



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2020/2021

Nº 301

Aplicación didáctica de modelos 3D para la observación de las formas del terreno ligadas a su dinámica superficial. Implementación de resultados de modelos dinámicos reales (flumes) y topografía LiDAR en software SIG e impresoras 3D.

Julio Garrote Revilla

Facultad de Geología

Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto
2. Objetivos alcanzados
3. Metodología empleada en el proyecto
4. Recursos humanos
5. Desarrollo de las actividades
6. Anexos

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

Este proyecto de innovación docente (Proyecto INNOVA-Docencia 2020/21 - Nº 301), continuación del proyecto INNOVA-Docencia 2019/20 - Nº 38, tiene dos grandes objetivos: a) enseñanza de formas y procesos geomorfológicos y b), el aprendizaje de técnicas de obtención de datos, fundamentales en el ámbito laboral.

a) El primero de los objetivos, una vez el modelo a escala de río (flume) fue construido en el proyecto INNOVA-Docencia 2019/20 - Nº 38, ha sido mostrar a los alumnos el funcionamiento de la dinámica fluvial como medio efectivo de transformación de la superficie del terreno (debido a los procesos de erosión y sedimentación fluvial) y modelación del paisaje. Para lograr este objetivo, se proponen varias configuraciones iniciales de un tramo de cauce (modificando principalmente el grado de sinuosidad inicial del cauce, y su pendiente longitudinal).

b) Para lograr el segundo de los objetivos, se introducirá a los alumnos en el técnica de la fotogrametría digital de detalle, también denominada SfM (del término en inglés "*Structure from Motion*"), en la que a partir de la toma de fotogramas digitales y mediante el uso de programas de fotogrametría, se generarán modelos digitales del terreno que permitirán la comparación de la superficie del flume en diferentes instantes temporales de las simulaciones (instantes inicial – medio – final). De tal forma que posteriormente esos modelos digitales del terreno (MDT) se implementarán dentro de un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica) para la estimación y delimitación espacial de las zonas modificadas a lo largo de la simulación (zonas de predominio de los procesos de erosión o de sedimentación fluvial).

Los objetivos planteados se desarrollan a partir de una idea central, que es que la enseñanza y aprendizaje de la geomorfología y sus procesos asociados requiere de una notable visión tridimensional y espacial. Sin embargo, en muchos casos no es sencillo trasladar el conocimiento geomorfológico a través de gráficos tradicionales (2D) o fotografías, pues en ellos se pierde la componente tridimensional de las formas en la naturaleza, así como una posible cuarta componente ligada al tiempo. En ocasiones, y aunque el alumno llega a comprender los conceptos teóricos, es difícil para el docente abordar la aplicación real o práctica de dicha teoría. Sin duda, el trabajo en las salidas de campo es un buen momento para tratar de observar los procesos geomorfológicos, pero con sólo dos excursiones por asignatura no hay posibilidad de analizar la multitud de casos reales que se imparten en clase. Además, la duración de las salidas de campo (de uno o varios días) es ínfimo desde un punto de vista geológico, pues la duración o el tiempo en que tienen lugar la formación de elementos asociados a la dinámica superficial de la tierra es infinitamente mayor (de ahí la incapacidad de abordar esa cuarta componente temporal de los procesos geomorfológicos); aun siendo aquellos ligados a la dinámica fluvial (migración lateral de un cauce, el estrangulamiento de

un meandro o los procesos de erosión en las cabeceras fluviales) posiblemente de los más rápidos en su formación, pero siempre a una escala de tiempo no asumible.

En definitiva, la posibilidad de observar de manera directa los procesos de erosión – transporte – sedimentación fluvial, que dan lugar a la formación de morfologías erosivas o sedimentarias, es realmente complicada. Sin embargo, a través de la utilización de un flume y en una escala de tiempo real, se puede modelizar la dinámica de un tramo de río modificando las variables principales que controlan un sistema fluvial real, esto es: gradiente, caudal líquido, carga sólida, tamaño de sedimento, etc. Permitiendo al docente enseñar la dinámica fluvial en tiempo real: procesos de formación, modificación y destrucción de estructuras morfológicas, y de las formas resultantes que sí podemos observar en la naturaleza de manera estática.

Además, como parte del aprendizaje, se incorporará a las Prácticas de Laboratorio de las asignaturas del Área de Geodinámica Externa el manejo del flume y de los registros cualitativos y cuantitativos resultantes del mismo: a) fotografías y videos de los procesos y formas ligadas a la dinámica fluvial; b) la generación de modelos digitales del terreno mediante fotogrametría digital de detalle y su posterior análisis en un entorno SIG (herramienta fundamental para un geólogo y cualquier profesional que se dedique a la evaluación de impacto, ordenación del territorio y análisis de riesgos geológicos). En este caso particular, la combinación de un modelo a escala con las técnicas de captura de datos comentadas permitirá la generación de modelos digitales del terreno seriados en el tiempo (ej. Situación inicial – Intermedia – Final), de tal forma que se podrá analizar la evolución de las formas en conjunto: fase inicial o embrionaria, fase de desarrollo, fase de madurez, y fase de erosión o desmantelamiento. Para esos análisis, y dentro del entorno SIG, la utilización de la herramienta GCD (*Geomorphic Change Detection*) permite simplificar estos análisis a la vez que proporciona unas salidas gráficas estandarizadas de fácil asimilación por los alumnos.

Los alumnos serán guiados por los profesores en todos los pasos del proceso, desde la adquisición de fotografías digitales de detalle encaminadas a la generación de modelos 3D, pasando por la elaboración de los Modelos Digitales del Terreno a partir de la técnica fotogramétrica, y finalmente el análisis cuantitativo de estos MDTs y de sus diferencias. Por último, la impresión 3D de los modelos (MDTs) añade un valor visual considerable al trabajo, además de servir de material didáctico para las clases. Un modelo 3D impreso permite visualizar desde todos los ángulos las variaciones topográficas ocurridas entre los distintos modelos, y por tanto seguir y “tocar” dichas modificaciones. Por último, y en la medida de lo posible, se generaran videos *time-lapse* de las metodologías utilizadas, lo cuales serán añadidos a los canales de difusión más utilizados por el alumnado, como son las redes sociales.

2. Objetivos alcanzados

Modelización de tramos de cauce en el flume. Las características particulares del flume construido han condicionado el tipo de modelos de cauce que se han podido desarrollar. En concreto, la utilización de arena silíceo (en función de la densidad de la misma) ha limitado el desarrollo de los modelos asociados a aquellas tipologías de cauce menos energéticas, como son las de los cauces sinuosos. Así pues, utilizando este tipo de sedimento y configurando el resto de variables (principalmente la pendiente longitudinal del cauce) de acuerdo a las características de los cauces sinuosos o meandriformes, la energía del flujo no permitía el transporte de partículas de arena impidiendo pues los procesos de erosión – transporte – sedimentación. Mientras que si se incrementaba la pendiente longitudinal para provocar un incremento de energía en el canal, esto provocaba una paulatina disminución de la sinuosidad del cauce por procesos de corta de meandros.

Para otras configuraciones de cauce de mayor energía del sistema, como por ejemplo los cauces de tipo “braided”, el funcionamiento del flume ha sido óptimo. Así, independientemente de la forma inicial del canal, se ha podido observar con los alumnos como bajo estas condiciones de mayor energía (ligada a la pendiente longitudinal del canal) el cauce tendía a incrementar su anchura erosionando las orillas, mientras que la profundidad del cauce se reducía por sedimentación en el lecho. Estos procesos concuerdan perfectamente con el funcionamiento de este tipo de cauces en la naturaleza, donde estos mismos procesos se suceden para configurar una sección transversal del canal ancha y poco profunda (relación anchura – profundidad de valor bajo), la cual maximiza la eficiencia del cauce para el transporte de carga de fondo (transporte de sedimento ligado al fondo o lecho del canal).

Ante la eficiencia del modelo flume para reproducir el comportamiento de cauces tipo “braided”, se realizaron con los alumnos múltiples simulaciones en las que partiendo de diferentes configuraciones morfológicas del cauce (como las listadas a continuación), se analizaba la evolución de las mismas observando y comentando los cambios producidos por el río en tiempo real: cambios en la anchura y profundidad del cauce, variaciones en la sinuosidad del cauce, procesos de migración de meandros, procesos de corta de meandros, formación de barras fluviales, procesos de erosión fluvial y localización espacial de la misma, procesos de sedimentación fluvial y su localización espacial...

