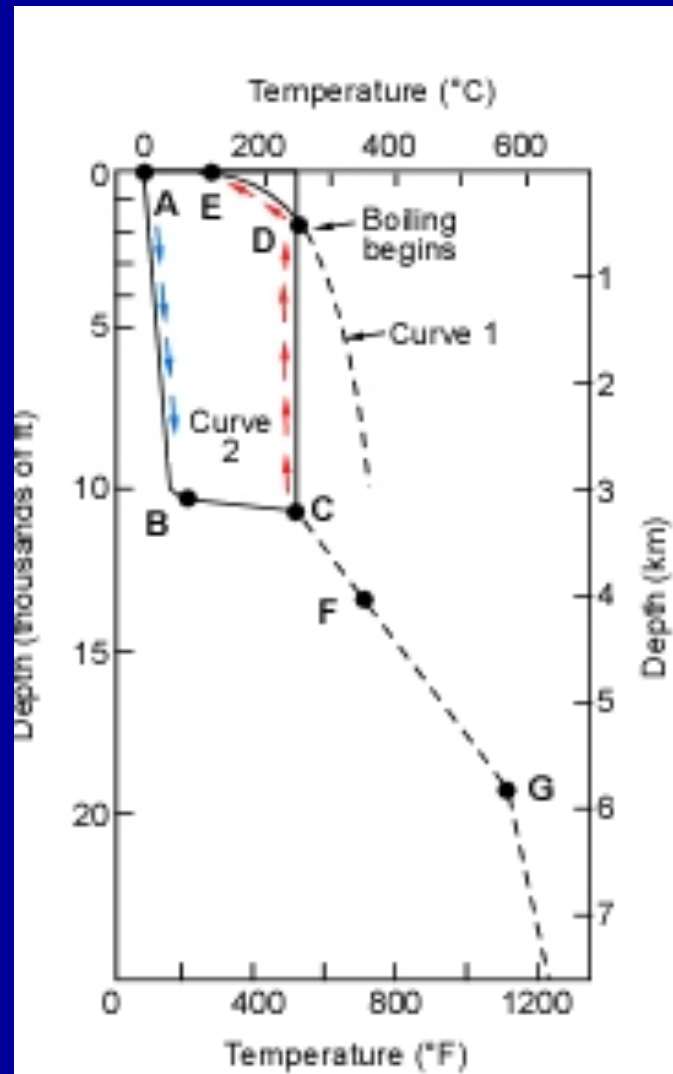
1. Sorgente di calore: rocce calde o magma con temperature elevate e profondità di 5-10 km.
2. Reservoir: rocce permeabili generalmente sottostanti a rocce impermeabili e connesse ad un'area di ricarica superficiale.
3. Fluido geotermale (= heat carrier): acqua, spesso meteorica, in fase liquida o vapore in base alla pressione e temperatura. L'acqua trasporta composti chimici e gas  $CO_2$ ,  $H_2S$ , etc... .



