

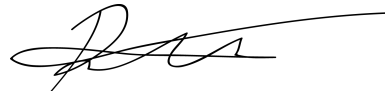
# Modelación Acoplada de Flujo y Geomecánica, y Evaluación de Sismicidad Inducida, en el Proyecto Castor de Almacenamiento de Gas

## Informe Final

---

**Ruben Juanes**

*Massachusetts Institute of Technology*



**David Castiñeira**

*Massachusetts Institute of Technology*



**Michael C. Fehler**

*Massachusetts Institute of Technology*



**Bradford H. Hager**

*Massachusetts Institute of Technology*



**Birendra Jha**

*Massachusetts Institute of Technology*



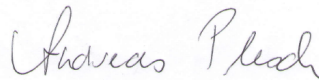
**John H. Shaw**

*Harvard University*



**Andreas Plesch**

*Harvard University*



April 24, 2017

## Resumen Ejecutivo

### Objetivos del Estudio

El Proyecto Castor transformó un antiguo yacimiento de hidrocarburos situado en el Mar Mediterráneo a 22 km de la costa en la provincia de Castellón (España) en un emplazamiento para el almacenamiento subterráneo de gas natural. Durante septiembre de 2013, unos días después del comienzo de inyección de gas a gran escala en Castor, la inyección se detuvo tras que se registrasen cientos de terremotos de pequeña magnitud en la zona este de la costa de Valencia. El objetivo general de nuestro proyecto es llevar a cabo un estudio integrado de geología estructural, sismología y geomecánica para evaluar el origen y carácter de la sismicidad que tuvo lugar durante septiembre-octubre de 2013, en relación con las operaciones de inyección en el Proyecto Castor.

Los objetivos específicos de nuestro estudio son:

1. Revisar y sintetizar la información geológica, geofísica y geomecánica disponible, así como datos operativos del yacimiento y el registro sísmico.
2. Emplear toda esta información para elaborar un modelo de la estructura geológica que incluya el sistema de la falla de Amposta, y fallas en el interior del yacimiento. Este modelo geológico estructural tridimensional (3D) constituye la base para dos líneas de investigación: (1) análisis sismológico, y (2) análisis acoplado de flujo y geomecánica.
3. Reanalizar los datos sismológicos, incluyendo la elaboración de un modelo de velocidades sísmicas de alta resolución, la relocalización de los eventos sísmicos, evaluación de la evolución de los hipocentros de la secuencia de terremotos en el espacio y en el tiempo, y una evaluación de los mecanismos focales para ciertos eventos seleccionados.
4. Crear un modelo computacional de flujo y geomecánica, incluyendo el sistema de la falla de Amposta y otras fallas del yacimiento. Mediante la evaluación de los cambios en la tensión de Coulomb en las distintas fallas potencialmente activadas por las operaciones de inyección, el modelo proporcionará una herramienta cuantitativa para el análisis *post mortem* de la secuencia de terremotos de septiembre-octubre, y para el análisis de riesgo sísmico en la zona. El modelo también permitirá examinar escenarios de inyección hipotéticos en el futuro, así como estrategias para mitigar la sismicidad en el caso de que el Proyecto Castor continúe sus operaciones.
5. Finalmente, integrar los resultados de los análisis geológico, sismológico, y de flujo-geomecánica en el modelo estructural 3D, y esclarecer los mecanismos y estructuras geológicas responsables de la sismicidad a raíz de las operaciones de inyección.

### Modelo de Estructura Geológica

Para analizar las operaciones en el yacimiento Castor en el contexto de fallas y sismicidad en la región, hemos elaborado un modelo exhaustivo de la estructura geológica. Este modelo proporciona una representación detallada de las propiedades y estructura del yacimiento Castor, enclavado en una descripción regional de las fallas consideradas como posibles fuentes de sismicidad en terremotos ya registrados o que lo puedan ser en el futuro.

