FUNDACIÓN BOTÍN

OBSERVATORIO DEL AGUA
WATER OBSERVATORY

Coloquios Observatorio del Agua

EL TERREMOTO DE LORCA

¿HAY RELACIÓN CON LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS?

Moderador:
Prof. Dr. Luis González de Vallejo. Catedrático de la UCM

Intervienen:
Prof. Dr. Ramón Capote del Villar, Catedrático de la UCM
Prof. Dr. Jose Jesús Martínez Díaz, Prof. Titular, UCM
Don Francisco Turrión Peláez, Conf. Hidrográfica del Segura

SISMICIDAD INDUCIDA POR FLUIDOS: CONCEPTOS, CAUSAS Y EJEMPLOS

Luis I. González de Vallejo
Universidad Complutense de Madrid

¿QUÉ SE ENTIENDE POR SISMICIDAD INDUCIDA?

La que se origina por actividades antrópicas

¿POR QUÉ SE CARACTERIZA?

1° Por presentar niveles de sismicidad superiores a los esperables de acuerdo con el registro sísmico y las fuentes sismogenéticas.

2° Por estar relacionada espacial y temporalmente con la fuente que la origina.

¿QUÉ SE ENTIENDE POR SISMICIDAD ANTICIPADA?

También conocida como "sismicidad desencadenada" ("*triggering seismicity*").

Es la que está relacionada con procesos antrópicos que aceleran el ciclo sísmico natural, dando lugar a terremotos de magnitudes del mismo orden o inferiores a los esperables en la zona.

La sismicidad natural y la anticipada no deben diferir en magnitud, pero sí en su recurrencia.

ACTIVIDADES ANTROPICAS QUE PUEDEN DAR LUGAR A SISMICIDAD INDUCIDA

1º Las relacionadas con los fluidos (agua, petróleo, gases, residuos químicos…)

- El llenado de embalses
- La inyección de fluidos
- La extracción de fluidos

2º Las explotaciones mineras a cielo abierto y subterráneas

3º Las explosiones nucleares

¿QUÉ MECANISMOS PUEDEN PRODUCIR SISMICIDAD INDUCIDA?

1º EL AUMENTO DE LAS PRESIONES INTERSTICIALES

2º LAS MODIFICACIONES EN EL ESTADO TENSIONAL

¿QUÉ PRINCIPIOS CONTROLAN ESTOS MECANISMOS?

a) EL CRITERIO DE ROTURA DE COULOMB (1776)

$$\tau = c + \sigma_n \, tg \, \phi$$

τ = resistencia al corte de un plano
c = cohesión
σ_n = tensión normal
ϕ = ángulo de rozamiento interno

b) EL PRINCIPIO DE LAS TENSIONES EFECTIVAS DE TERZAGHI (1925)

$$\sigma'_n = \sigma_n - u$$

σ'_n = tensión normal efectiva
u = presión intersticial

¿QUÉ PRINCIPIOS CONTROLAN ESTOS MECANISMOS?

c) LA TEORIA DE LA CONSOLIDACIÓN DE TERZAGHI-FRÖLICH (1936)

Establece las relaciones entre los cambios de volumen de un suelo y las tensiones por drenaje de las presiones intersticiales.

d) LA TEORIA DE LA POROELASTICIDAD DE BIOT (1941)

Establece las relaciones tridimensionales de las tensiones y deformaciones entre sólidos y fluidos en medios porosos; su aplicación es particularmente importante en la geomecánica de reservorios de gas y petróleo, además de otros ámbitos.