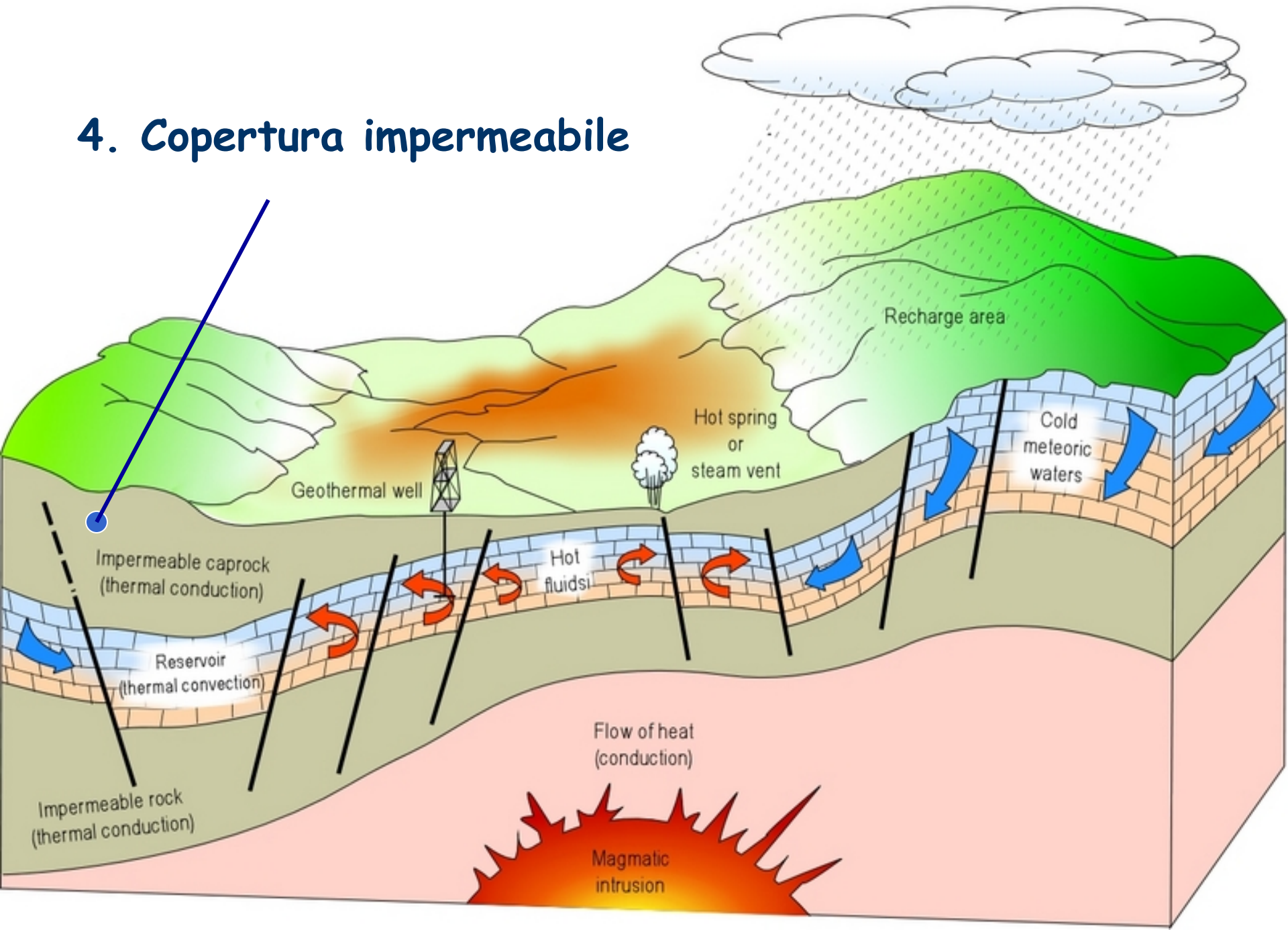
1

2

3

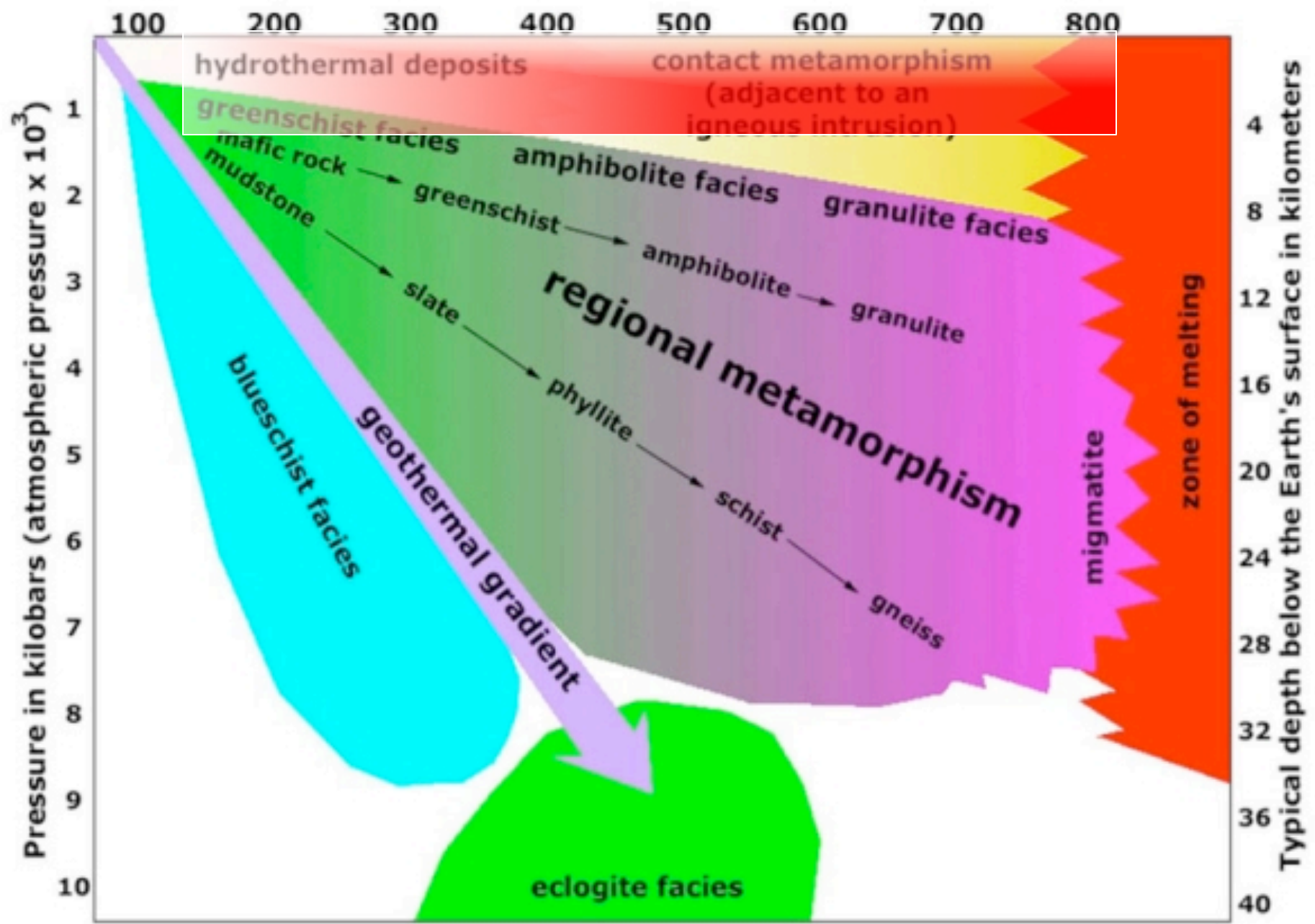


## 4. Copertura impermeabile



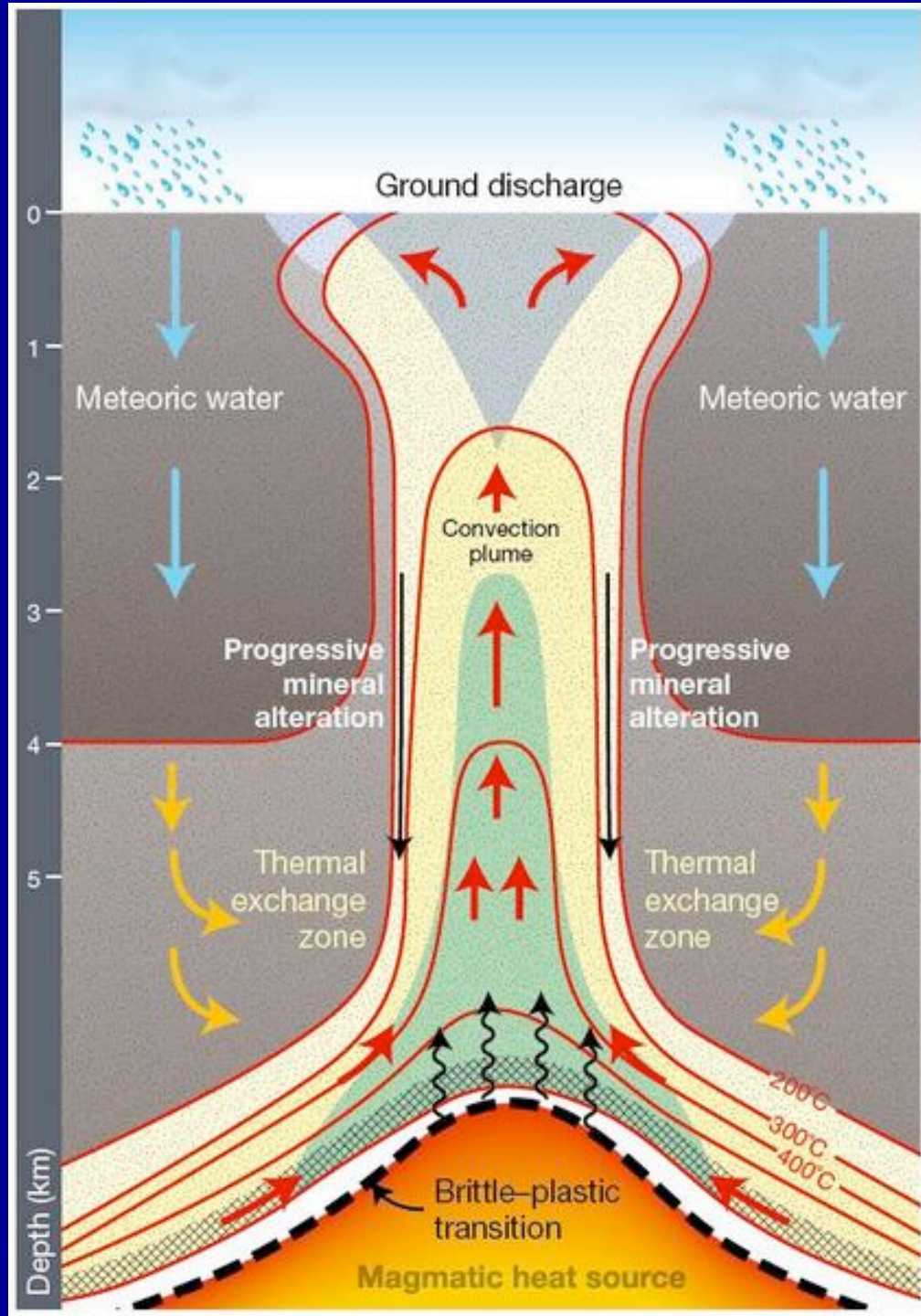


# Temperature in Centigrade

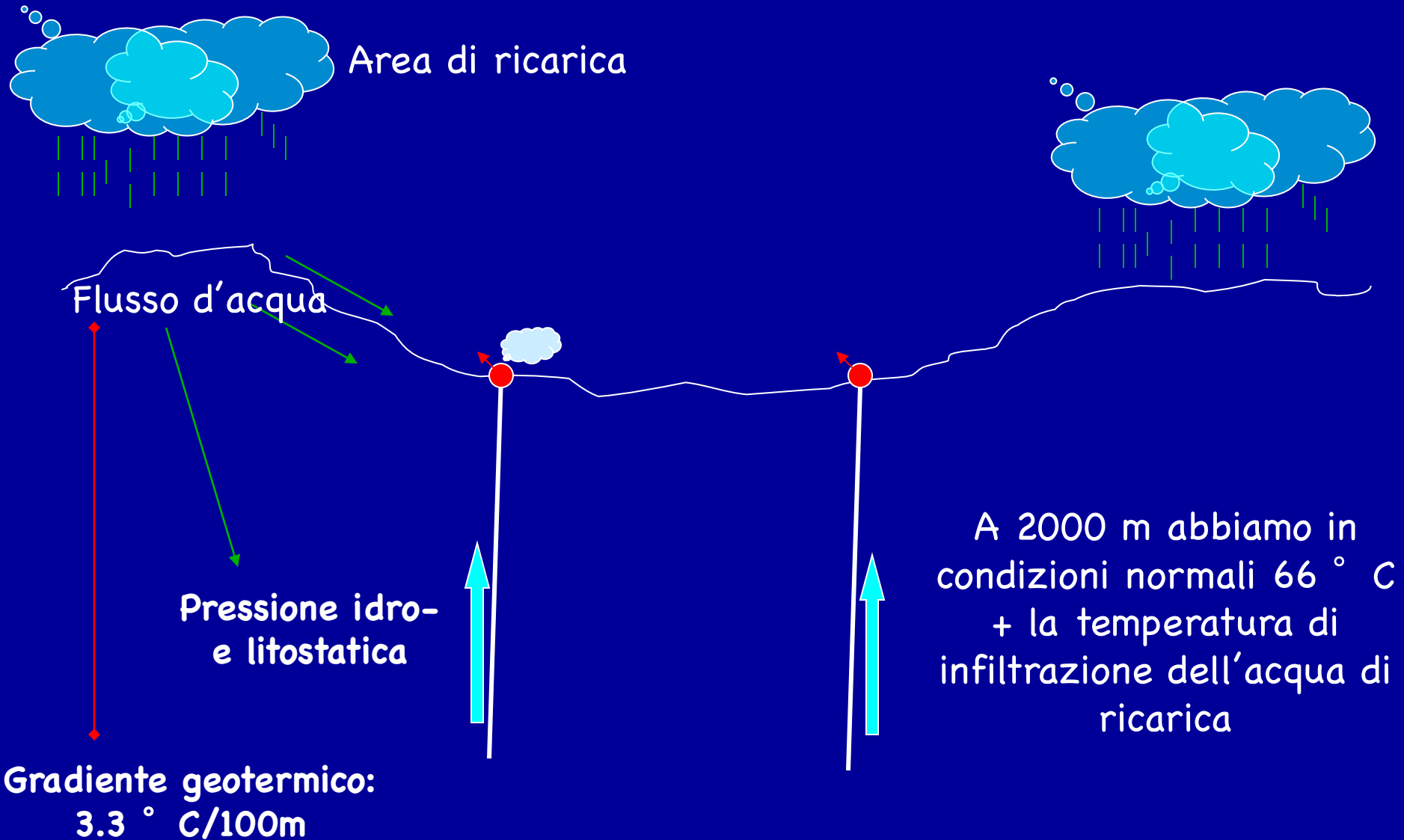


Pressure, temperature, and depth relationships in the formation of metamorphic rocks.