También hemos desarrollado un modelo tridimensional de velocidades sísmicas ( $V_p$  y  $V_s$ ), que permita la conversión de los datos de reflexión sísmica a la profundidad correspondiente, de ese modo permitiendo constreñir la localización de terremotos.

Como parte integrante del análisis estructural, hemos evaluado las restricciones geológicas en la actividad tectónica del sistema de la falla de Amposta. El segmento sur de este sistema de fallas, y las ramificaciones de falla en el bloque colgante, están asociadas a un desplazamiento relativo de los estratos geológicos hasta el fondo marino, lo cual indica actividad tectónica reciente (período Cuaternario tardío, u Holoceno). Ello es congruente con estudios regionales y recopilaciones de fallas que han descrito la falla de Amposta como tectónicamente activa, con el segmento sur de la falla transfiriendo la deformación al conjunto de ramificaciones del bloque colgante que documentamos en nuestro estudio.

### Análisis de Sismicidad

Los objetivos principales de nuestro análisis de los registros sísmicos son los siguientes:

1. Revisar los resultados de análisis previos por parte de otros equipos;
2. Estimar la incertidumbre en la localización y mecanismos focales (tensor de momentos) de la secuencia de terremotos;
3. Determinar hasta qué punto la sismicidad puede asociarse a fallas incluidas en el modelo de la estructura geológica;
4. Evaluar la evolución de la secuencia de terremotos en el espacio y en el tiempo; y
5. Determinar la relación entre la sismicidad registrada y los cambios tensionales, en el espacio y en el tiempo, que predice el modelo geomecánico.

Nuestras conclusiones fundamentales del análisis de los datos sísmicos son las siguientes:

1. La sismicidad se inició en la cercanía de la plataforma Castor, extendiéndose rápidamente a una región espacialmente distribuida, y después contrayéndose a una zona delimitada, en la que se concentraron los 6 eventos de mayor magnitud, que tuvieron lugar una vez la inyección había cesado.
2. La liberación de energía sísmica está dominada por estos 6 eventos de mayor magnitud. Estos eventos están localizados muy próximos unos a otros, en el orden de unos pocos kilómetros, y tuvieron lugar a lo largo de un plano que buza hacia el Noroeste, que podría coincidir con la falla de Amposta. Nuestra relocalización de los eventos los sitúan en la cercanía de la plataforma Castor.
3. La mayor parte de los eventos pueden ser asociados con fallas representadas en el modelo geológico creado para este estudio.
4. La relocalización de eventos y las soluciones del tensor de momentos, dentro de su incertidumbre, son acordes con las obtenidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Nuestra solución más robusta del tensor de momentos indica un plano orientado hacia el Noroeste, alineado con la orientación de los segmentos tectónicamente activos del sistema de la falla de Amposta.
5. Existe muy escasa evidencia de que ninguno de los eventos de mayor magnitud hayan ocurrido en una falla buzando hacia el Este con baja inclinación.

## Análisis Acoplado de Flujo y Geomecánica

Hemos desarrollado un modelo de simulación que acopla el flujo en el yacimiento debido a la extracción e inyección de fluidos con la deformación y cambios tensionales en la roca. El modelo computacional está fundamentado en la teoría de poromecánica acoplada, y emplea una malla no-estructurada que se adapta a las fallas y superficies estratigráficas identificadas en el modelo geológico. El modelo incorpora en detalle los transitorios de producción e inyección de fluidos durante toda la vida operacional del yacimiento. Ello permite un ajuste histórico del modelo, y una calibración de los parámetros del mismo, que confiere confianza a las predicciones.

