



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente  
Convocatoria 2014

Proyecto nº 241

**El modelado analógico como recurso didáctico en Geología Estructural**  
*José A. Álvarez Gómez*

Facultad de Ciencias Geológicas  
Departamento de Geodinámica

## **1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto**

Los objetivos iniciales del proyecto han sido:

1. Diseño de una maquina sencilla de modelos análogos para docencia en Grado en las asignaturas de Geología Estructural y Tectónica.
2. Diseño de una maquina avanzada de modelos análogos para docencia en Máster y Trabajo de Fin de Máster.
3. Construcción de las máquinas en colaboración con el CAI de Talleres de Apoyo a la Investigación.
4. Diseño de lecciones específicas para las diferentes asignaturas con la utilización de máquinas de modelos análogos en laboratorio.

## **2. Objetivos alcanzados**

De los objetivos propuestos inicialmente en el proyecto, debido principalmente al importante recorte en la financiación del proyecto, sólo han podido realizarse aquellos relativos al diseño y construcción de las máquinas sencillas de modelos análogos con el objetivo de laboratorio docente para asignaturas de Grado. El diseño y construcción de la máquina para modelos avanzados de utilidad en la docencia en máster no ha sido posible.

El objetivo principal del proyecto, que era la creación de un laboratorio de modelos análogos para docencia, se ha cumplido a la perfección gracias a la colaboración del departamento de Geodinámica de la Facultad de Geología, que ha cedido un aula para dotar de espacio adecuado al laboratorio. Además, gracias a la aportación de financiación externa al proyecto, en conjunto con otros proyectos de investigación realizados en el departamento, hemos podido dotar de material el laboratorio, incorporando incluso un sistema de registro de los experimentos mediante una cámara digital.

El laboratorio ha sido ya utilizado para la realización de un Trabajo de Fin de Grado que obtuvo una calificación de sobresaliente.

### **3. Metodología empleada en el proyecto**

Para el diseño de la máquina se realizaron diversas reuniones; algunas con dinámica de lluvia de ideas y otras más técnicas para tomar decisiones sobre aspectos específicos del diseño de la máquina. En la etapa final de construcción de la máquina la colaboración del personal del CAI de Talleres de Apoyo de la UCM fue muy importante, ya que en la etapa constructiva se aportaron soluciones a problemas no previstos.

A la hora de seleccionar los materiales análogos a utilizar se realizó una revisión bibliográfica sobre el estado del arte en el tema para así poder decidir con el mejor criterio. El objetivo era encontrar materiales de contrastada eficacia como análogos de deformaciones litosféricas, pero que al mismo tiempo tuvieran un coste reducido para poder ser mantenidos en el tiempo sin depender de inversiones importantes externas.

Los materiales elegidos finalmente fueron la arena de sílice de 200 micras y el yeso Iberfino® - SN de Placo® con granulometría de 0.2. La utilización del yeso mezclada con arena se ha mostrado efectiva para modelar deformaciones en rocas cohesivas como carbonatos. Las arenas fueron analizadas en el laboratorio de Ingeniería Geológica del Departamento de Geodinámica para comprobar su idoneidad como material análogo.

Finalmente como método para poner a punto las máquinas y comprobar la adecuación de los materiales se realizaron una serie de modelos enmarcados en el trabajo de fin de grado de una alumna de la facultad. Estos modelos trataban de reproducir a escala de laboratorio las observaciones estructurales efectuadas en trabajo de campo y cartografiadas a escala 1:10000. Se realizaron modelos escalados geoméricamente utilizando diferentes materiales para simular la deformación en capas de carbonatos. Finalmente se demostró que la utilización de la mezcla de arena y yeso al 50% para modelar los carbonatos cretácicos permite simular correctamente las características observadas en campo.