**Sistema  
propriamente  
convettivo, i.e. no  
copertura  
impermeabile**



# Campo Geotermico a bassa temperatura

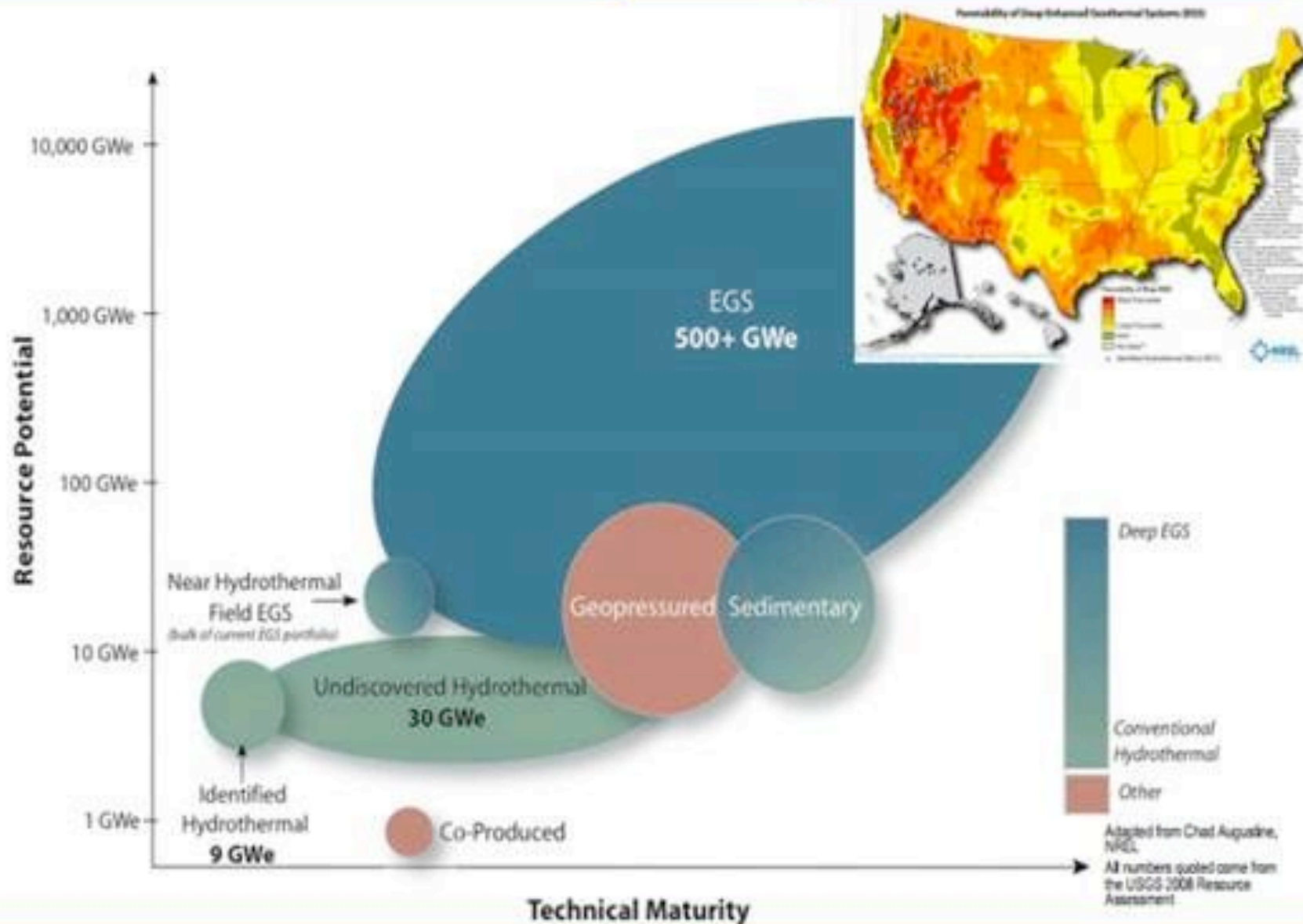


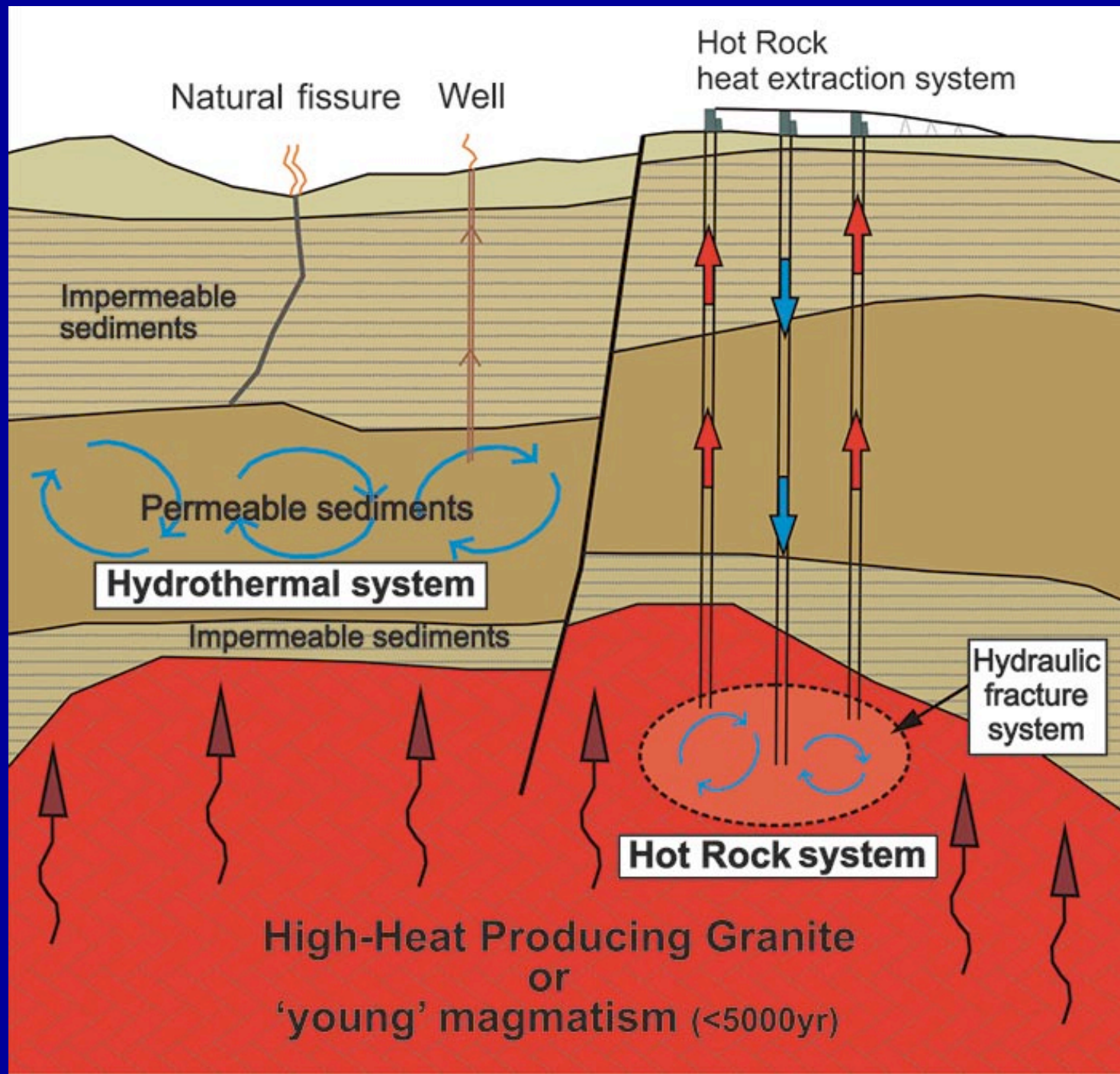
# Realizing the Full Potential of Geothermal