Nuestro análisis acoplado de flujo y geomecánica redonda en la simulación cuantitativa y dinámica del impacto de las operaciones subterráneas (producción de petróleo e inyección de gas) en las tensiones que actúan sobre las fallas incluidas en el modelo. Los resultados fundamentales de nuestro estudio de simulación son los siguientes:

1. La falla de Amposta está sujeta a una desestabilización significativa debido a la inyección, con un valor máximo del cambio en la tensión de Coulomb (DCFF, por las siglas en inglés de “Delta Coulomb Force Function”) alrededor de 0.5 MPa.
2. Las fallas situadas en el bloque colgante de la falla de Amposta también se ven desestabilizadas (valor máximo de DCFF en torno a 0.04 MPa), a pesar de que no están sujetas directamente a cambios de presión de poro—sin embargo, las tensiones sobre las fallas se ven alteradas debido al mecanismo poroelástico: transferencia de tensiones por cambios volumétricos inducidos por la inyección en el yacimiento.
3. Las fallas más desestabilizadas, según el modelo, son fallas internas al yacimiento y en proximidad a la falla de Amposta (máximo DCFF  $\sim$  0.4 MPa). Todas estas fallas son de alto ángulo (casi verticales).
4. Otras fallas situadas más alejadas de la plataforma Castor están sujetas a cambios muy pequeños en la tensión de Coulomb. Éste es el caso, por ejemplo, de la falla EastBounding (conocida en informes anteriores como la “falla Castor”), la cual está sometida, según nuestro modelo acoplado de flujo y geomecánica, a un valor máximo de DCFF  $<$  0.002 MPa.

Hemos llevado a cabo un análisis acoplado de flujo-geomecánica para otros escenarios hipotéticos de inyección. El análisis demuestra que el máximo DCFF se reduce al reducir la tasa de inyección (y, consecuentemente, el volumen inyectado). También hemos simulado un escenario más complejo que simula la inyección de gas a un tasa más alta, seguida de la recuperación del gas inyectado y de un ciclo más de inyección. Nuestro modelo sugiere que este escenario da lugar a una mayor desestabilización (aproximadamente duplicando el valor máximo del DCFF) en la falla de Amposta y otras fallas del yacimiento.

## Conclusiones

La integración de los resultados de los análisis geológico, sismológico, y de flujo y geomecánica, nos permiten establecer las relaciones potenciales entre las fallas regionales, la secuencia de terremotos de septiembre-octubre de 2013, y las operaciones en el almacenamiento subterráneo Castor. De nuestro análisis integrado, extraemos las siguientes conclusiones:

1. Los hipocentros de los terremotos, según han sido determinados en nuestro estudio, son congruentes con actividad sísmica en el sistema de la falla de Amposta, sus ramificaciones, y fallas en el yacimiento próximas a los pozos de inyección.
2. Los hipocentros de los primeros eventos de la secuencia están localizados cerca del yacimiento, a los que sigue una secuencia de terremotos agrupados a lo largo de, y hacia el Oeste de, los segmentos tectónicamente activos de la falla de Amposta y sus ramificaciones en el bloque colgante.
3. Los mecanismos focales del terremoto principal (1 de octubre de 2013) son congruentes con la orientación de la falla de Amposta, sus ramificaciones, y fallas de alta inclinación dentro del yacimiento.
4. Muchos de los terremotos relocalizados se encuentran en zonas de las fallas desestabilizadas por las operaciones de inyección de gas. En particular, nuestro modelo acoplado de flujo y geomecánica sugiere que la falla de Amposta, alguna de sus ramificaciones, y varias de las fallas del yacimiento próximas a Amposta, fueron desestabilizadas de forma significativa por la inyección de gas, estando sujetas a cambios en la tensión de Coulomb de hasta 0.5 MPa. Por contra, la falla EastBounding (denominada “falla Castor” en algunos informes), experimentó cambios en tensión de Coulomb  $< 0.002$  MPa. Como valores de referencia, se considera que una falla entra en riesgo de ser desestabilizada cuando los cambios en la tensión de Coulomb son del orden de 0.01 MPa – 0.1 MPa, y quizás incluso menores (estos valores son típicos de las caídas de tensión asociadas a terremotos).
5. Los seis eventos de mayor magnitud (M 3.8 a 4.3) ocurrieron de forma tardía en la secuencia, una vez que la inyección de gas había cesado. Estos eventos están agrupados en una región delimitada del sistema de la falla de Amposta que está sujeta a una desestabilización sustancial debido a la inyección de gas.
6. Otros terremotos se localizan en zonas al Oeste y al Sur dentro del sistema de la falla de Amposta, en áreas que no han sido afectadas de forma significativa por las operaciones de inyección.