Configuraciones iniciales planteadas:

- Cauce rectilíneo, estrecho y profundo.
- Cauce de baja sinuosidad, estrecho y profundo.
- Cauce de elevada sinuosidad, estrecho y profundo.

Observando la respuesta del modelo a todas estas configuraciones se ha podido discutir con los alumnos como la pendiente longitudinal del canal y el tipo de sedimento, condicionan la

respuesta del mismo y los procesos de evolución fluvial relacionados: disminución de la sinuosidad, ensanchamiento del canal por erosión de sus orillas, y disminución de la profundidad del cauce por sedimentación en el lecho del cauce.

Generación de superficies 3D mediante fotogrametría.

Para distintas configuraciones iniciales de cauce (como las indicadas anteriormente), se llevó a cabo una sistemática toma de imágenes digitales que cubriera la completa extensión del modelo desde todos los puntos de vista, de tal manera que posteriormente no se encontrasen puntos muertos de visión. Una vez adquiridas las imágenes, con una cámara Canon EOS250, se procedió junto con los alumnos a la descarga de las imágenes en un ordenador y al trabajo en gabinete con las mismas y el software Agisoft PhotoScan. Como se ha mencionado anteriormente, las imágenes deben tener un solape con otras imágenes en todas direcciones. En este paso, y pese a la toma sistemática de imágenes por parte de los alumnos, en alguno de los modelos no se logró una completa cobertura del canal, apareciendo en el proceso de fotogrametría pequeños huecos con falta de información. Estos errores han servido para concienciar a los alumnos de algunas de las limitaciones que nos podemos encontrar al aplicar estas técnicas de reconstrucción 3D del terreno: por un lado la necesidad de tomar imágenes desde todos los ángulos posibles, sobre todo cuando se quiere reproducir superficies que de por sí son muy irregulares, y por otro lado el efecto negativo que sobre esta técnica tienen las superficies de agua (que debido a reflejos de luz principalmente), las cuales pueden provocar la incapacidad de generar una superficie continuo por ausencia de datos en las zonas cubiertas de agua (algo que ha sucedido en el cauce y desembocadura del canal en alguno de los modelos). Sin embargo, estos contratiempos han sido aprovechados para ampliar los conocimientos ligados al desarrollo metodológico de la fotogrametría digital de detalle.

Las superficies 3D generadas en el paso anterior fueron exportadas a ficheros ASCII, con el objetivo de ser incorporadas al programa QGIS en forma de superficies raster. Una vez dentro de QGIS, los alumnos generaron modelos de sombreado del relieve que permiten mejorar la interpretación de la superficie del terreno, y facilitan la identificación y cartografía de formas del terreno ligadas a la dinámica fluvial. Además, la extensión "*DEMto3D*" nos permite el generar a partir de un MDT un fichero de tipo "STL", el cual es la puerta de entrada hacia la impresión 3D.

Para complementar los resultados obtenidos del modelo flume, y suplir las limitaciones del mismos (representatividad de cauces de baja energía – sinuosos), se han utilizado los datos del proyecto LiDAR (Instituto Geográfico Nacional-IGN) para la generación de MDTs, a partir de los cuales derivar mapas de sombreado del terreno y sobre los mismos proceder a la identificación y cartografía de formas fluviales en un entorno SIG. Esto además permite iniciar a los alumnos en la utilización de la amplia gama de datos topográficos disponibles en el IGN.

3. Metodología empleada en el proyecto

3.1. Simulación fluvial en modelo a escala – flume.

Una vez comprobadas las capacidades de modelización del modelo flume, así como sus limitaciones, se han propuesto diferentes configuraciones iniciales del modelo (anteriormente mencionadas) las cuales quedaban registradas para la discusión posterior de los cambios observados en la superficie del terreno. Una vez iniciado un modelo o simulación, y dada la capacidad de detener el funcionamiento del flujo, se indicaba a los alumnos el inicio de diferentes procesos ligados a la dinámica fluvial: erosión de orillas, transporte de sedimento, formación o desarrollo de barras fluviales, procesos de corta de meandros, avulsión de canales, formación de deltas de desembocadura fluvial,...

Así mismo, en los momentos en los que se consideró de interés el modelo fue interrumpido para la captura de imágenes digitales encaminadas a la posterior generación de modelos 3D mediante las técnicas de fotogrametría. Por último, durante todo el tiempo de funcionamiento de los modelos (así como en los instantes en que el mismo se detenía por el interés didáctico) se ha podido establecer un debate con y entre los alumnos para indicar los procesos activos y el ¿por qué? de los mismos.

3.2. Fotogrametría digital de detalle para la elaboración de modelos digitales 3D.

Como tarea inicial previa los trabajos de fotogrametría, se procedió a la colocación de una serie de puntos de control en el modelo. Estos puntos, señalizados mediante “dianas” en la que se representa un elemento geométrico singular, son fijos e inalterados a lo largo de todas la modelización, representando por ello puntos estables del terreno que han de servir para las posteriores tareas de localización espacial de los fotogramas y las partes del modelo que representan. Además, a estos puntos de control se les han asignado unas coordenadas X-Y-Z que definirán la extensión superficial de nuestro modelo. A partir del reconocimiento automático de puntos de control (puntos representados en más de una imagen, y que nos sirven para encajar las distintas imágenes con el objetivo de conformar una sola imagen continua), se procedió a implementar las técnicas de fotogrametría con el objetivo de lograr una superficie 3D continua.

3.3. Impresión 3D de modelos digitales de superficie del terreno.

Una vez obtenidos los ficheros *.stl correspondientes a los instantes Inicial – Intermedio – Final, estos son incorporados a un programa de impresión 3D, el cual se encarga de generar el laminado del modelo, o descomposición del relieve es una serie de láminas que serán las que posteriormente la impresora va imprimiendo y apilando para generar el bloque-modelo 3D. Una vez obtenidos, los alumnos pueden discutir los cambios y señalarlos físicamente en el objeto que constituye la impresión 3D.

4. Recursos humanos

El grupo de profesores que integra el equipo humano del proyecto tiene una amplia experiencia docente e investigadora, abarcando en su docencia múltiples asignaturas (Grado y Máster) en las que los objetivos alcanzados en el presente proyecto pueden ser de utilidad para la mejora docente:

Asignaturas en las que se va a aplicar el proyecto:

- Geodinámica Externa (Obligatoria) - 2º Grado en Geología
- Geomorfología (Obligatoria) - 3º Grado en Geología
- Geología Ambiental y Ordenación del Territorio (Optativa) - 4º Grado en Geología
- Geología aplicada a la Biología (Obligatoria) - 1º Grado en Biología
- Riesgo Fluvial, Costero y de Laderas (Obligatoria) - Máster en Geología Ambiental
- Restauración Geomorfológica (Obligatoria) - Máster en Geología Ambiental

Además, el proyecto implicaba también a personal PAS, y alumnos del Grado en Geología y el Master en Geología Ambiental. La labor principal del PAS involucrado en el proyecto, el cual es Técnico de Laboratorio, se ha centrado en las tareas de mantenimiento del modelo (calidad del agua, ajustes del circuito cerrado de agua, instalación de equipamiento para la observación y toma de datos,..). Mientras que los alumnos han participado activamente en el desarrollo y puesta en funcionamiento de los modelos, con el desarrollo de las expectativas iniciales de evolución del modelo flume, y el registro final de cambios ocurridos en el mismo para su comparación con dichas hipótesis iniciales.

Además, el intercambio de ideas y comentarios con los alumnos implicados en el proyecto durante la fase de análisis de las capacidades simuladoras y limitaciones del modelo, intercambiando puntos de vista y opiniones ha servido para dinamizar posteriormente los ensayos llevados a cabo con los alumnos de las asignaturas anteriormente mencionadas. Permitiendo centrar y focalizar foros de discusión sobre las principales dudas y comentarios previamente surgidos con el grupo de alumnos que ha participado en el desarrollo de este proyecto. En este sentido, todas estas discusiones han sido enriquecedoras y también han aportado al grupo de profesores que desarrolla el proyecto un feedback o retro-alimentación con los alumnos.