#### 4. Recursos humanos

Todos los miembros del equipo participaron en las reuniones iniciales de lluvia de ideas para llegar a un consenso en el tipo de máquina y características que debía presentar. Los profesores participantes fueron:

Jorge Alonso Henar  
José A. Álvarez Gómez  
Ramón Capote  
José L. Granja Bruña  
Juan M. Insua Arévalo  
Alberto Jiménez Díaz  
José J. Martínez Díaz  
Martín J. Rodríguez Peces  
Ignacio Romeo  
Javier Ruiz  
Rosa M. Tejero  
Meaza Tsigé

En las tareas de diseño y discusión de los detalles constructivos participaron especialmente: Jorge Alonso Henar, José A. Álvarez Gómez, José J. Martínez Díaz, Juan M. Insua Arévalo e Ignacio Romeo; profesores de las asignaturas de Geología Estructural y Tectónica. Especialmente relevante ha sido la colaboración del estudiante de doctorado Jorge Alonso Henar, cuya experiencia en la elaboración de este tipo de modelos ha sido decisiva para la consecución final del proyecto.

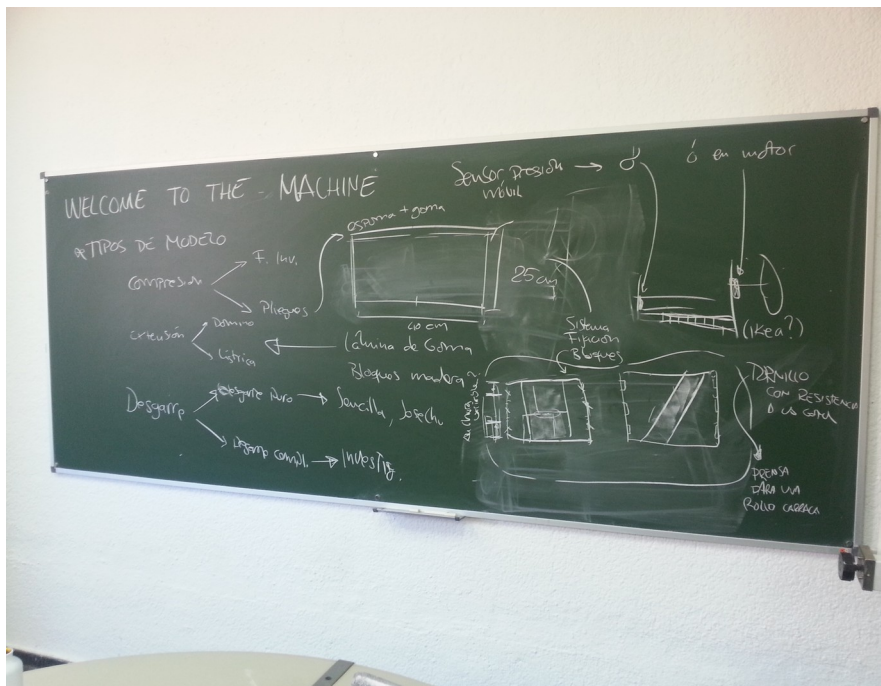
El montaje del laboratorio como espacio docente fue realizada por José A. Álvarez Gómez con la colaboración de Jorge Alonso Henar y Rosa Tejero, directora del departamento de Geodinámica.

## 5. Desarrollo de las actividades

### Diseño y construcción de la máquina de modelos

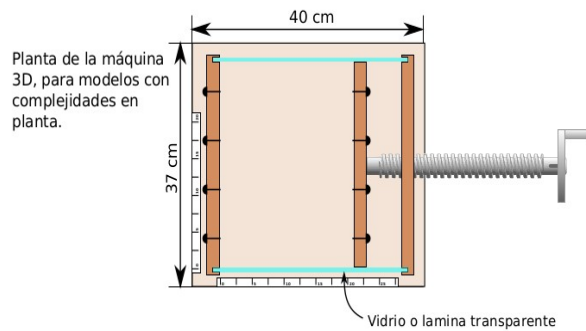
Se realizaron una serie de reuniones de lluvia de ideas y más tarde de discusiones técnicas para concretar el diseño de la máquina de análogos. En la Figura 1 se muestra la pizarra sobre la que se plasmó la discusión acerca del diseño final de la máquina. Finalmente se optó por diseñar dos máquinas con diferentes tamaños, una más ancha susceptible de ser utilizada en docencia de Tectónica, y otra estrecha para realizar experimentos de deformación pseudo-2D en Geología Estructural.