Table 1. Summary of stress change approaches (Harris, 2000)

Method	Parameters required	Successes	Problems
Static Coulomb failure stress (Elastic) ΔCFS	Mainshock static slip-model, μ', and $\Delta\sigma$, $\Delta\tau$, $\dot{\tau}$, on known fault planes and known slip-directions*.	$\Delta CFS > 0$ explains locations of aftershocks that do occur. $\Delta CFS < 0$ predicts shadows (timing and locations). May give rupture extent.	Many $\Delta CFS > 0$ faults do not experience subsequent large earthquakes, so it is hard to use $\Delta CFS > 0$ as a predictive tool. Does not predict size of impending aftershock. Does not explain delayed failure.
Dynamic Coulomb failure stress (Elastic) $\Delta CFS(t)$	Mainshock dynamic fault slip-model, μ', and $\Delta\sigma(t)$, $\Delta\tau(t)$ on known fault planes and known slip-directions*.	May predict rupture lengths, given fault geometry.	Does not explain long delays (> tens of seconds) between subevents. Needs more testing.
Static rate-and-state	Mainshock static slip-model, $\Delta\sigma$, $\Delta\tau$, σ, τ, $\dot{\tau}$, A, B, D_c, H, time of last event, recurrence interval (to determine slip speed).	Seems to predict aftershock duration.	Needs more testing. Rate-and-state parameters defined in the lab, but not known for the earth.
Dynamic rate-and-state	Mainshock dynamic fault slip-model, $\Delta\sigma(t)$, $\Delta\tau(t)$, σ, τ, $\dot{\tau}$, A, H, time of last event, slip speed.	May explain remote triggering.	Needs more testing. Still need to define rate-and-state parameters in the earth. Inertial terms not yet included in models.
Static Coulomb failure stress (Viscoelastic)	Mainshock slip-model, Maxwell relaxation time, relaxing layer thickness.	May explain time delays between mainshock and subsequent events, also irregular recurrence intervals.	Needs more testing, also needs more geodetic data to confirm viscoelastic parameters.
Fluid flow	Mainshock slip model, permeability tensor.	May explain time delays between mainshock and subsequent events.	May not be successful at predicting both the spatial and temporal aftershock patterns.

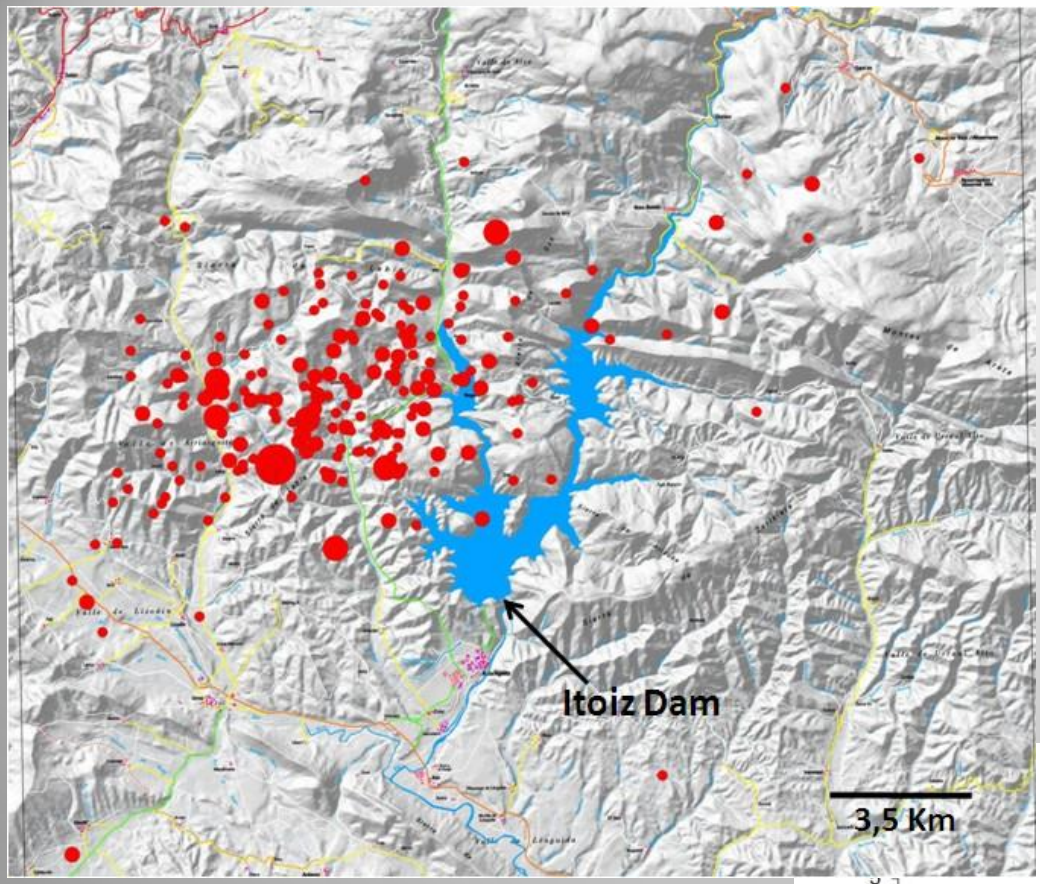
EJEMPLOS DE SISMICIDAD INDUCIDA POR FLUIDOS