5. Desarrollo de actividades

Debido a los diferentes compromisos de los miembros del equipo del proyecto (tanto profesores, como PAS, y alumnos), no se pudo realizar una planificación a largo plazo de las

tareas a desarrollar. Más al contrario, se eligieron los momentos en los que los distintos miembros disponían de tiempo para ir avanzando en las distintas tareas: configuración y ejecución de modelos con la toma de imágenes para la generación de modelos 3D; desarrollo de los modelos 3D en formato digital mediante técnicas de fotogrametría; interpretación de formas superficiales en un entorno SIG; impresión 3D de los modelos digitales para su utilización en las tareas docentes.

5.1. Fase de observación directa, supervisada y guiada por el profesor

Durante esta fase, se implementaron distintos tipos de modelos en los que a partir de una configuración inicial, se observaron y comentaron los cambios producidos, el origen de los mismos, y que procesos son los que dominaban dichos cambios. A continuación se comentan brevemente algunos de los modelos (o partes de los mismos) desarrollados:

- **Delta dominado por el aporte continental:** con 2,5 m de longitud, es posible poner en funcionamiento al mismo tiempo la desembocadura de un canal fluvial y una línea de costa. Se puede observar perfectamente la superposición de lóbulos de progradación, así como de la avulsión entre ellos. Los alumnos pueden comprobar conceptos comentados en teoría, como por ejemplo la diferenciación entre zonas activas e inactivas del abanico, y como estas se van alternando en el tiempo y el espacio.

- **Ríos meandriformes con distintos índices de sinuosidad:** La evolución de los meandros es suficientemente dinámica para poder observar erosión en las márgenes externas de los canales, sedimentación en la interna. La migración lateral de los meandros acaba con procesos de estrangulamiento. Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, la densidad de la arena silíceo impide un correcto funcionamiento del flume en la reproducción de tramos de río de baja energía (como los meandriformes); para los que sería necesario disponer (solicitado para el proyecto INNOVA 2021/22, el cual ha sido concedido) de arena plástica de menor densidad que facilite los procesos de transporte de sedimento bajo condiciones de menor energía.

- **Ríos braided completos.** Formación de canales secundarios y avulsiones, erosión remontante con identificación precisa de los puntos de inflexión. El funcionamiento de este tipo de cauces ha sido muy satisfactorio, y los alumnos pudieron comprobar la gran dinámica (por su velocidad de cambios y por la cantidad de cambios en si misma) de este tipo de cauces.

- **Confluencia de dos ríos,** con intensificación de los procesos de erosión aguas abajo. Cambios en el nivel de base, favoreciendo la erosión remontante o la sedimentación aguas abajo. Este tipo de modelos ha empezado a considerarse a partir de la concesión del proyecto INNOVA 2021/22, que ha permitido la adquisición de un

segundo punto de aporte de agua al modelo, lo que permite reproducir dos cauces y su confluencia.

- **Llanuras aluviales y procesos de inundación:** Gracias a la anchura del flume y la capacidad de inclinación variable, se ha podido recrear la expansión de un evento de inundación en una llanura aluvial, así como reproducir como se produce el desbordamiento de un cauce y la ocupación de la llanura de inundación adyacente.

- **Acuíferos y aguas superficiales.** Se puede observar la conexión directa entre agua superficial y subterránea, simulando variaciones estacionales de caudal, desde la sequía hasta la inundación. La reproducción de este proceso ha sido posible principalmente gracias al uso de arena lavada, dado que la ausencia de arcillas y limos acelera los procesos de infiltración. Así, los alumnos han podido observar como el tránsito de agua dentro del modelo se mantiene una vez se ha cerrado el circuito de agua, y por tanto no hay aportación de caudal al modelo. La manera más sencilla de verificar dicho proceso es observar cómo se mantiene la salida de agua del modelo más allá del momento en que se cierra la entrada de agua al mismo.

5.2. Fase de interacción con el flume.

Los alumnos han podido interactuar y experimentar con el flume de dos maneras: 1) cambiando los factores intrínsecos y extrínsecos en un mismo escenario: Los factores intrínsecos están controlados, principalmente, mediante la inclinación del flume, y la distribución del sedimento. Los factores extrínsecos o hidro-climáticos, mediante la variación del caudal. 2) La idea es que planifiquen a priori un escenario de manera teórica y que lo reproduzcan completamente en el flume, comparando posteriormente la coincidencia o no de las hipótesis de partida planteadas. A continuación enumeramos algunos ejemplos:

- Un río meandriforme, tiende a desarrollarse en una llanura de inundación con bajo gradiente, pero se transformara en un río braided ante un incremento del gradiente. Este proceso se conoce como metamorfosis fluvial y un flume es el lugar perfecto para observarlo.
- Las variaciones de caudal aceleran o ralentizan los procesos de erosión, transporte y sedimentación (cambio en el caudal recirculado).
- Tras un periodo de sequía, (ausencia de caudal), los ríos son perdedores, es decir, recargan el acuífero aluvial. Una vez saturado el subsuelo comienza la escorrentía superficial y los procesos fluviales. Este proceso se puede reproducir satisfactoriamente tras un periodo prolongado de inactividad del flume, cuando toda la arena del mismo se ha secado. Al volver a ponerlo en funcionamiento, no se produce una escorrentía superficial efectiva hasta que no hay una saturación del suelo o sedimento.

- El exceso de caudal se manifiesta como una riada o inundación. Se puede seguir la secuencia de inundación, con una sucesión de zonas inundables. Se pueden construir viviendas a escala con la impresora 3D, así como puentes, etc... situarlas en la llanura aluvial y simular una inundación, tal y como se realiza en los modelos hidráulicos teóricos. Estos ejemplos han empezado a ponerse en marcha junto con los alumnos de la asignatura de Master de “Riesgo Fluvial, Costero, y de Laderas”.

5.3. Registro cualitativo y cuantitativo

El material audiovisual generado es de un gran valor didáctico porque contiene una dimensión temporal. Está basado en varias tecnologías de las cuales las fotografías seriadas y la construcción de videos *time-lapse* son las más asequibles e inmediatas. El registro mediante video (con una cámara cenital) es completamente novedoso y sobre todo les permitirá comprender los procesos geomorfológicos de manera dinámica.

La generación de modelos digitales a partir de los escenarios es una fase completamente nueva para el alumnado y su potencial educativo es muy destacable, dado que el objetivo final en nuestros programas docentes es la aplicación práctica (cartografía, cuantificación, etc...). La idea es que los alumnos elaboren modelos de los escenarios geomorfológicos del laboratorio (fases inicial – intermedia – final). Con estos modelos se pueden hacer dos tareas: a) utilizarlos como base topográfica de alta resolución, tanto en modelos hidráulicos virtuales en clase, como una base para practicar la cartografía geomorfológica y de riesgos geológicos (pueden crear mapas topográficos, de sombreados, hacer medidas de distancias, alturas, pendientes, etc.); b) imprimirlos en tres dimensiones.

5.4. Divulgación

El material audiovisual relacionado con la construcción de la instalación, así como algunos detalles de los escenarios y modelos 3D están disponibles en la web del grupo de investigación:

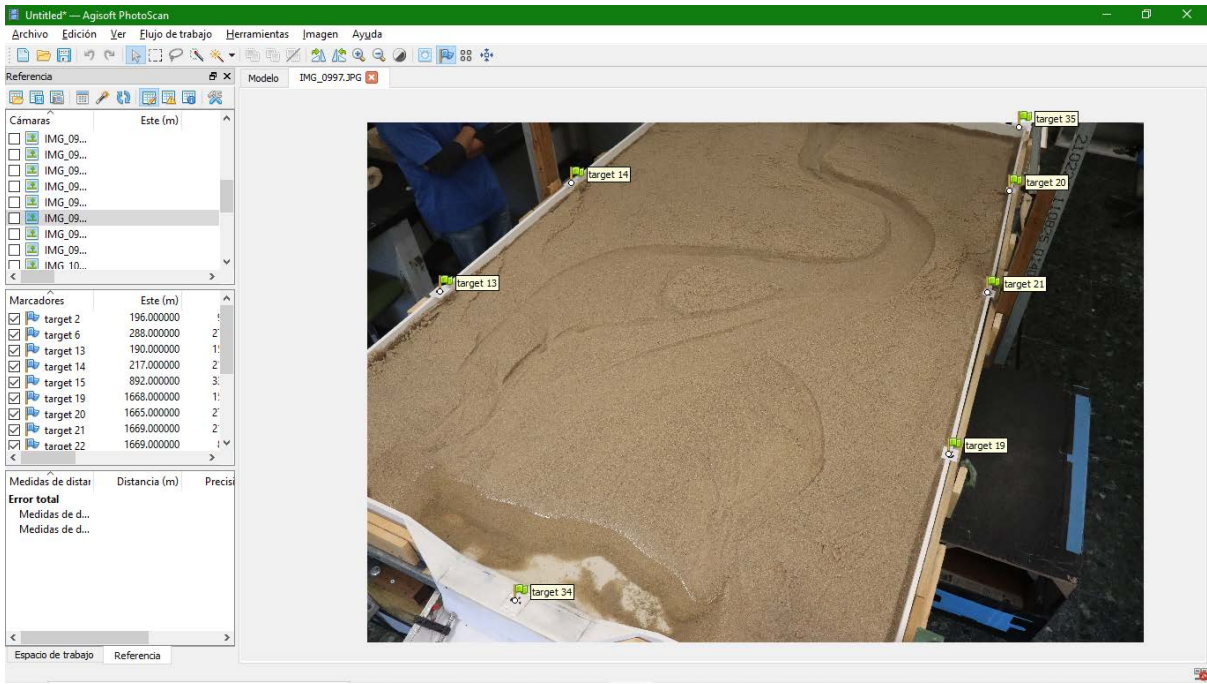
[Innova | GEOMORFOLOGÍA AMBIENTAL Y DE RIESGOS \(ucm.es\)](http://Innova | GEOMORFOLOGÍA AMBIENTAL Y DE RIESGOS (ucm.es))

A lo largo del curso, los resultados estarán disponibles a los alumnos en el correspondiente Campus Virtual de cada asignatura del Área. En este caso será un material más detallado, orientado al aprendizaje especializado, al trabajo del alumno mediante tareas concretas y a la evaluación del mismo.

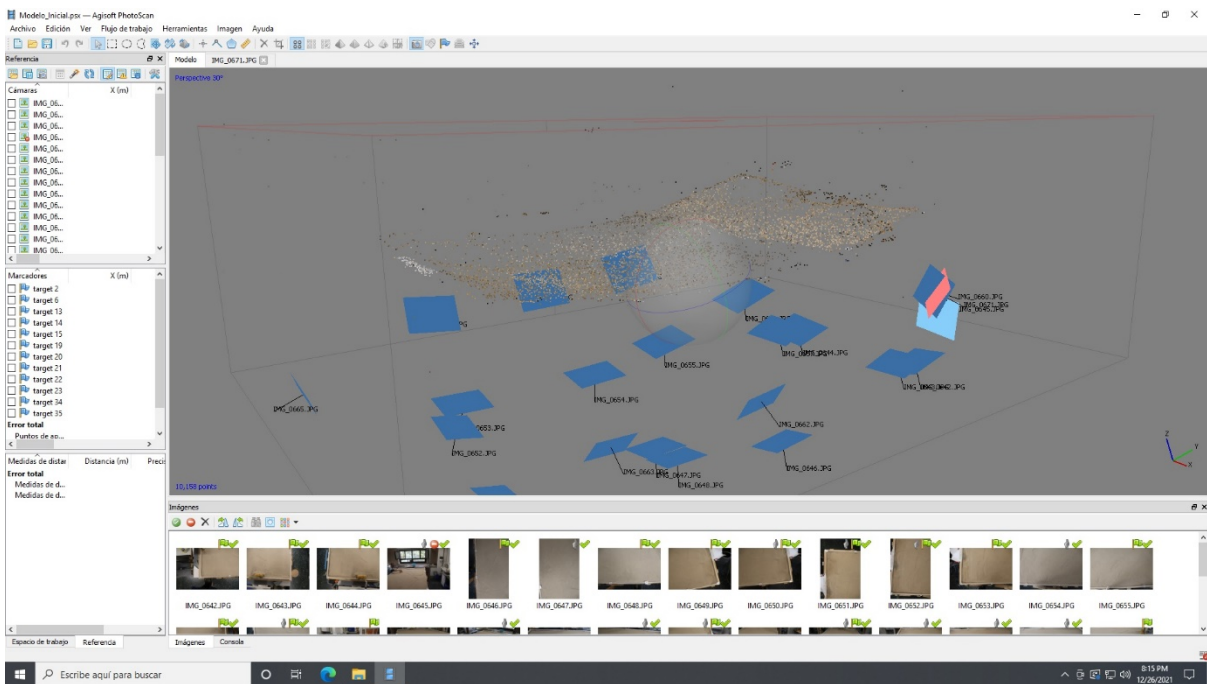
Finalmente, con un carácter más divulgativo, se irán subiendo a Instagram (aún por definir el nombre definitivo), tanto fotografías y videos del flume como de los resultados. Por último, dada la singularidad del modelo, uno de los objetivos a futuro es publicar en revistas especializadas de enseñanza (p.e. AEPECT), el proceso de diseño y construcción del flume, así como de la experiencia educativa que irá resultando en los siguientes meses.

6. Anexos

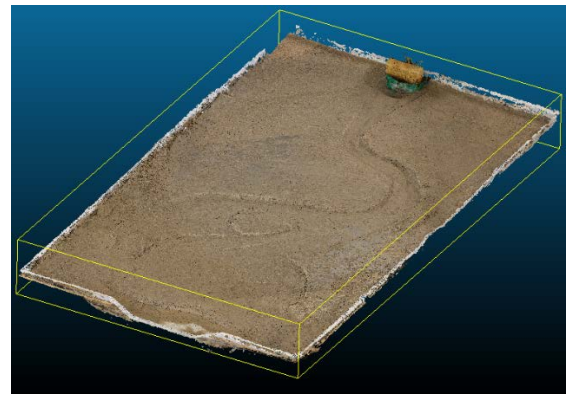
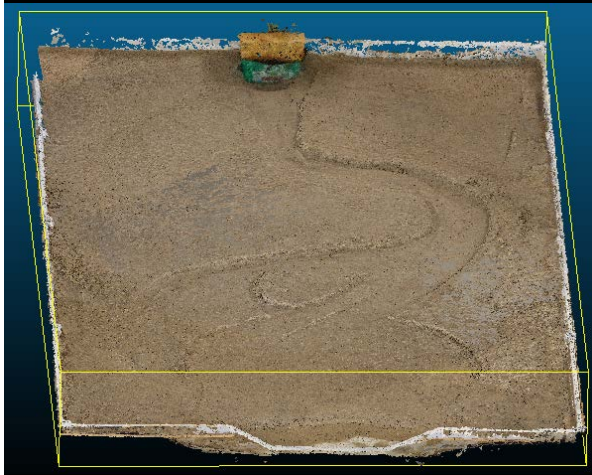
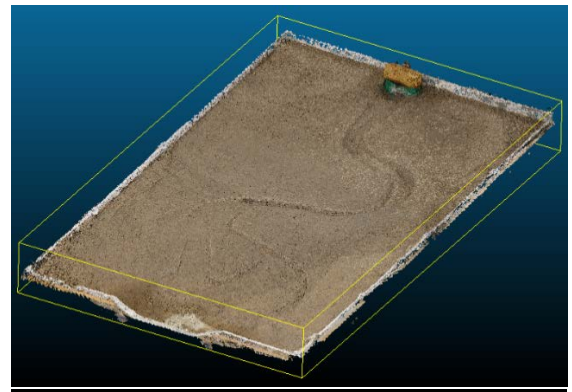
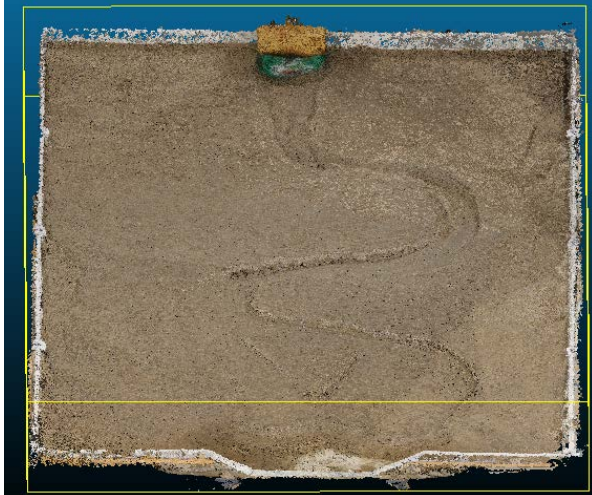
6.1. Fotogrametría Digital