*Exploring the upside*

U.S. DEPARTMENT OF  
**ENERGY**

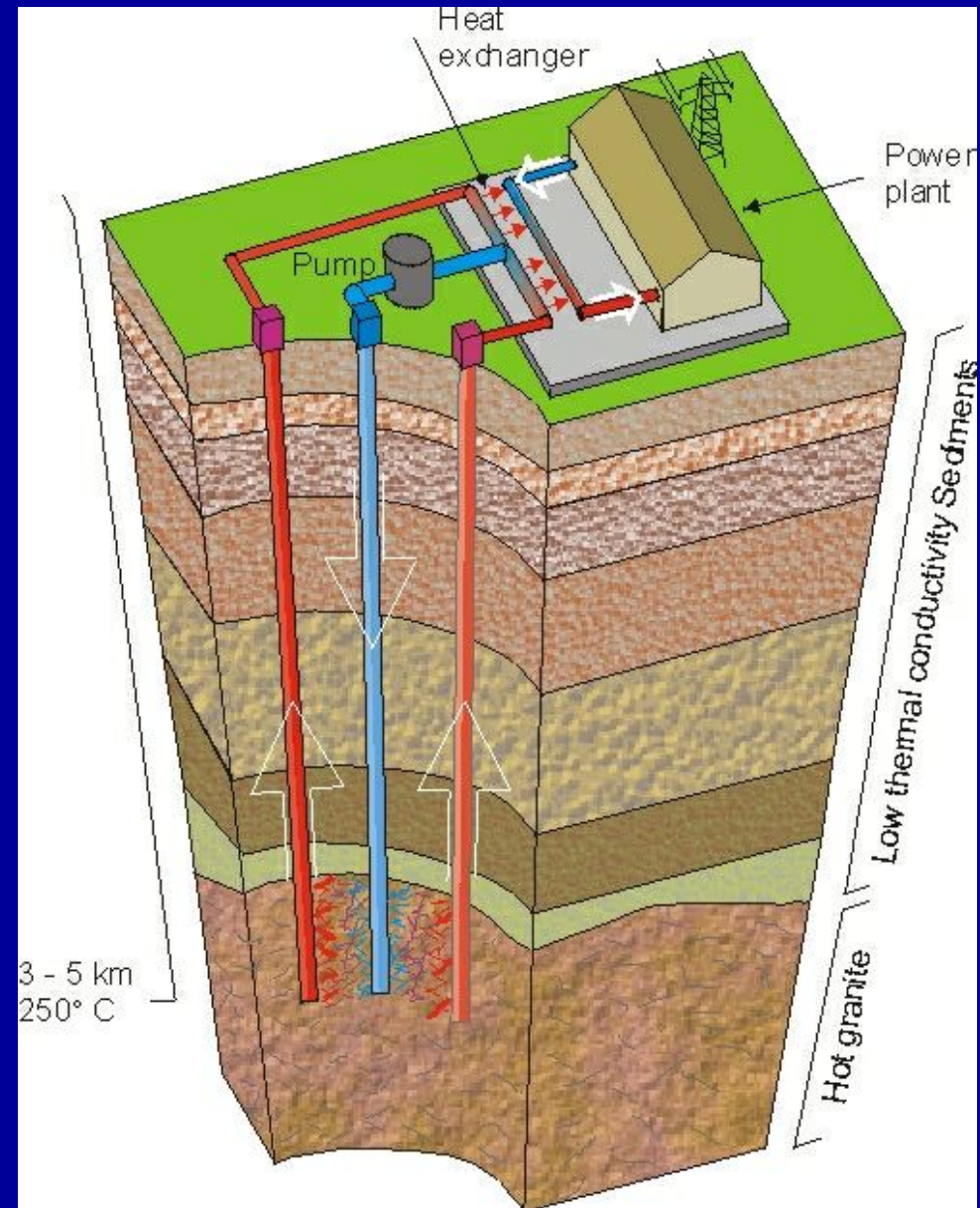
Energy Efficiency &  
Renewable Energy





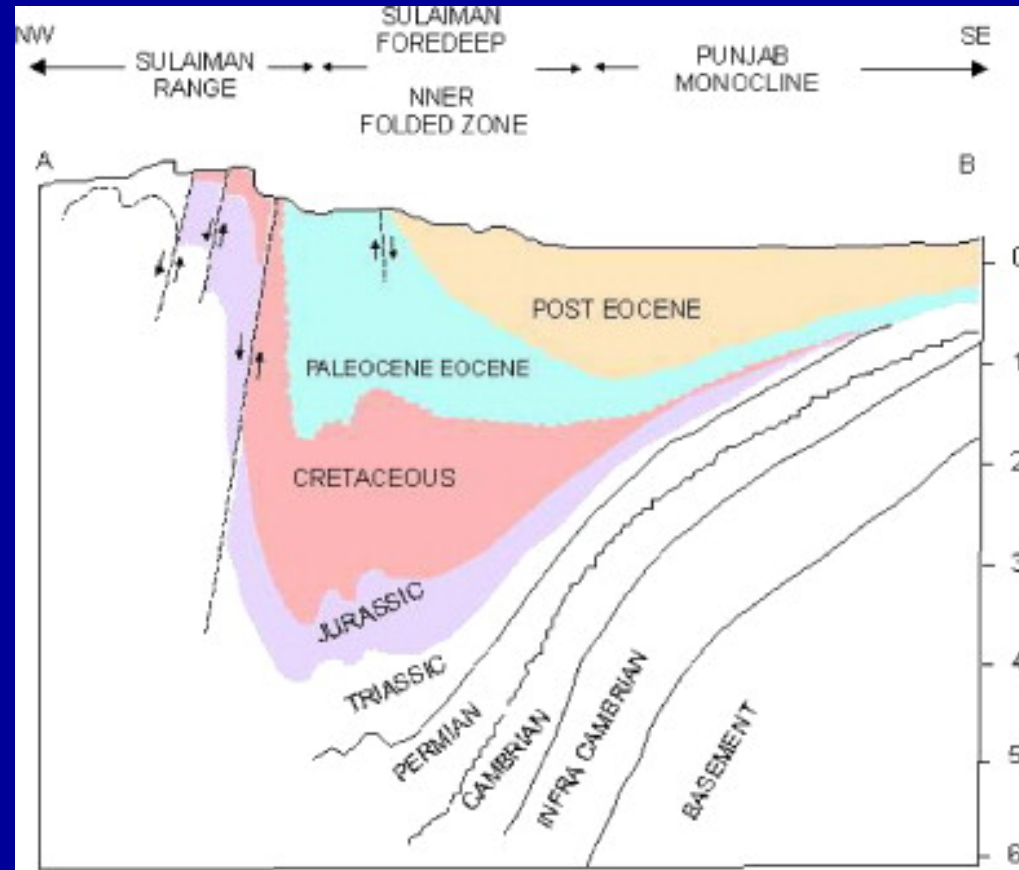
## “Artificial Systems” in Hot Dry Rocks (HDR)

Per accrescimento dell'efficienza di un reservoir geotermale, tramite acidi ed esplosivi. Acqua superficiale fredda viene inserita in rocce calde, secche, porose e fratturate. Quest'acqua è successivamente ri-estratta a più alte temperature.



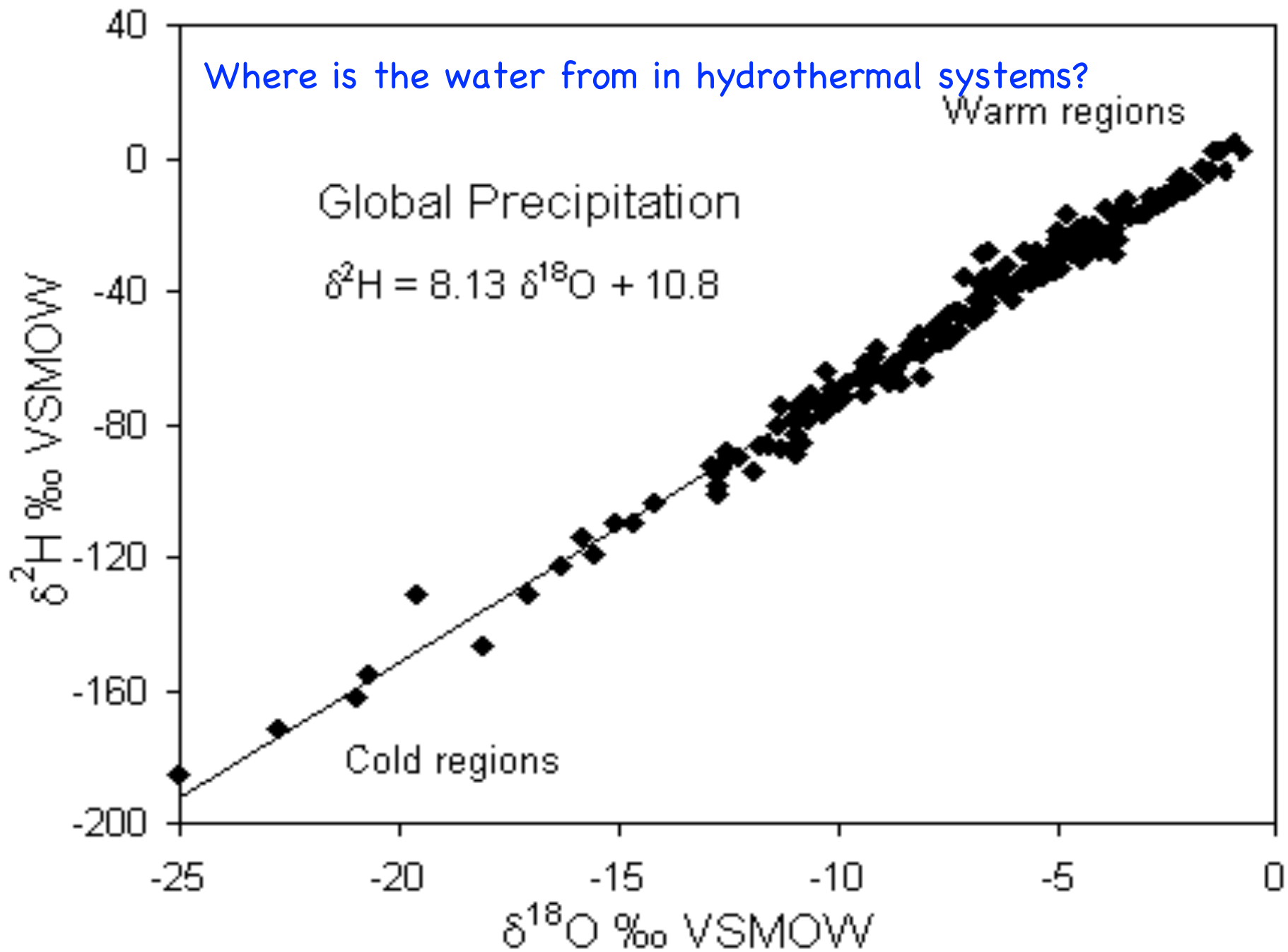
# Sistemi geopressurizzati

Una risorsa geopressurizzata consiste in una hot-brine soggetta ad elevate pressioni a causa di acqua catturata durante il processo di seppellimento dei sedimenti ove è racchiusa. Queste risorse sono spesso associate con metano e sono relative ad acquiferi di grosse dimensioni. I pozzi perforati all'interno di queste risorse fluiscono in pressione in superficie.