El método de aplicación del acortamiento/estiramiento elegido fue el de tornillo sin fin unido mediante una fijación con rodamientos a la pared móvil del dispositivo. Esta solución simplificaba la construcción de la máquina y su manipulación, además de ser una solución contrastada utilizada clásicamente en este tipo de máquinas. Esta solución sin embargo presenta ciertos problemas que deben ser tenidos en cuenta a la hora de interpretar los resultados. Debido a la forma de empuje puntual sobre una superficie, esta superficie (la pared móvil) puede sufrir leves alabeos que den lugar a acortamientos diferenciales en su contacto con el material análogo. Este tipo de efectos suponen un acortamiento relativo mínimo ( $< 1\%$  del acortamiento total) y suelen ser tomados como efectos de borde sin mayor relevancia.

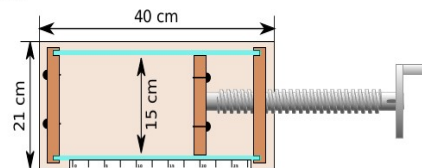


*Figura 1: Instantánea de la pizarra que se utilizó como base para la lluvia de ideas sobre el diseño de la máquina de modelos análogos.*

Se realizó un esquema a escala del diseño de las máquinas que fue discutido con el personal del CAI de Talleres que finalmente construyó las máquinas (Figura 2). Durante su construcción se tomaron algunas decisiones para mejorar el diseño o corregir mecanismos que pudieran dar lugar a problemas durante la utilización de las máquinas.



Planta de la máquina 2D, para modelos con deformación exclusiva vertical.



Alzado de la máquina.

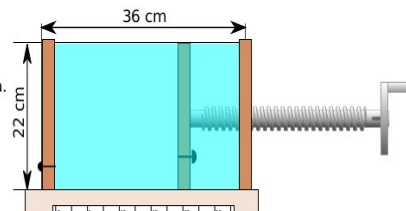


Figura 2: Diseño final de las máquinas de análogos para tectónica (superior) y Geología Estructural (inferior).

Se construyeron un total de 6 máquinas, 4 pequeñas y 2 grandes (Figura 3), que fueron financiadas con otros proyectos de investigación dado que el presupuesto de este proyecto ha sido muy reducido. Con el presupuesto de este proyecto se optó por adquirir una cámara digital y accesorios fotográficos para registrar los experimentos (Figura 4).

### Selección de materiales análogos

Se realizó una revisión bibliográfica en artículos sobre modelos análogos con la intención de buscar las características mecánicas de los diferentes materiales utilizados y proceder a buscar materiales semejantes con costes reducidos para poder garantizar la utilidad de las máquinas de modelos independientemente del presupuesto disponible.

Podemos dividir los materiales a utilizar en dos grandes grupos, los que vamos a utilizar para modelar deformación elástica (es decir, no influye la velocidad de deformación en el resultado obtenido) y los que se utilizan para deformación viscoelástica, en los que la velocidad de deformación es un factor clave. Estos segundos materiales, por sus características, son mucho más caros y difíciles de encontrar; tratándose además de siliconas tóxicas que hacen necesaria una adecuación del laboratorio para trabajar con ellas. Por estos motivos decidimos centrarnos finalmente en modelos elásticos, que para labores docentes son suficientes.