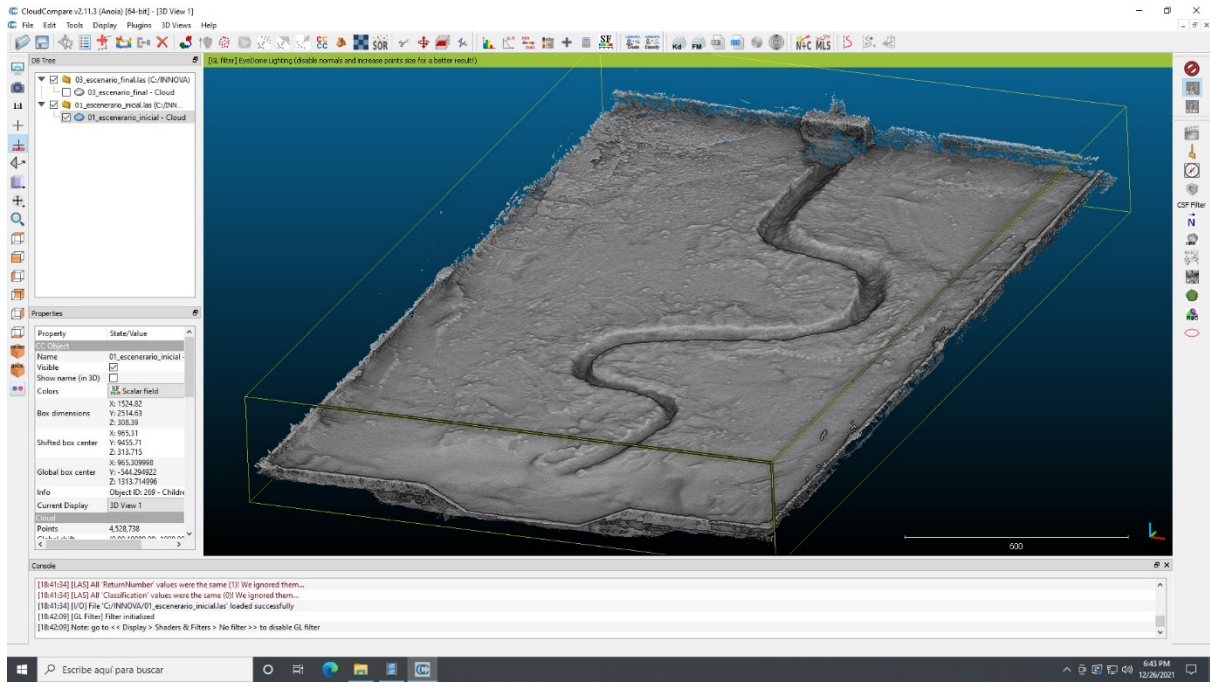
Captura de la pantalla del software Agisoft PhotoScan para el tratamiento de imágenes por fotogrametría digital de detalle. En la imagen puede apreciarse el proceso aplicación de puntos de control sobre los fotogramas capturados en el modelo flume.



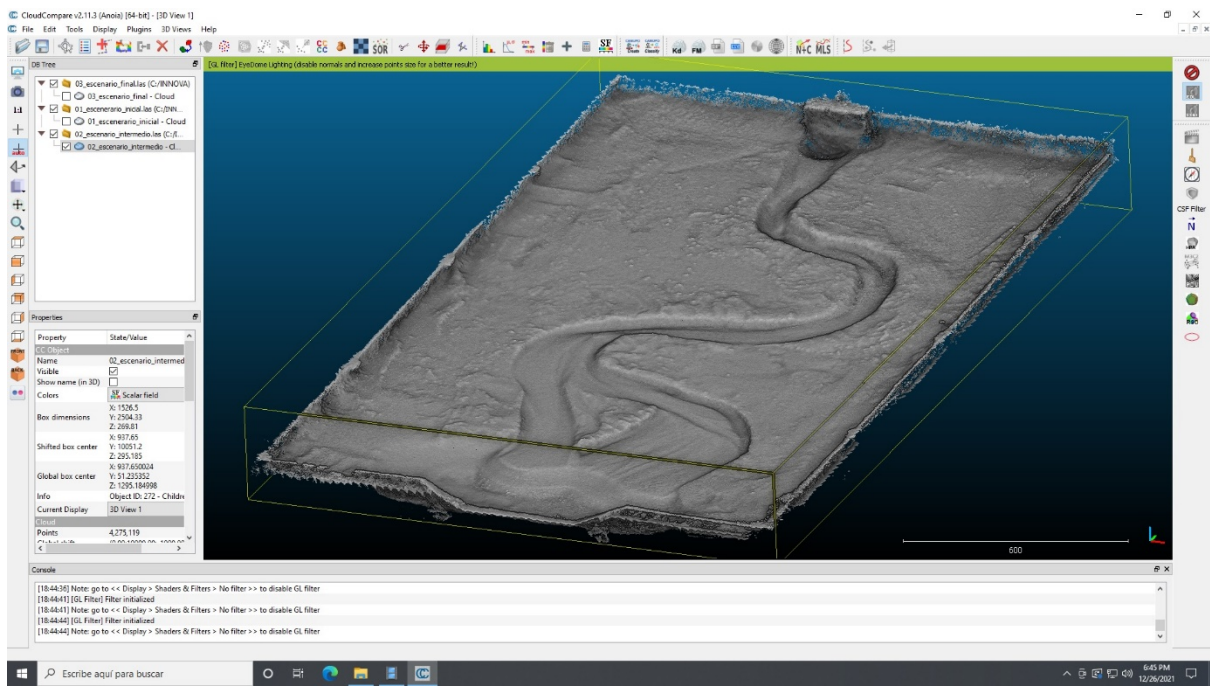
Captura de la pantalla del software Agisoft PhotoScan para el tratamiento de imágenes por fotogrametría digital de detalle. En la imagen puede apreciarse el proceso de alineación de fotogramas, y la generación de una nube de puntos 3D.



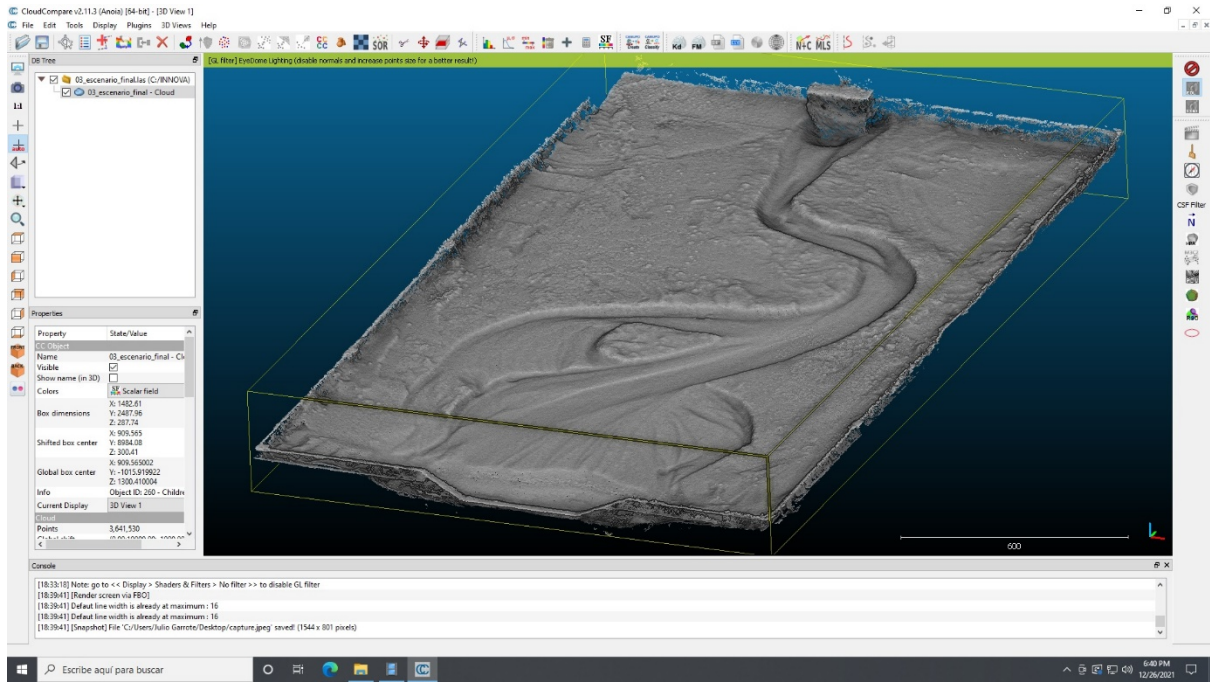
Composición en color (RGB) de los modelos en 3D (nube de puntos) representativos del Escenario Inicial (arriba), Escenario Intermedio (centro), y Escenario Final (abajo) del modelo ejecuta en el flume. El conjunto de datos esta tratado con el software libre Cloud Compare.