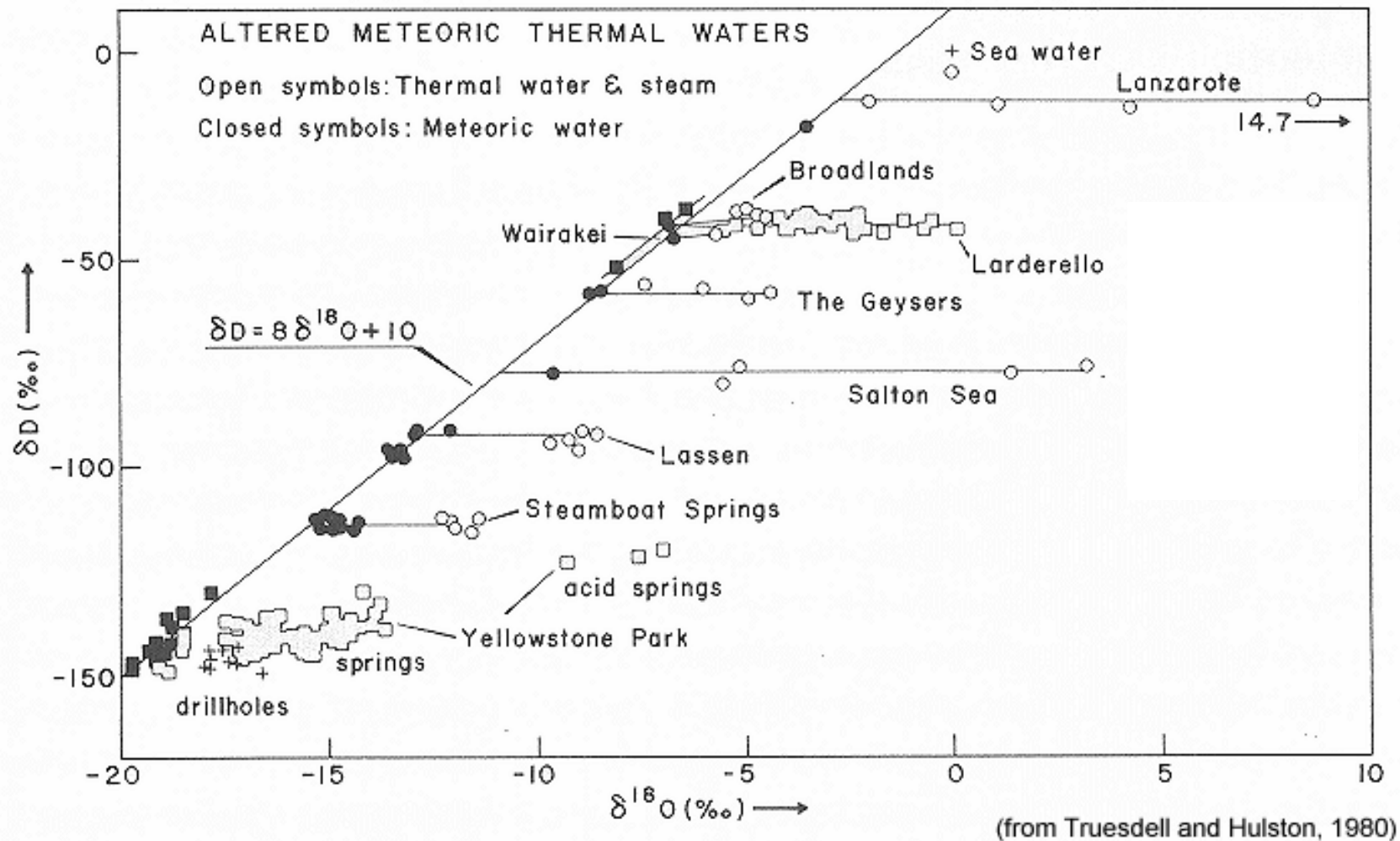


Le temperature variano fra 90 e 200 ° C. Tre sono le forme di energia utilizzabili con questi pozzi geopressurizzati: 1. termale per le elevate temperature; 2. idraulica per l'elevata pressione con la quale fuoriescono; 3. chimica per il metano disciolto nei fluidi.

Where is the water from in hydrothermal systems?



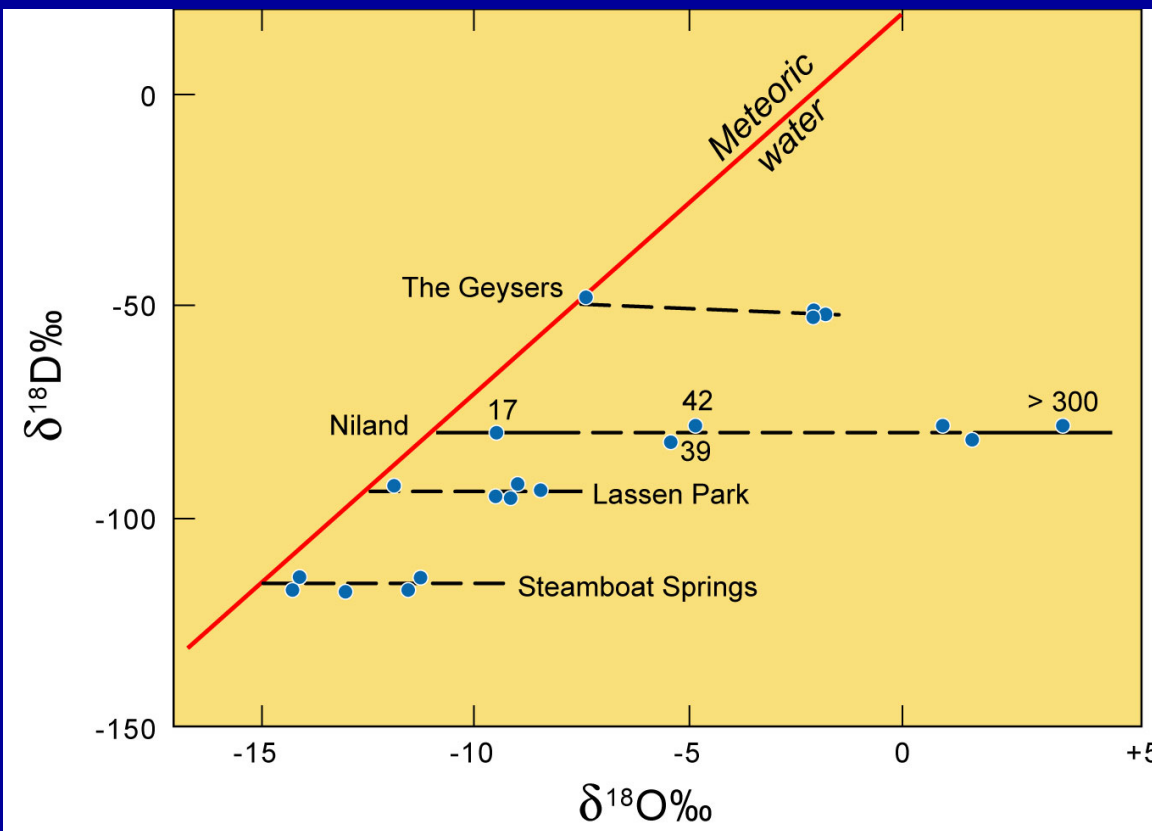




Craig (1963) trovò che il rapporto isotopico D/<sup>1</sup>H delle acque geotermiche era molto simile a quello delle acque di falda locali. Pertanto egli concluse che la maggior parte dell'acqua geotermica era di origine meteorica.