LLENADO DE EMBALSES:

PRESA DE ITOIZ (NAVARRA)

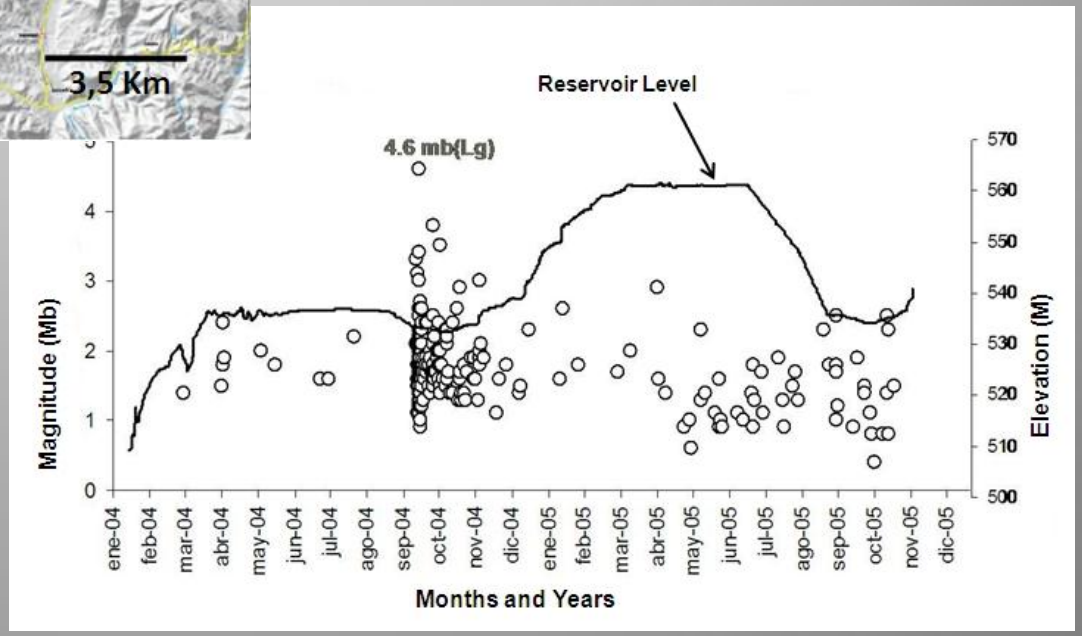
- Construida en 2004
- Altura presa: 122 m; capacidad de embalse: 418 Hm^3
- Numerosos terremotos durante el primer llenado
- $M_{máx} = 4,6$
- Cese progresivo de la sismicidad tras los primeros llenados
- Causas: aumento de las presiones intersticiales con disminución de la resistencia en fallas
- La sismicidad registrada responde al criterio de "sismicidad anticipada"