Captura de la pantalla del software Cloud Compare, durante el tratamiento de la nube de puntos 3D, aplicándola un filtro del sombreado. Ejemplo para el Escenario Inicial.

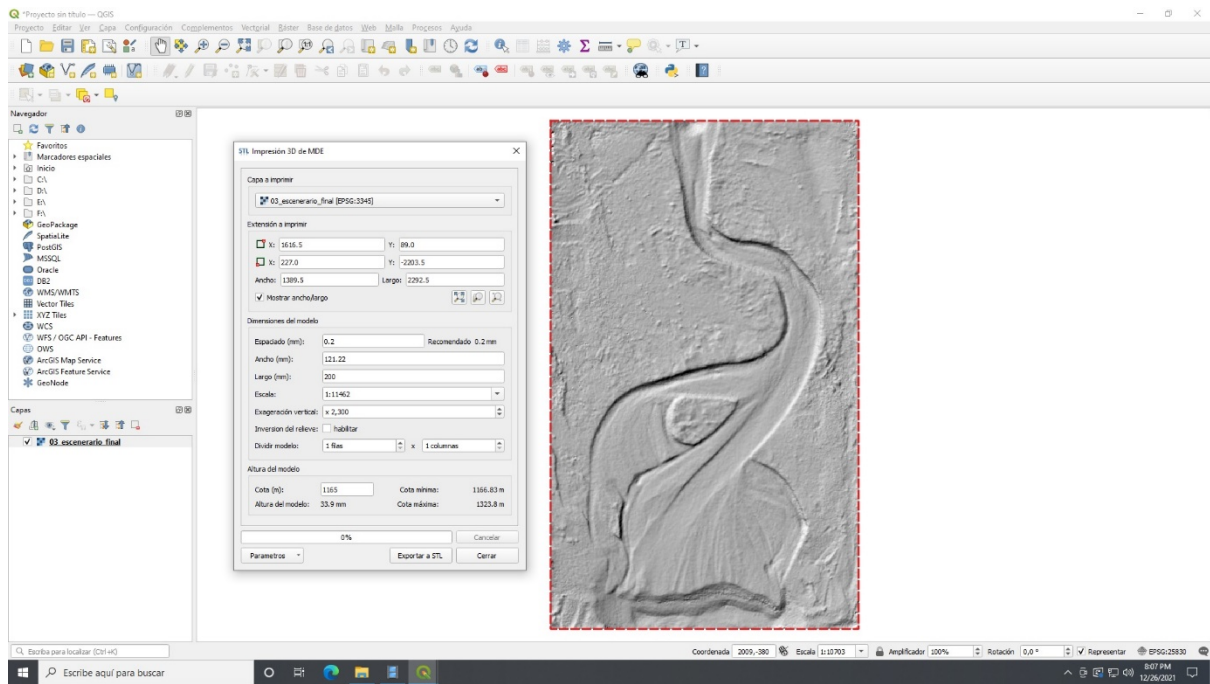


Captura de la pantalla del software Cloud Compare, durante el tratamiento de la nube de puntos 3D, aplicándola un filtro del sombreado. Ejemplo para el Escenario Intermedio.

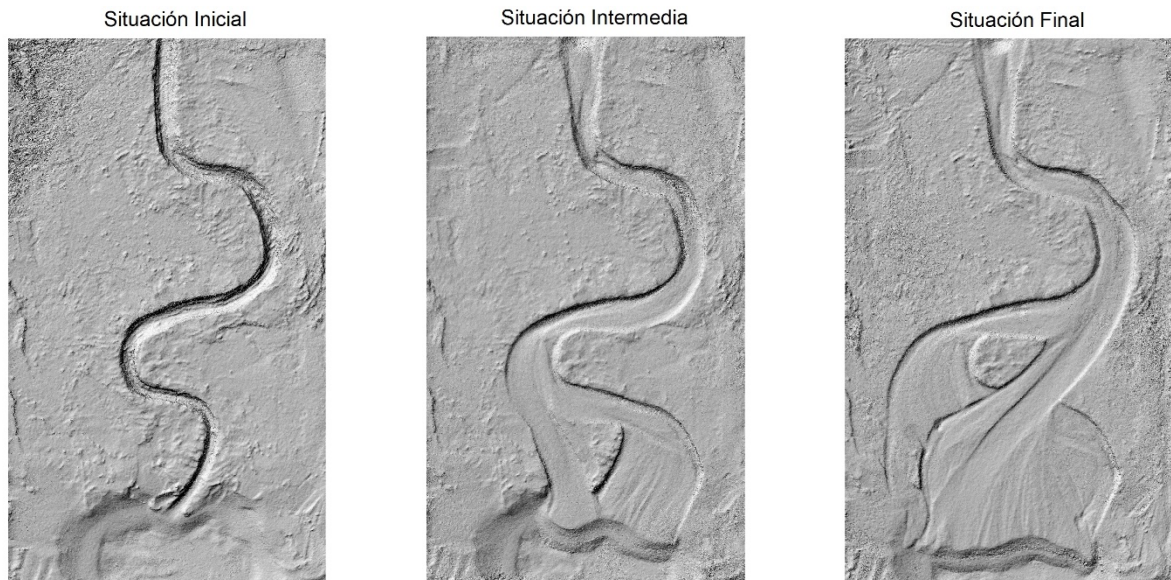


Captura de la pantalla del software Cloud Compare, durante el tratamiento de la nube de puntos 3D, aplicándola un filtro del sombreado. Ejemplo para el Escenario Final.

6.2. Herramientas SIG para la gestión de datos

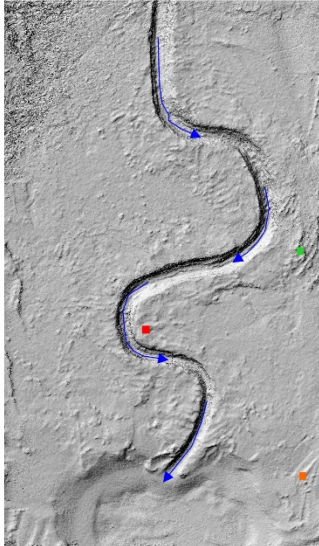


Transformación de un Modelo Digital del Terreno (MDT) a un fichero *.stl (para impresión 3D) en el entorno SIG (QGIS 3.16) para el Escenario Final.

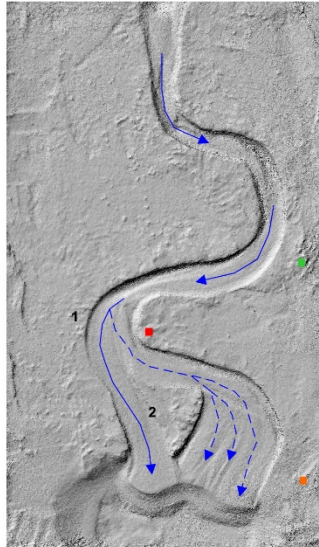


Montaje en un entorno SIG (ESRI® ArcGIS 10.8.1) de modelos de sombreado (Hill Shade) correspondientes a los tres estadios analizados en el modelo. Generados a partir de las nubes de puntos exportadas de Cloud Compare en formato *.laz, se han interpolado a formato raster.