# Il grafico del sistema O-D: alte temperature di equilibrio con carbonati e silicati delle acque geotermiche

## Acque geotermiche



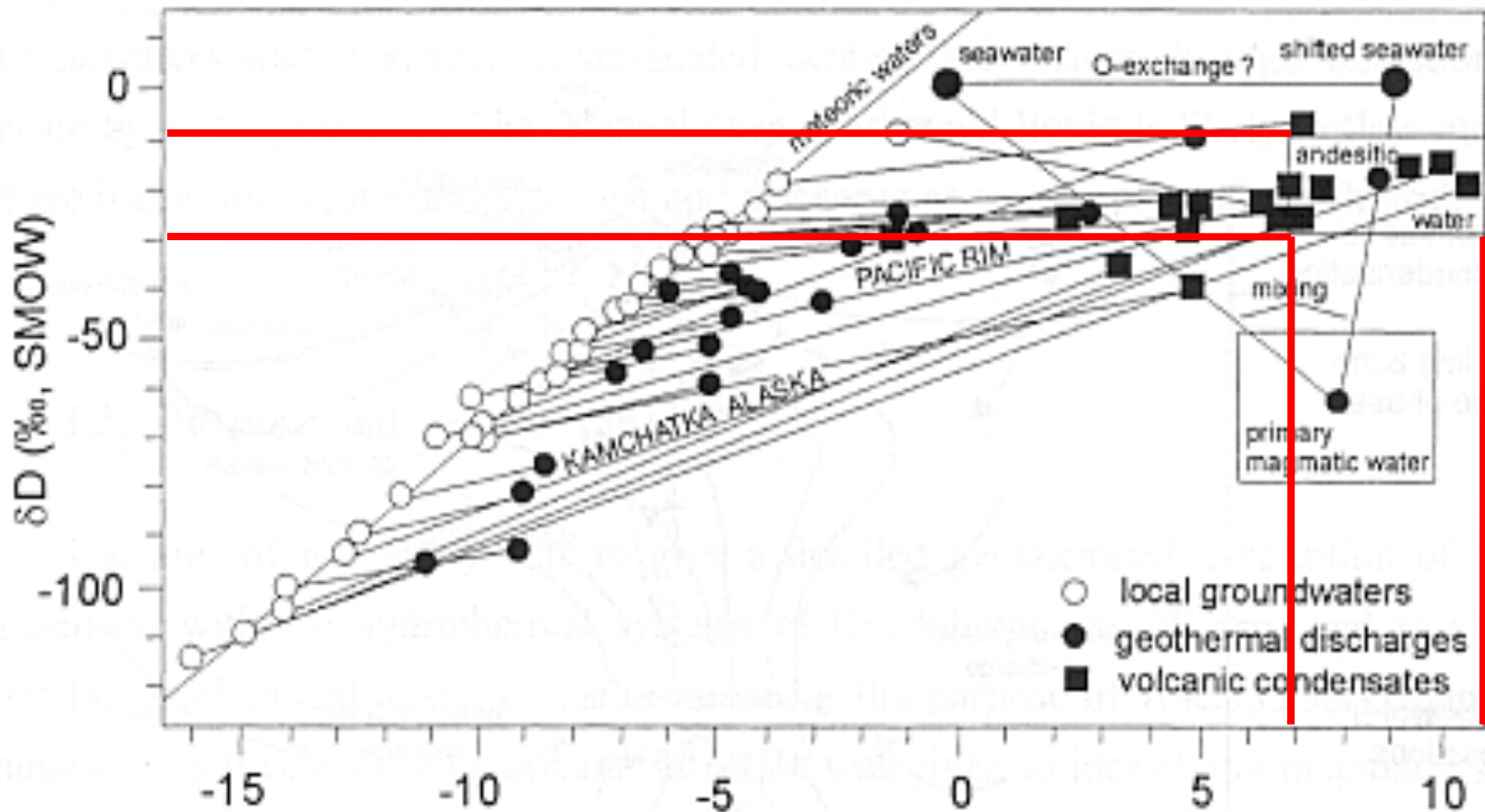
□ Composizione isotopica controllata da progressivo equilibrio fra ossigeno- $\text{H}_2\text{O}$  e ossigeno-roccia (carbonati e silicati)

□  $\delta\text{D}$  delle acque immodificato (basso  $T$  nelle rocce)

□ grandezza dello shift  $\uparrow$  quando  $T \uparrow$

□ Lo shift avviene per temperature sopra i  $200^\circ\text{C}$

**→ Marker di WRI**

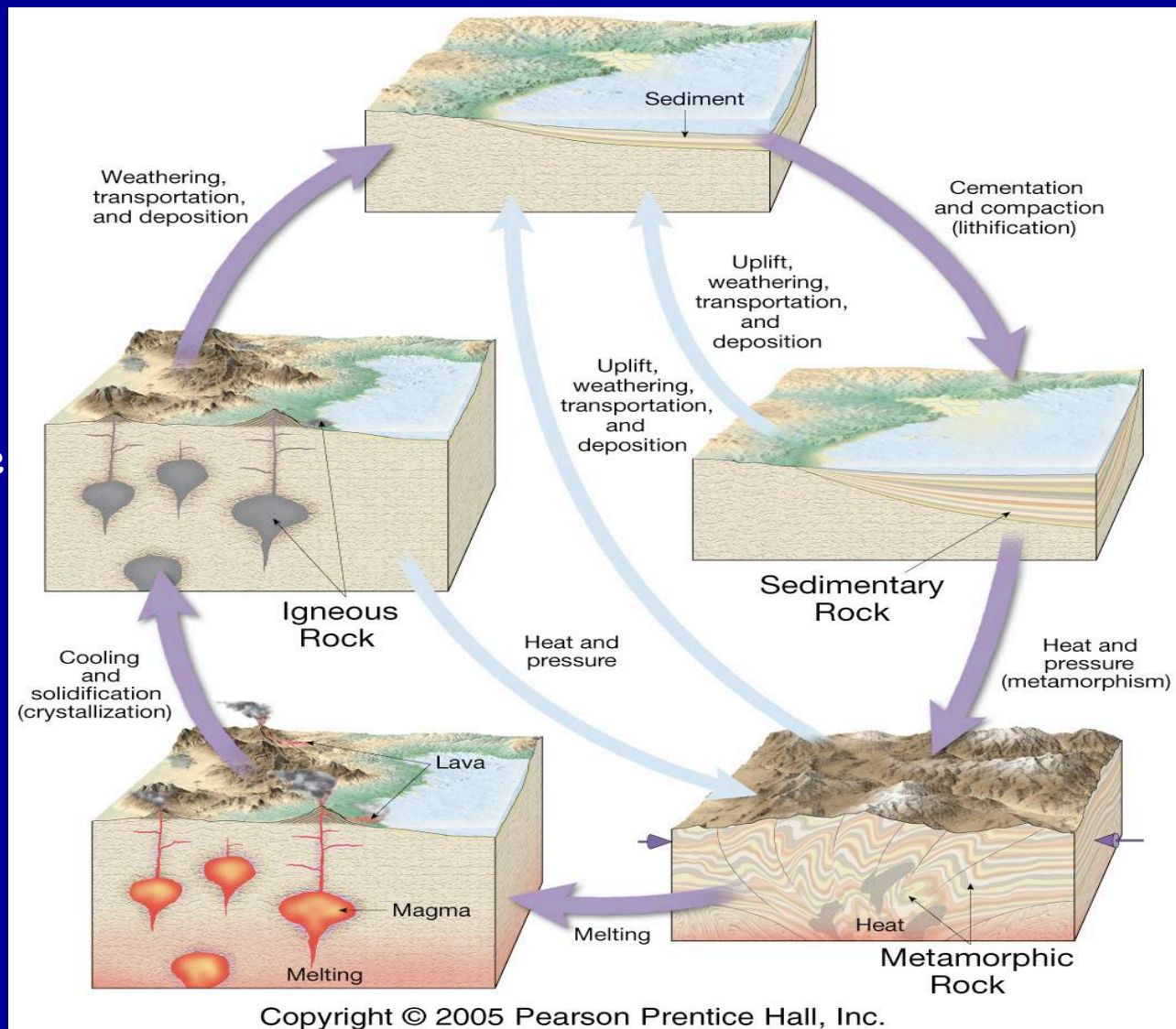


This distinct isotopic composition evidences that volcanoes release water that ultimately originates as subducted seawater and is recycled and discharged at the surface.

The condensed steam from active volcanic areas allow to highlight the contribution by a magmatic *end member* (andesitic magmatic water:  $\delta D = -20 \pm 10 \text{‰}$  and  $\delta^{18}O = +9 \pm 2 \text{‰}$ ), whereas the geothermal fluids tend to be dominated by the meteoric component.

# Minerali idrotermali

Quando del magma caldo risiede in profondità nella crosta, l'acqua nelle rocce circostanti è riscaldata, innescando una circolazione convettiva. Come questa si muove, si solubilizzano dei minerali (ioni) dalle rocce con le quali l'acqua interagisce. Le sostanze disciolte saranno trasferite in nuovi ambienti. Se le condizioni del sistema mutano (PT, pH, Eh, ecc.) si potranno formare dei nuovi minerali, sostituendo anche quelli già presenti



# L'Alterazione idrotermale

Alterazione di una roccia: variazione mineralogica (e chimica) di questa.

I vecchi minerali vengono sostituiti da nuovi minerali per le variate condizioni chimico-fisiche:  $T^{\circ}$ ,  $C$ ,  $P$ , chimica o combinazione fra queste

Cambiamento chimico nelle rocce e nei minerali causato dall'azione di soluzioni idrotermali ricche in volatili che risalgono da una camera magmatica in raffreddamento.

L'alterazione idrotermale è una variazione nella mineralogia per interazione di rocce con fluidi acquosi caldi (fluidi idrotermali).

Tali fluidi trasportano metalli sia dalla sorgente magmatica che dai processi di lisciviazione a carico delle rocce ospiti.