PRESA DE ITOIZ



Epicentres of earthquakes recorded during the first reservoir filling

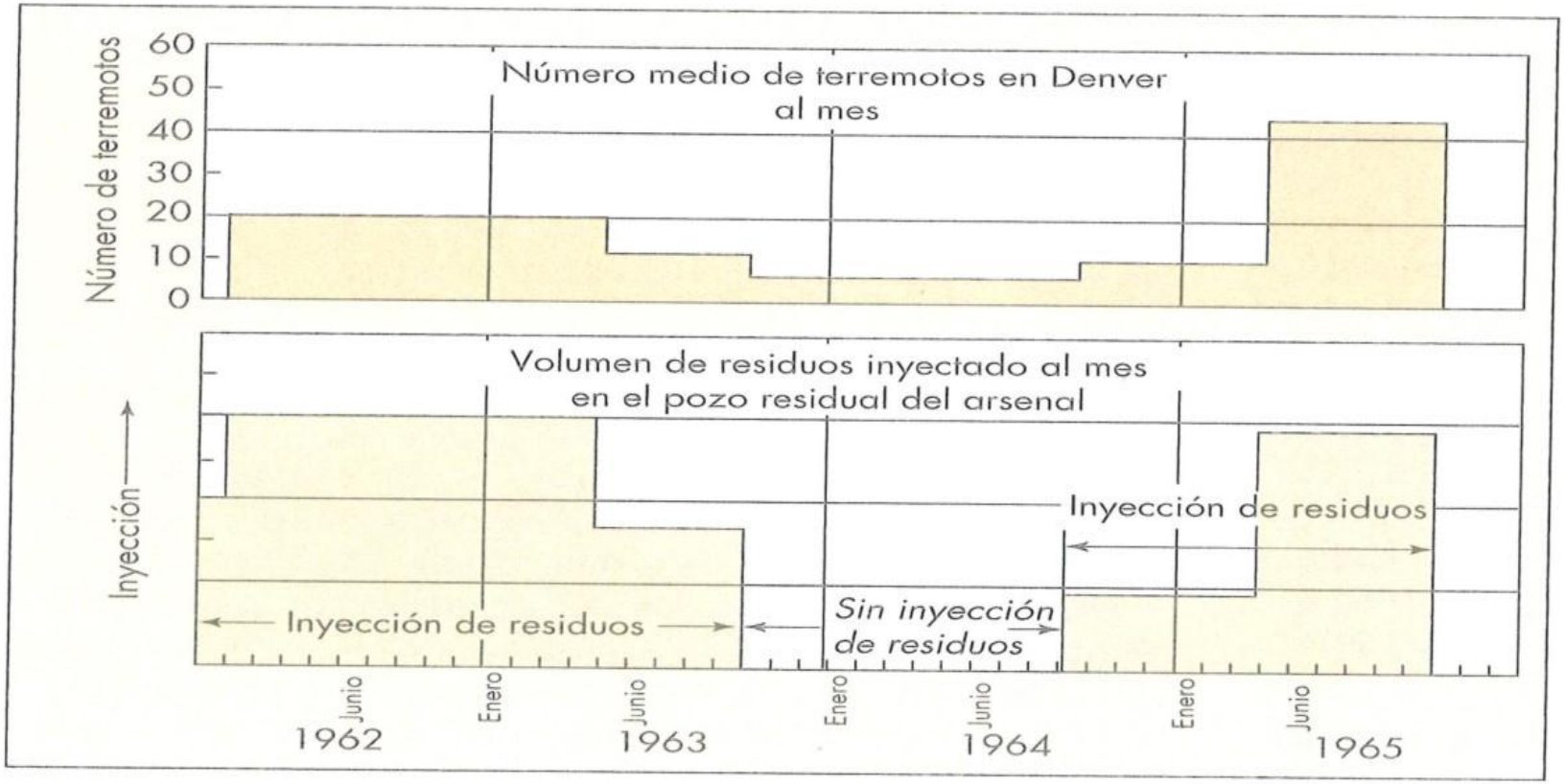
Earthquake magnitudes during the first reservoir filling



INYECCIÓN DE FLUIDOS

ARSENAL EN LAS MONTAÑAS ROCOSAS
Denver (Colorado)

- Inyección de residuos químicos a 3.500 m de profundidad
- Más de 700 terremotos registrados, M_{max} = 4,3
- Buena relación inyección – sismicidad
- Causas: Aumento de la presión intersticial y fracturación hidráulica con apertura de fracturas