Situación Inicial

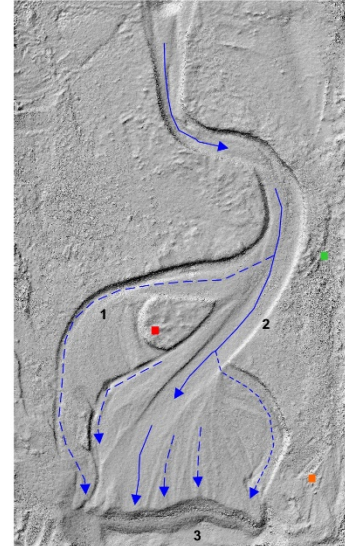


Situación Intermedia



- 1 - Migración lateral del meandro hacia Oeste
- 2 - Corta de Meandro

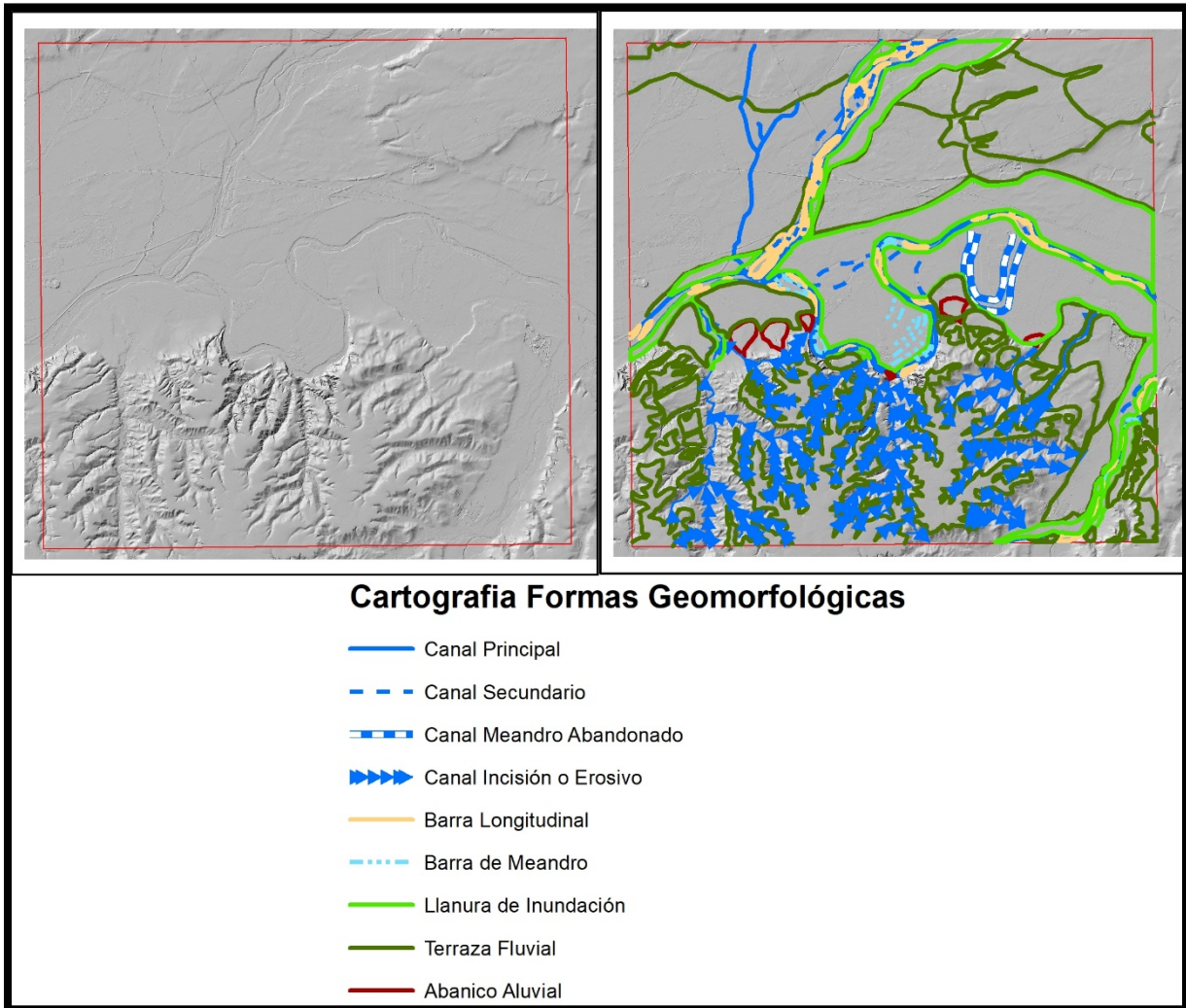
Situación Final



- 1 - Migración lateral del meandro hacia Oeste
- 2 - Corta de Meandro
- 3 - Crecimiento abanico aluvial desembocadura

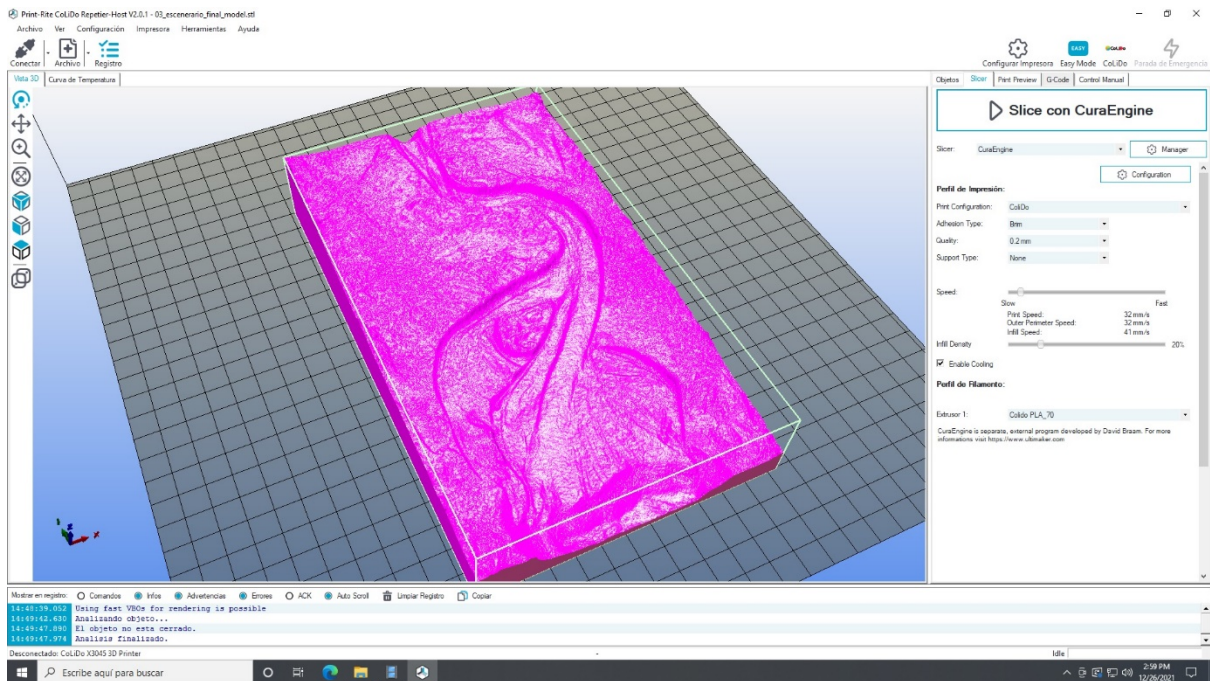
Interpretación de las direcciones de flujo principales, así como de los cambios mayores observados en la superficie del terreno y ligados a la dinámica fluvial analizada en el modelo. Los cuadrados de colores representan puntos estables. Las líneas continuas representan el flujo principal, mientras que las líneas de trazo discontinuo representan canales abandonados o flujos secundarios.