En base a estas observaciones, sugerimos el siguiente escenario para la secuencia de eventos sísmicos:

1. La inyección de gas desencadenó sismicidad en fallas del yacimiento y en segmentos próximos del sistema de la falla de Amposta.
2. Estos terremotos, a su vez, causaron sismicidad en el sistema de la falla de Amposta y posiblemente otras fallas del yacimiento a raíz de cambios tensionales estáticos o dinámicos, teniendo lugar incluso mucho después del cese de la inyección (“secuencia de réplicas”). Esta secuencia incluyó el mayor de los terremotos, el cual ocurrió en segmentos del sistema de la falla de Amposta desestabilizados por la inyección.
3. Los terremotos ocurrieron mayormente en la franja tectónicamente activa (segmento sur) de la falla de Amposta, y sus ramificaciones en el bloque colgante.

## Recomendaciones

Simulaciones adicionales de escenarios de inyección hipotéticos sugieren que—aún cuando menores tasas de inyección reducen los valores máximos de los cambios en tensión de Coulomb en las fallas de Amposta y otras fallas del yacimiento—dichos valores siguen siendo altos e incurren en riesgo de inducir eventos sísmicos. En particular, el máximo en el cambio de tensión de Coulomb para el caso de un ciclo completo de inyección y recuperación de gas es mayor que el correspondiente al análisis *post mortem*.

Todo ello apunta a un riesgo elevado de reanudar las operaciones de almacenamiento de gas en Castor:

1. Es probable que los eventos de  $M \sim 4$  hayan acercado a ciertos segmentos del sistema de la falla de Amposta a su desestabilización debido a cambios estáticos de tensión: estos eventos sísmicos pueden haber incrementado la tensión de Coulomb, sin haber disipado el momento actuando en la falla.
2. Dada la estructura de las fallas, y los antecedentes de desestabilización, existe la posibilidad de terremotos de magnitud significativamente mayor a los registrados. Cabe mencionar que—basándose en relaciones estándar de escalado entre área de ruptura a magnitud del terremoto—la ruptura completa de la falla de Amposta en el área de nuestro estudio podría provocar un terremoto de magnitud  $M \geq 6.8$ .
3. Es extremadamente complicado definir límites de operatividad segura y fiable en términos de presiones, tasas o volúmenes de inyección.

En el caso de que se determine la reanudación de las operaciones de almacenamiento, recomendamos las siguientes medidas:

1. Despliegue de una red de estaciones sísmicas en el fondo marino más cercanas a la plataforma, y con una mucho mejor cobertura acimutal que la red existente.
2. Incremento paulatino de la inyección en varias fases, con un análisis específico de la sismicidad, presión de yacimiento, y recalibración del modelo geomecánico, tras cada fase.
3. Puesta en funcionamiento de un protocolo de acciones a tomar en el caso de que se registre sismicidad, o de que la sismicidad se incremente durante la inyección (e.g., un sistema de ‘semáforos’).

Por último, es importante enfatizar que el presente estudio corresponde a una evaluación *post mortem* del Proyecto Castor, en la que hemos empleado nuevos paradigmas para la integración de geología, geofísica y geomecánica de yacimientos. Por ello, no cabría esperar que un estudio realizado con metodologías estándar en la industria hubiese llegado a estas conclusiones antes de la inyección. Nuestro estudio, de todas formas, demuestra la necesidad de *nuevos estándares* para la cuantificación de riesgos sísmicos asociados a operaciones subterráneas, especialmente en zonas con fallas tectónicamente activas.