(En Keller and Bodgett, 2006)

EXTRACCIÓN DE FLUIDOS

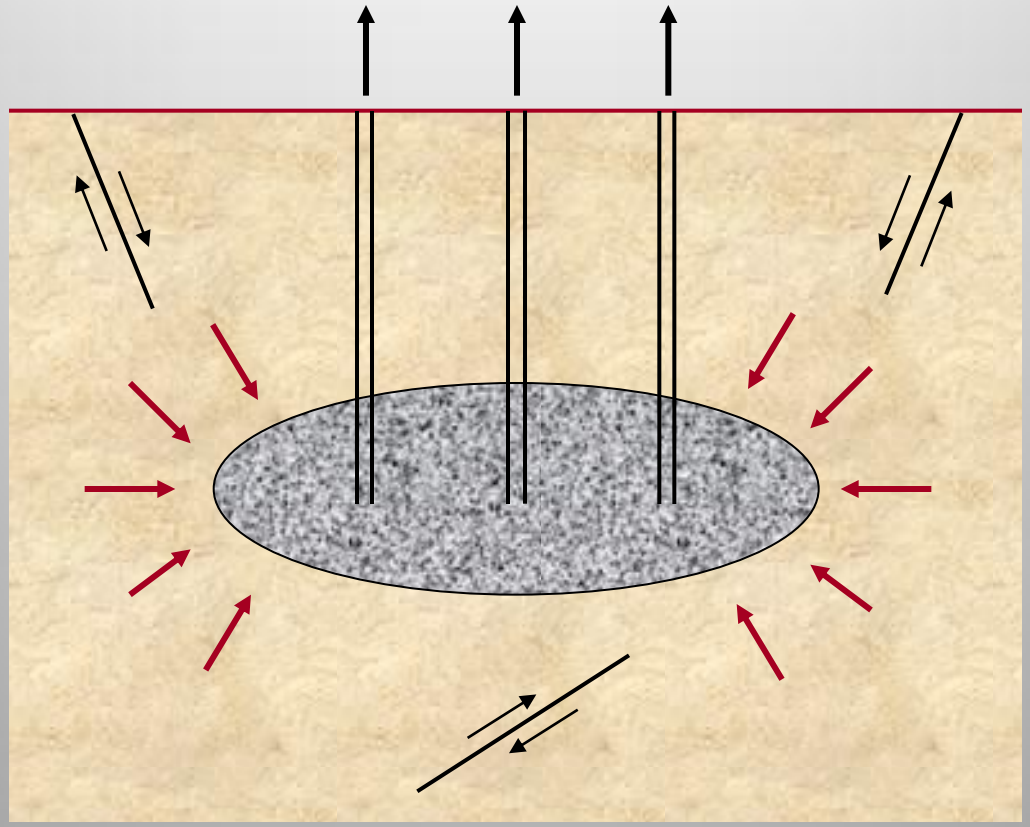
CAMPO DE GAS DE LACQ (Pau, Francia)

- Aumento de la sismicidad con la producción
- Más de 800 terremotos, M_{max} = 4.2
- Causas: Deformaciones inducidas en el reservorio dando lugar a fallas y fracturas