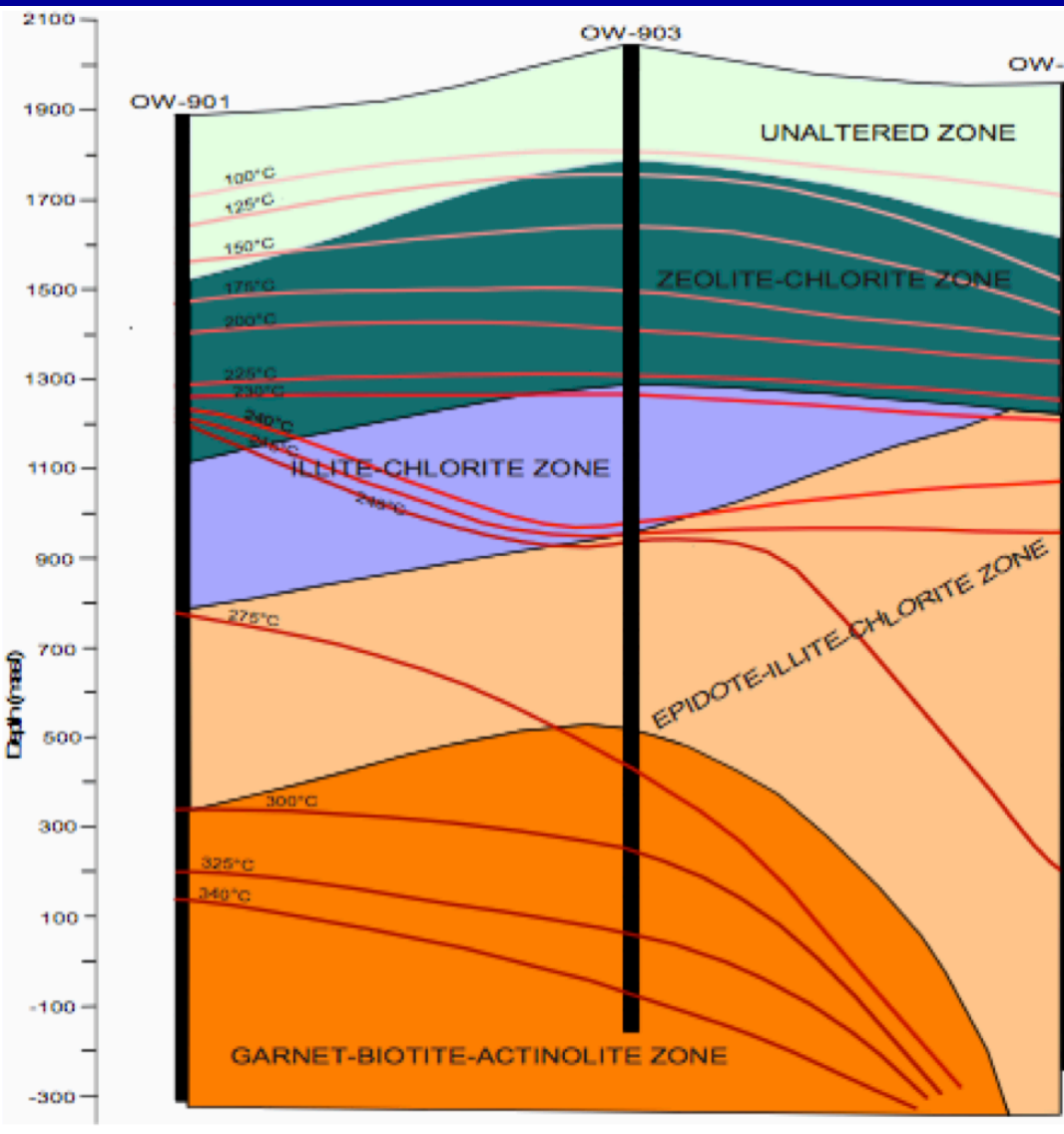
La composizione dei fluidi è variabile ed essi possono contenere vari tipi di gas, sali (fluidi di brine), acqua e metalli. Quest'ultimi sono trasportati come differenti complessi in cui sono presenti solfo e cloro.



Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

I prodotti derivanti dai processi di alterazione idrotermale variano da sistema a sistema, tuttavia possiamo considerare una relazione generale tra minerali di alterazione idrotermale e temperatura. Queste **paragenesi** mineralogiche sono state riconosciute in sistemi attuali e in sistemi fossili.

**Paragenesi:** l'ordine in cui si è generata una formazione di minerali associati.



Zona Argillitica 150-160 ° C

Zona Fillitica 200-250 ° C

Zona Propilitica ca. 300 ° C

Zona Termo-metamorfica > 300 °



I sistemi geotermici esplorati attraverso pozzi profondi hanno evidenziato una **ZONAZIONE TERMICA** relativa ai **MINERALI DI ALTERAZIONE IDROTERMALE**. Questo ha portato all'identificazione delle seguenti zone di alterazione idrotermale.



La **FACIES ARGILLITICA** è quella meno profonda ed è caratterizzata da montmorillonite con eventualmente illite, clorite e zeoliti (heulandite, stilbite): 150–160 ° C, sopra queste T ° C la montmorillonite diventa instabile.

La **FACIES ILLITICA** è caratterizzata da clorite ed illite (**FACIES A CLORITE-ILLITE**) e dalla presenza di strati-misti: 200–250 ° C. Presenza di zeoliti (laumontite)

La **FACIES PROPILITICA** o dei **SILICATI A Ca-Al** è caratterizzata dalla presenza di minerali in equilibrio con soluzioni neutre di Na-Cl: 300 ° C. L'epidoto è il minerale più tipico, si accompagna ad **adularia**, albite e solfuri (e.g., **pirite, pirrotina** e **sfalerite**). Presenza di zeoliti (wairakite).

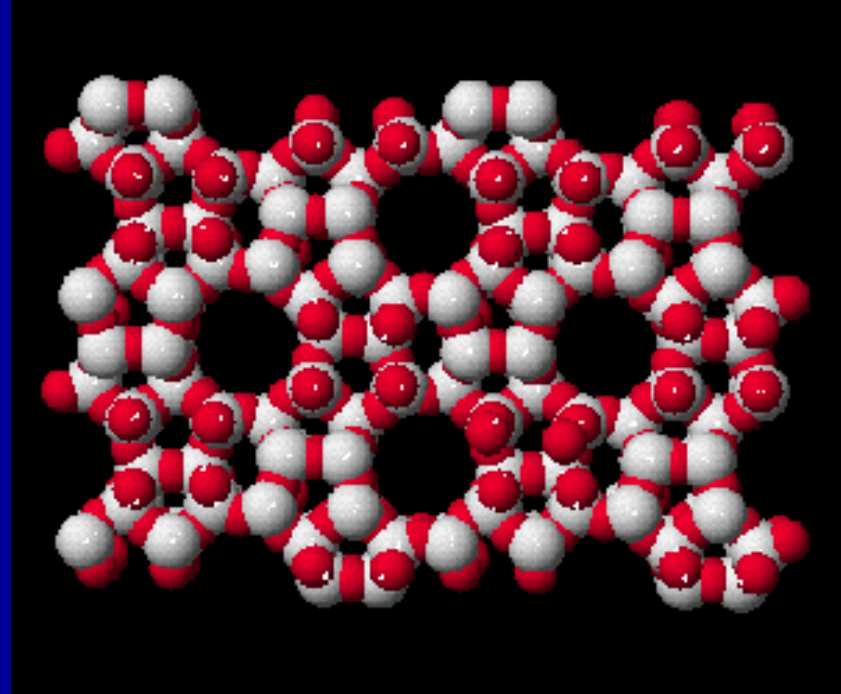


La **FACIES TERMO-METAMORFICA** (> 300 ° C) è caratterizzata da una ri-organizzazione dei litopi originali e dalla comparsa di minerali di alta temperatura, anfiboli (e.g., actinolite e tremolite), pirosseni (e.g., diopside), biotite, e granato.



**Zeoliti: "pietra che bolle"**, termine coniato nel XVIII secolo dallo svedese Axel Fredrik Cronstedt. Riscaldando questi minerali naturali essi iniziavano a saltellare a causa del rilascio dell'acqua inglobata nella loro struttura. Ci sono circa 50 zeoliti naturali e 150 sintetiche.

Le Zeoliti (tectosilicati) sono silicati di alluminio idrati con struttura aperta che permette l'allocazione di  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , ecc. Questi sono tenuti assieme da legami poco forti e quindi scambiabili con le soluzioni con cui vengono a contatto. Una delle loro origini è per reazioni di rocce vulcaniche con acque sotterranee o superficiali. E sono minerali importanti nei processi di alterazione idrotermale.



Sono dei "setacci molecolari" in quanto selezionano le molecole sulla base delle loro dimensioni.



dove i cationi M, di valenza n, neutralizzano le cariche negative sul reticolo di allumosilicato.