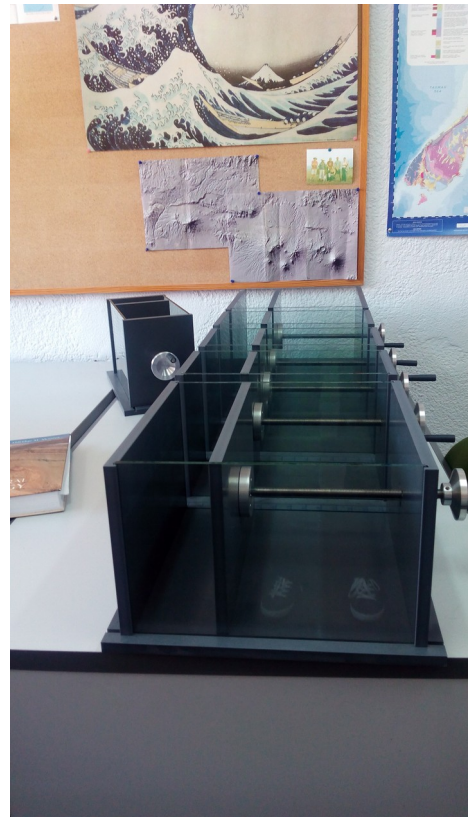
El material más utilizado es sin duda la arena de sílice, con granulometrías de unos 0.2 mm. Tras hacer una búsqueda en distribuidores de materiales de construcción y en abrasivos localizamos una empresa de distribución de arenas en Madrid (Silices Madrid) que tenían el producto que buscamos, arena de sílice de 0.2 mm. Hemos adquirido 150 kg de material al que hemos procedido a hacer un análisis granulométrico (ver anexo). Gracias al análisis granulométrico podemos confirmar las características idóneas de estas arenas para el modelado análogo.

Además de las arenas hemos buscado materiales con cohesión que nos permita modelar procesos de fracturación en extensión, lo que las arenas no permiten al tener cohesión nula. Tras la búsqueda bibliográfica vimos que en algunos laboratorios utilizan hemihidrato de yeso ya que este presenta cohesión. Este hemihidrato es el utilizado en construcción, pero necesitábamos unas características granulométricas que normalmente no se cumplen (los tamaños de grano suelen ser mayores de 0.5 mm). Finalmente encontramos un producto comercializado por Placo® como Iberfino®, que es hemihidrato de yeso de granulometría fina (< 0.2 mm). Su bajo coste y características lo hacen un material idóneo para el modelado análogo.

#### Prueba de adecuación de materiales y funcionamiento de las máquinas

Para comprobar el correcto funcionamiento de las máquinas y la elección de materiales decidimos hacer una serie de experimentos en el desarrollo de un trabajo de fin de Grado en Geología. La alumna Marta Magán ha desarrollado su trabajo en el área de Pedraza, en el límite norte del sistema central, en su cabalgamiento sobre la cuenca del Duero. En su cartografía se presentaba una estructura de tipo pop-down generada a favor de una fallas heredadas de la orogenia varisca y reactivadas durante la orogenia alpina. Utilizamos los modelos análogos para tratar de reproducir las estructuras descritas en campo en el laboratorio. Hicimos unos modelos con escalado geométrico (potencia de los estratos) y dinámico (orientación de los esfuerzos máximos horizontales) variando el material utilizado para simular los carbonatos cretácicos de la cuenca del Duero. Finalmente se logró reproducir las estructuras mediante la utilización de una mezcla de yeso y arena para simular los carbonatos.

Durante la ejecución de los experimentos pudimos hacer ajustes a las máquinas y establecer un protocolo de montaje y ejecución de los modelos (Figura 4).



*Figura 3: Máquinas de modelos análogos preparadas para ser trasladadas al laboratorio.*



*Figura 4: Configuración y preparación de un experimento análogo de estructuras geológicas en régimen compresivo. Este experimento formó parte de un trabajo de fin de grado. Se aprecian las capas de diferente material sobre un basamento rígido (en azul). La cámara digital se utiliza para registrar la progresión de la deformación, que es cuantificada mediante el uso de un fondo milimetrado como sistema de referencia estático solidario con la máquina.*



## 6. Anexos

### Análisis granulométrico de las arenas de sílice utilizadas como material análogo

Abertura	Gramos retenido	Gramos total	%
2.00	0.00	516.37	100.00
0.30	12.91	503.46	97.50
0.17	131.02	372.44	72.13
0.12	207.61	164.83	31.92
0.06	152.81	12.02	2.33
0.00	10.61	1.41	0.27