6.3. Herramientas SIG para la gestión de datos LiDAR y cartografía digital de formas del terreno

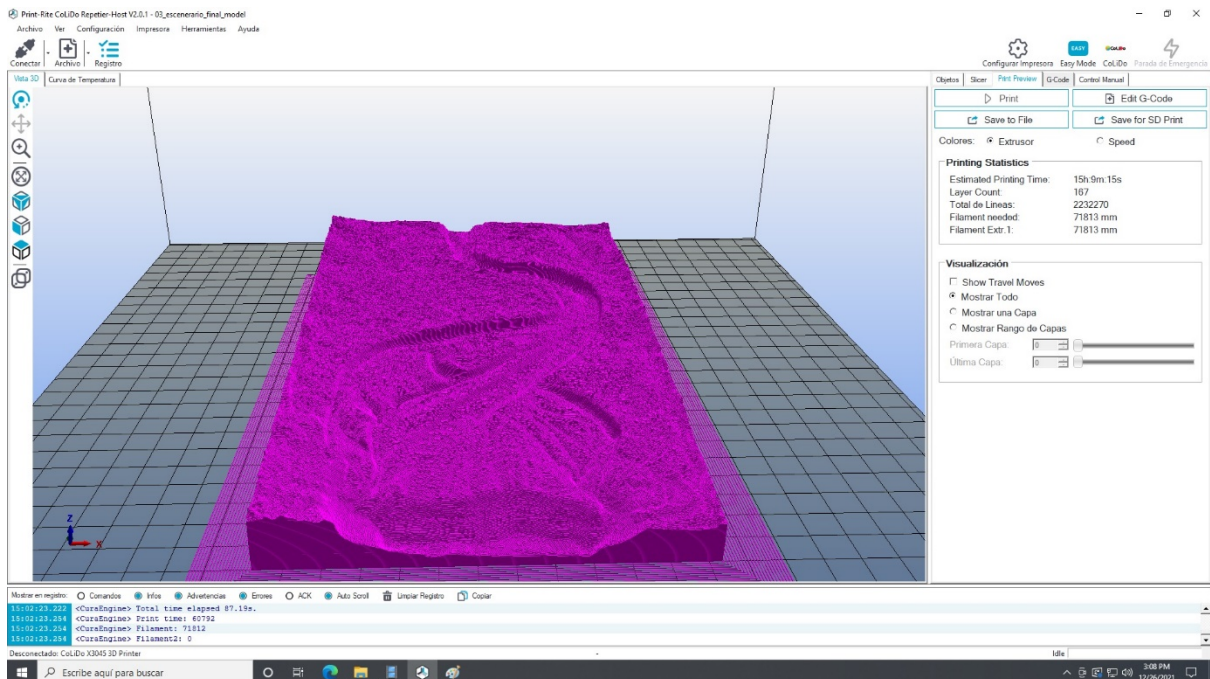


Ejemplo de utilización de los datos LiDAR del IGN para la generación de modelos digitales del terreno (mapa de sombreado del terreno, izquierda), e interpretación geomorfológica de la zona de análisis (derecha, y leyenda abajo).

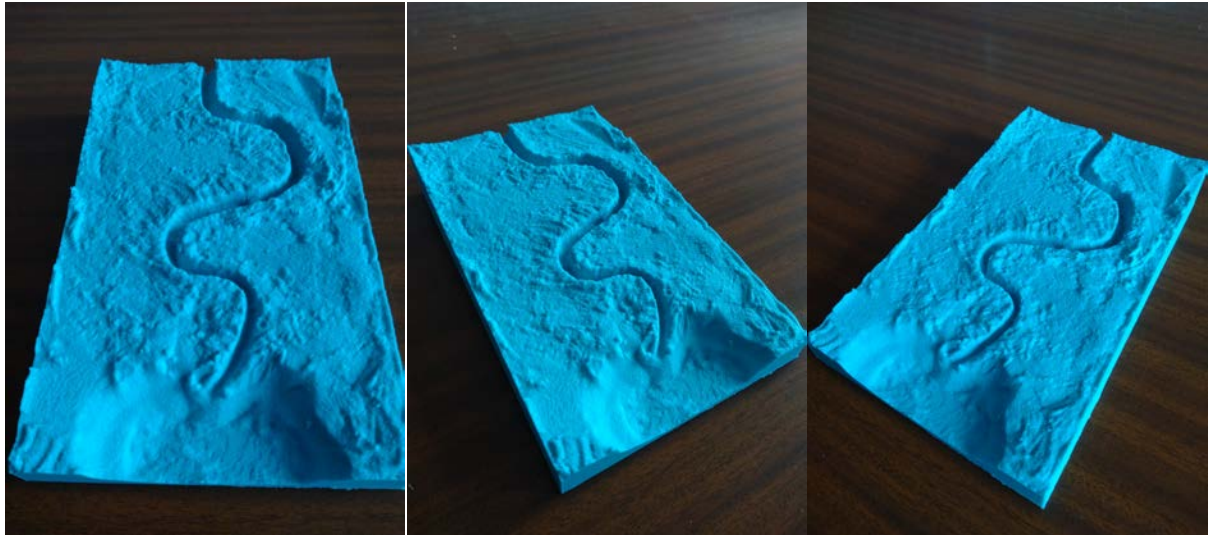
6.4. Impresión 3D



Captura de la pantalla del software Print-Rite CoLiDo Repetier; importación de fichero *.stl (generado en el entorno SIG de Qgis), para los resultados asociados al Escenario Final.



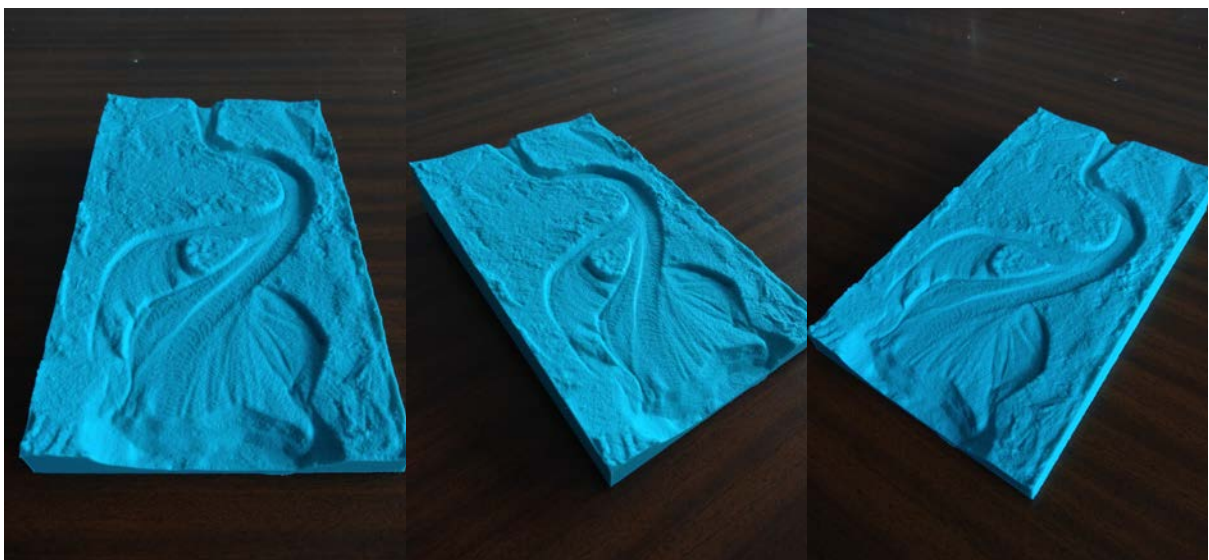
Captura de la pantalla del software Print-Rite CoLiDo Repetier; resultado en pantalla de la generación del fichero de laminado (*.gcode) a utilizar con la impresora 3D CoLiDo X3045, para los resultados asociados al Escenario Final.



Vistas del modelo impreso en 3D para el Escenario Inicial de la simulación en el *flume*.



Vistas del modelo impreso en 3D para el Escenario Intermedio de la simulación en el *flume*.



Vistas del modelo impreso en 3D para el Escenario Final de la simulación en el *flume*.



Comparación de la morfología de la superficie del terreno generada por el modelo a escala de río, para el Escenario Inicial (izquierda; cauce estrecho y sinuoso), Escenario Intermedio (centro; migración al Este del meandro en desembocadura y su posterior corta y desarrollo de abanico en desembocadura), y Escenario Final (derecha; cauce ancho y somero, con migración lateral al Oeste del canal, y posterior corta de meandro superior y desarrollo del abanico aluvial en desembocadura). Imagen superior en color de impresión, e imagen inferior en escala de grises.