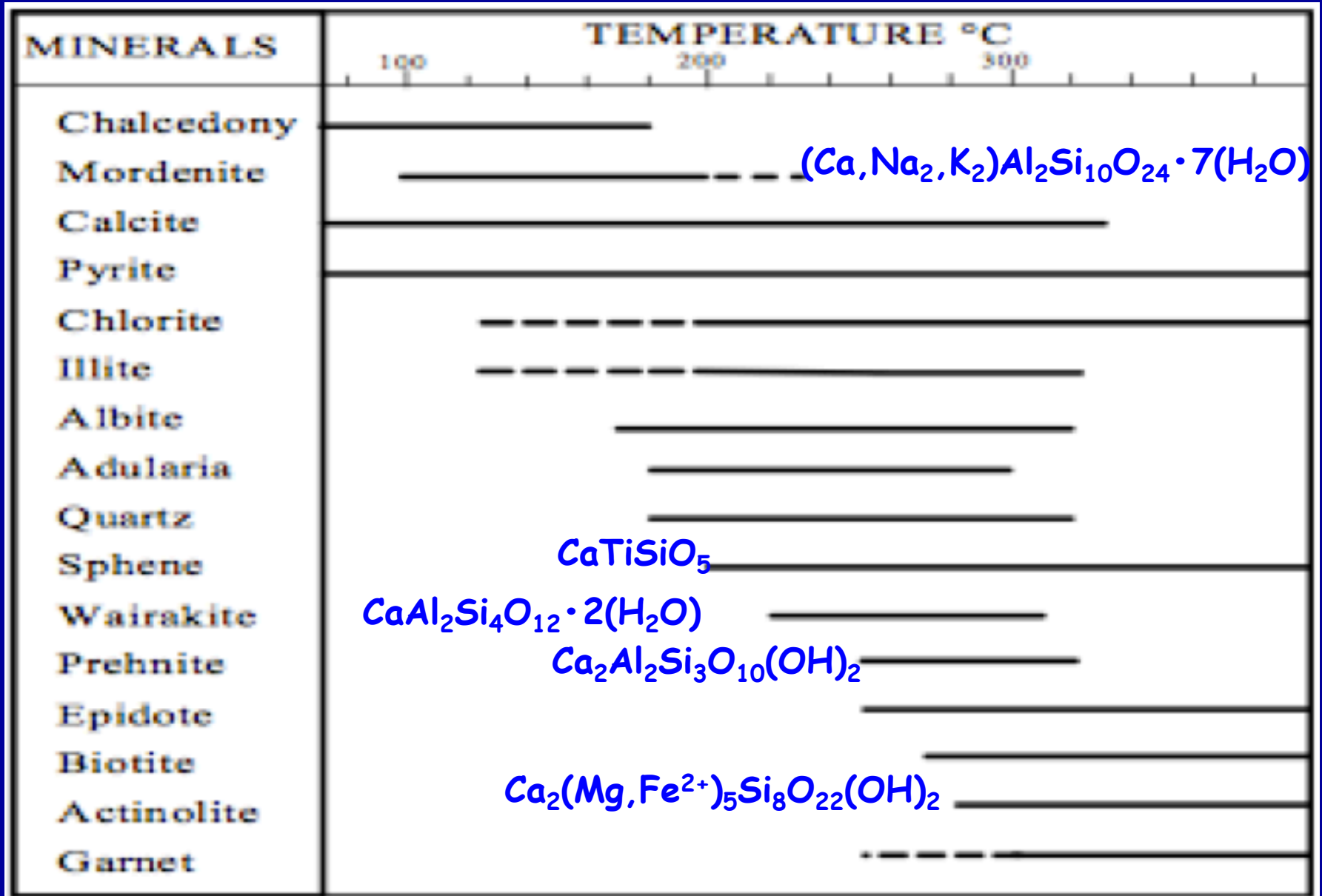


## L'Épidoto è un sorosilicato di alluminio e calcio.

L'Épidoto è prevalentemente di origine secondaria. Si ritrova anche nei prodotti di alterazione idrotermale di vari minerali (feldspati, mica, pirosseni, anfiboli, granati, ecc.) che compongono le rocce ignee.



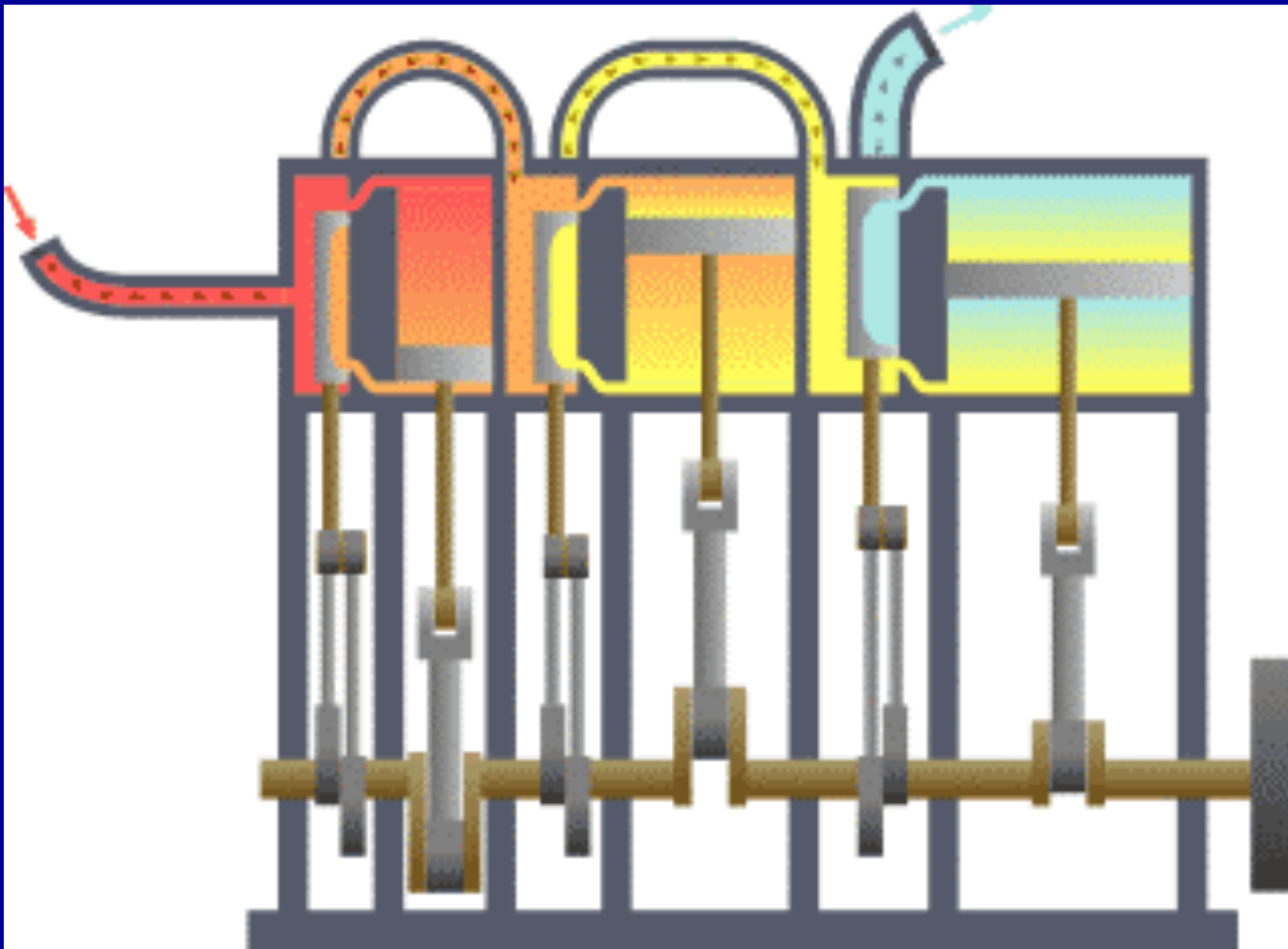
# Minerali come geotermometri!



# Caratteristiche mineralogiche e geochemiche per definire un campo geotermico:

- Assemblaggio mineralogico;
- Composizione geochemica delle miscele gassose;
- Composizione geochemica delle soluzioni acquose.

**Come facciamo a predire e  
a definire il  
comportamento delle  
soluzioni idrotermali (e  
non solo) e dei minerali  
che si possono formare?**



**TERMODINAMICA:** descrizione "quantitativa" delle trasformazioni subite da un sistema in seguito a processi che coinvolgono la trasformazione di calore in lavoro e viceversa.



La termodinamica comporta la predizione dello stato finale di un sistema e del percorso (processo) effettuato per raggiungerlo.

Predice anche quelle che sono le reazioni spontanee...quantificando la "spontaneità"



# Geochemistry and the environmental impact

1932

Reykjavik Using Fossil Fuels



Reykjavik Using Geothermal

1 libbra = 16 once = 0.45 kg

## CO<sub>2</sub> Emissions Comparison (lbs/MW-hr)



Megawatt (MW): 1.000.000 watt

Kilowattora (kWh): Misura dell'elettricità definita come un'unità di lavoro o energia, misurata come 1 kilowatt (1,000 watt) di potenza spesa per 1h!!

Una lampadina a 40 watt che opera per 25h usa 1 kwh!

Se l'energia è trasmessa o usata ad un tasso costante (potenza) per un periodo di tempo, l'energia totale è il prodotto della potenza in Kw per il tempo in ore.

1998; Bloomfield and Moore 1999

## Other substances released to the atmosphere

Hg emissions are from 45 to 900  $\mu\text{g}/\text{kWh}$  and comparable to those emitted by carbon fossil plants.

Rn emissions are 3,700–78,000 Bq/kWh.

Rn at the interface between soil and atmosphere are::

- 5.5 Bq/m<sup>3</sup> → Larderello
- 6.0 Bq/m<sup>3</sup> → The Geysers (California)

In non-geothermal areas, the mean value is 3.0 Bq/m<sup>3</sup>

Geothermal plants do not release NO<sub>x</sub>.

Land use: at Larderello 10,000 m<sup>2</sup> are occupied for a 20 MW<sub>e</sub>.

Noise: the fluid discharge from geothermal wells produces:

- 90–122 dB free-discharge
- 75–90 dB through silencing systems

(aircraft take-off: 125 dB at 60 m away from the runway).

### Solid waste

A 50 Mw<sub>e</sub> geothermal plant fed by a liquid-dominated reservoir may produce up to 24 ton di silica x day, which may contain toxic metals.