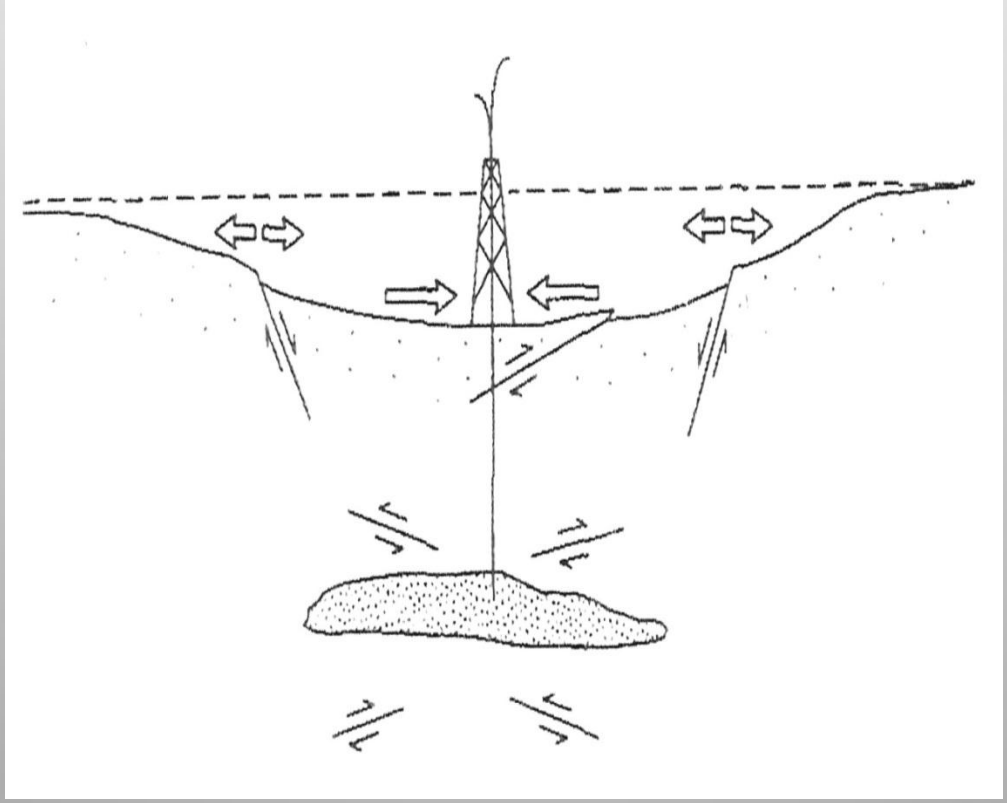
CAMPOS DE GAS Y PETRÓLEO DE GOOSE CREEK (Texas) y WILMINGTON (California):

- Subsidencias entre 1 y 9 m
- Buena correlación producción – sismicidad
- Numeroso terremotos, M_{max} = 4.0
- Causas: generación de fracturas inducidas por deformaciones en los reservorios.

Desplazamientos y fallas inducidos por extracción de fluidos



Modificado de McGarr, 2002



Desplazamientos y fallas asociados a extracción de gas y petróleo (Segall, 1989)

SOBRE EXPLOTACION DE ACUIFEROS EN CELAYA Y MORELIA (México)

Acuíferos de origen fluviolacustre de gran espesor, explotados durante décadas

- Subsidencias de hasta 9 m
- Fallas con desplazamientos en superficie
- Baja a moderada sismicidad
- No se han registrado relaciones entre la sismicidad, la subsidencia y la explotación de los acuíferos, después de más de 20 años de instrumentación geodésica y sísmica.

Efectos de la sobre-explotación:

- Descenso de los niveles freáticos
- Disminución de las presiones intersticiales
- Consolidación de sedimentos
- Subsidencia y fluencia (creep) a favor de planos de falla

Subsidencia por extracción de agua de pozos y a favor de fallas activas. Celaya, México.

RESUMEN

La sismicidad inducida por fluidos es causada por:

- Llenado de embalses
- Inyección o extracción de fluidos en explotaciones de gas y petróleo
- Extracción de fluidos en explotaciones geotérmicas

CUESTIONES QUE SE PLANTEAN EN TORNO AL TERREMOTO DE LORCA

¿Se han tenido en cuenta las variaciones de tensiones por descenso de niveles freáticos a lo largo del periodo de extracción, y su relación con la sismicidad registrada a lo largo de dicho periodo?

Al aplicar el criterio de rotura de Coulomb para determinar el incremento de esfuerzos en el segmento de falla movilizado por el terremoto de Lorca:
¿se han tenido en cuenta las limitaciones e incertidumbres de este criterio?

¿Responde este terremoto al concepto de sismicidad inducida?